



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Tadas Apulskis**

**VALDOMOS TRINTIES POZICIONAVIMO PAVAROS KŪRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Lekt. dr. Darius Mažeika

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**  
**GAMYBOS INŽINERIJOS KATEDRA**

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(parašas) Doc. dr. Kazimieras Juzėnas

(data)

**VALDOMOS TRINTIES POZICIONAVIMO PAVAROS KŪRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Mechatronikos studijų programa (kodas 621H73001)**

**Vadovas**

(parašas) Lekt. dr. Darius Mažeika

(data)

**Recenzentas**

(parašas) Lekt. dr. Anatolijus Šulginas

(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Tadas Apulskis (M EM-3/11 gr.)

(data)

**KAUNAS, 2015**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Tadas Apulskis

(Studento vardas, pavardė)

Mechatronika (kodas 621H73001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Valdomos trinties pozicionavimo pavaros kūrimas“  
**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 15 m. birželio 1 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Tado Apulskio** baigiamasis projektas tema „Valdomos trinties pozicionavimo pavaros kūrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Apulskis, T. Valdomos trinties pozicionavimo pavaros kūrimas. Magistro baigiamasis projektas, vadovas lekt. dr. Darius Mažeika; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, gamybos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015, 44 psl.

## **SANTRAUKA**

Baigiamajame darbe nagrinėjamos pozicionavimo pavarų konstrukcijos ir galimybės jas patobulinti, pritaikant oro pagalvės efektą. Šiuolaikinių pozicionavimo sistemų pavaroms keliami aukšti tikslumo ir patvarumo reikalavimai. Darbe aprašoma eksperimentinės valdomos trinties pozicionavimo pavaros kūrimo eiga, tyrimas ir rezultatai. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados ir pasiūlymai.

Reikšminiai žodžiai: pzt, efektas, trintis, valdiklis, pavara, vykdiklis, pozicionavimas, padėtis.

## **SUMMARY**

In this masters thesis construction of positioning actuators and abilities to improve them using squeeze film effect are researched. Modern positioning systems require high precision and durability actuators. Thesis contains process of designing experimental controlled friction positioning actuator, analysis and results. Conclusions and suggestions are written at the end of work.

Keywords: pzt, effect, friction, actuator, drive, controller, positioning, position.

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Tvirtinu:**

Gamybos inžinerijos  
katedros vedėjas

\_\_\_\_\_  
*(parašas, data)*

**Kazimieras Juzėnas**

\_\_\_\_\_  
*(vardas, pavardė)*

**MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS  
STUDIJŲ PROGRAMA MECHATRONIKA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo ar taikomojo pobūdžio darbas (projektas), kuriam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu magistrantas turi parodyti, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, įgijęs pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Baigiamuoju darbu bei jo gynimu magistrantas turi parodyti savo kūrybingumą, gebėjimą taikyti fundamentines mokslo žinias, socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinių galimybių išmanymą, informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės įgūdžius, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo įgūdžius, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžius, gebėjimą tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema

Valdomos trinties pozicionavimo pavaros kūrimas

Patvirtinta dekanu 2015 m. gegužės mėn. 11 d. įsakymu Nr. ST17-F-11-2

2. Darbo tikslas

Suprojektuoti eksperimentinę valdomos trinties pozicionavimo pavarą

3. Darbo struktūra

Įvadas  
Patentų ir oro pagalvės efekto analizė  
Mechaninės konstrukcijos projektavimas  
Valdymo sistemos sudarymas  
Eksperimentinio modelio tyrimas  
Išvados ir pasiūlymai

4. Reikalavimai ir sąlygos

Atlikti patentų analizę ir ištirti oro pagalvės efekto pritaikymo galimybę. Suprojektuoti valdomos trinties pozicionavimo pavarą, kurios savasis svoris siektų iki 100 gramų. Sudaryti valdymo sistemą ir eksperimentiškai nustatyti didžiausią galimą pavaros apkrovą.

5. Darbo pateikimo terminas 2015m. birželio mėn. 1d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis

Išduota studentui Tadui Apulskiui

Užduotį gavau

Tadas Apulskis  
(magistranto vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas, data)

Vadovas

lekt. dr. Darius Mažeika  
(pareigos, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas, data)

## **TURINYS / CONTENT**

ĮVADAS	1
1. PATENTŲ IR ORO PAGALVĖS EFEKTO ANALIZĖ	2
1.1. Pjezoelektrinius vykdyklius naudojančių pozicionavimo sistemų apžvalga	2
1.2. Oro pagalvės efektas	6
2. MECHANINĖS KONSTRUKCIJOS PROJEKTAVIMAS, VIRPESIŲ MODŲ ANALIZĖ	9
2.1. Pradinių projektavimo duomenų nustatymas	9
2.2. Mechaninės konstrukcijos projektavimas	9
2.3. Pjezoelektrinio elemento rezonansinio dažnio nustatymo tyrimas	17
2.4. Pjezoelektrinio elemento virpesių modų analizė	18
3. VALDYMO SISTEMOS SUDARYMAS	21
3.1. Valdymo sistemos aprašymas	21
3.2. Valdymo sistemos algoritmo sudarymas	22
3.3. Valdymo įtaisų ir sistemos elementų parinkimas, projektavimas ir surinkimas	23
3.3.1. Pasirinkto valdiklio parametrai	23
3.3.2. Valdymo pultas	24
3.3.3. Linijiniai inerciniai vykdykliai	26
3.3.4. Linijinių inercinių vykdyklių dažninės pavaros	28
3.3.5. Pozicionavimo padėties nustatymo jutiklis	30
3.3.8. Pjezoelektrinis vykdyklis	32
3.3.8. Pjezoelektrinio vykdyklio įtampos stiprintuvas	33
4. EKSPERIMENTINIO MODELIO TYRIMAS	37
4.1. Pavaros modelio gamyba	37
4.2. Eksperimentinio modelio tyrimas	38
4.3. Eksperimentinio modelio tyrimo rezultatai	40
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	44
LITERATŪRA	45
PRIEDAI	47

## ĮVADAS

1880 metais fizikai Jacques ir Pierre Curie nustatė, jog tam tikra jėga veikiant Kvarco ir Segneto druskos kristalus, jų paviršiuose generuojamas elektros krūvis. Šis reiškinys buvo pavadintas tiesioginiu pjezoefektu. Vėlesni tyrimų rezultatai parodė, kad galimas ir atvirkštinis pjezoefektas – kristalo paviršius paveikus elektros krūviu, kinta jo matmenys.

Pjezoelektrinės medžiagos priskiriamos išmaniųjų medžiagų grupei. Šiuo metu jos plačiai naudojamos įvairiems jutikliams, garso spinduoliams bei pavaroms gaminti. Pagrindinis privalumas – maži gabaritai, svoris bei formos įvairovė. Pasižymi dideliu atsparumu apkrovoms ir gali sukurti didelę judesio jėgą. Taip pat keičiant tiekiamos įtampos dydį bei dažnį, vykdyklio deformacijų parametrai gali būti keičiami plačiu diapazonu.

Pozicionavimo bei manipuliavimo sistemos, naudojamos optikoje, medicinoje, matavimų ir daugelyje kitų precizinės mechanikos sričių. Didžioji dalis tokių sistemų sukurta panaudojant žingsnines, servo variklių, pneumatines ar kitas tradicines perdavas. Pagrindiniai trūkumai – sudėtinga konstrukcija, atsižvelgiant į reikiamą pozicionavimo sistemos laisvės laipsnių skaičių. Taip pat iš dalies dideli įrenginio gabaritai bei išliekanti problema dėl tepimo, susidėvėjimo metu atsirandančio laisvumo. Išvardinti trūkumai tiesiogiai susiję su pozicionavimo tikslumu bei sistemos pritaikymo galimybėmis. Šiuo metu pozicionavimo užduočiai atlikti vis plačiau taikomos pjezoelektrinių vykdyklių pavaros, kurios iš dalies išsprendžia kylančias problemas. Tačiau pradinė pavaros konstrukcijos realizavimo koncepcija kol kas nėra pakitusi. Taigi vis dar yra poreikis tyrinėti tinkamesnius būdus pozicionavimo sistemų patikimumui ir lankstumui užtikrinti.

**Šio baigiamojo darbo tikslas** suprojektuoti valdomos trinties pozicionavimo pavarą, valdymo sistemą ir atlikti bandomojo modelio eksperimentinį tyrimą. Darbe pateikiama patentų ir oro pagalvės efekto analizė, mechaninės konstrukcijos ir valdymo sistemos sudarymas bei eksperimentinio modelio tyrimas.

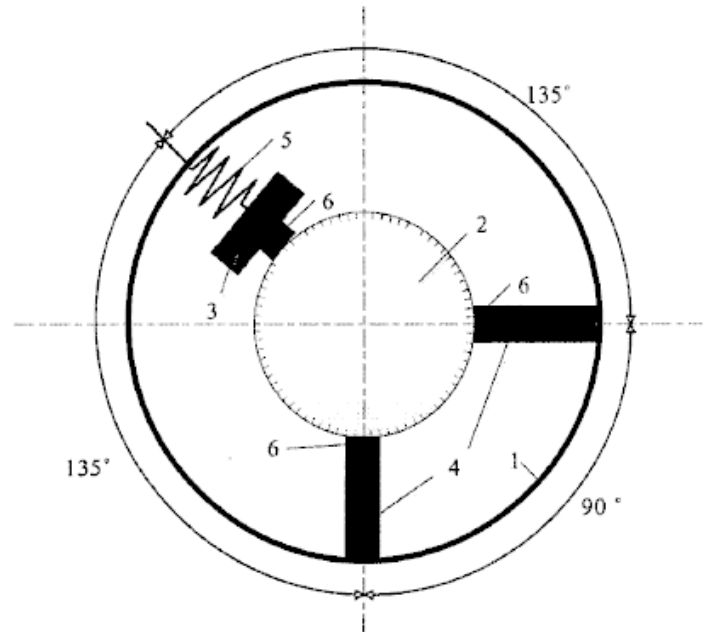
### **Uždaviniai:**

1. Išnagrinėti oro pagalvės efekto sudarymo sąlygas;
2. Suprojektuoti kompaktišką pavaros modelį, kurio savasis svoris siektų iki 100 gramų;
3. Parinkti ir sukonstruoti reikiamus valdymo sistemos elementus;
4. Eksperimentiškai nustatyti didžiausią galimą pavaros apkrovą.

# 1.PATENTŲ IR ORO PAGALVĖS EFEKTO ANALIZĖ

## 1.1. Pjezoelektrinius vykdiklius naudojančių pozicionavimo sistemų apžvalga

Viena iš pjezoelektrinius vykdiklius naudojančių pozicionavimo sistemų buvo sukurta Kauno technologijos universitete ir 2011 metais užpatentuota Lietuvos valstybiniame patentų biure [1].



**1.1 pav.** Precizinė pozicionavimo sistema: 1. Nejudamas pagrindas; 2. Optinio elemento laikiklis (apvali rastrinė skalė); 3. Sukamojo judesio pjezopavara; 4. Tiesialinijinio judesio pjezopavaros; 5. Prispaudimo spyruoklė; 6. Trinčiai atsparios kaladėlės [1]

1.1 paveiksle pavaizduota precizinė pozicionavimo sistema. Patento autoriai: R.Bansevičius, A.Bubulis, V.Jūrėnas, A.Barakauskas, A.Kasparaitis, patento savininkas – Kauno technologijos universitetas. Precizinis pozicionavimo įrenginys, priskiriamas prietaisų sričiai – aukštos skyros pozicionavimo ir matavimo sistemoms, tarp jų optinių elementų pozicionavimo įrenginiams. Įrenginį sudaro nejudamas pagrindas 1 ant kurio vienoje plokštumoje tvirtinamas optinio elemento laikiklis (apvali rastrinė skalė) 2 ir trys pjezoelektriniai vykdikliai, kurių vienas yra sukamojo judesio pjezopavara 3 su prispaudimo spyruokle 5, o kiti du tiesialinijinio judesio pjezopavaros 4. Pjezoelektriniai vykdikliai, prijungti prie elektroninio sužadinimo-valdymo bloko, kontaktuoja su optinio elemento laikikliu 2 trijuose taškuose per trinčiai atsparias kaladėles 6 ir atlieka jo bazavimo funkciją. Tiesialinijinio judesio pjezopavaros 4 optinio elemento laikiklio 2 centro atžvilgiu išdėstytos taip, kad tarp jų yra 90° laipsnių kampas, o tarp sukamojo judesio pjezopavaros 3 abiejų pusių ir tiesialinijinio judesio pavarų yra 135° laipsnių kampas.

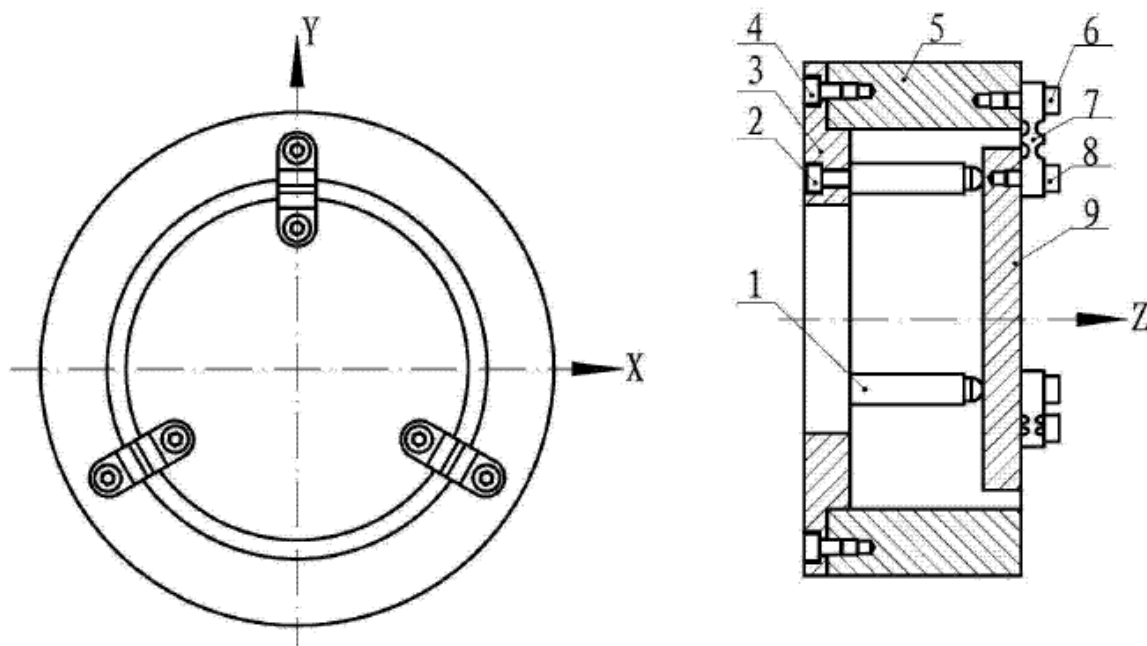
Pozicionavimo sistemos valdymas: iš elektroninio sužadinimo-valdymo bloko sklaidžiamas elektrinis signalas į sukamojo judesio pjezopavarą 3 sužadina joje deformacijas, kurios per trinčiai atsparų elementą 6 perduodamos į optinio elemento laikiklio 2 apskritiminį paviršių.



Kontaktinėje zonoje, dėl mechaninių deformacijų, vyksta optinio elemento laikiklio 2 pasisukimas, kurio kryptis priklauso nuo sužadavimo-valdymo bloko paduodamo signalo. Linijinius optinio elemento laikiklio judesius x, y plokštumoje suteikia tiesialinijinio judesio pjezopavaros 4, kuriose kryptingas deformacijas viena ir kita kryptimis sužadina signalas iš sužadavimo-valdymo bloko. Tokiu būdu elemento laikiklis 2 plokštumoje gali būti pozicionuojamas labai aukšta nanometrų skyra. Kadangi optinio elemento laikiklis kontaktuoja su trimis pjezoelektriniais vykdikliais vienoje plokštumoje, kurie trijuose taškuose atlieka bazavimo funkciją, tai leidžia atsisakyti ašinės guolinės atramos. Tai panaikina laisvumą ir tuo pačiu užtikrina pozicionavimo tikslumą [1].

Pagrindinis sistemos trūkumas – konstrukcijoje naudojami trinties elementai, kuriems dylant mažėja sistemos pozicionavimo tikslumas. Taip pat gana sudėtingas valdymas, kadangi naudojami trys pjezoelektriniai vykdikliai.

Vėliau, 2012 metais, Kinijos Mokslų ir technologijų instituto mokslininkų buvo pasiūlyta taip pat pjezoelektriniais vykdikliais valdoma trijų laisvės laipsnių pozicionavimo sistema [2].



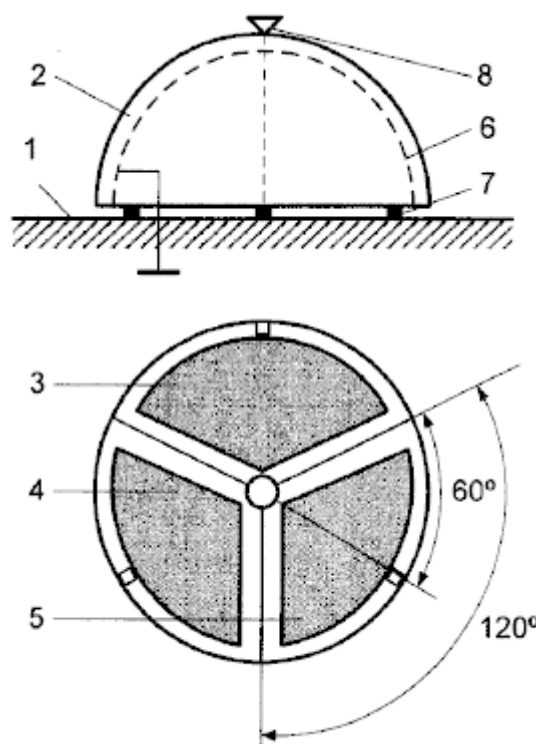
**1.2 pav.** Trijų laisvės laipsnių pozicionavimo sistema: 1. Pjezoelektrinis vykdiklis; 2. Pjezoelektrinio vykdiklio įvaržos varžtas; 3. Pjezoelektrinio elemento žiedo formos dangtelis (atrama); 4; 6; 8. Tvirtinimo varžtai; 5. Cilindro formos korpusas; 7. Standžios-lanksčios svirties jungtis; 9. Pozicionuojama staliuko plokštuma [2]

1.2 paveiksle pavaizduota trijų laisvės laipsnių nanometrinio tikslumo pozicionavimo sistema. Patento autoriai: J.Zhai, T.Chuan, W.Yong, C.Zhang. Prietaiso pritaikymo sritis - optika, mikroskopo staliuko pozicionavimas. Konstrukciją sudaro: trys pjezoelektriniai vykdikliai 1, kurie remiasi į atraminį žiedą 3 ir yra tarpusavyje išdėstyti 120° kampu. Jų sukuriamas judesys perduodamas per kontaktą su pozicionuojama platforma 9. Pozicionuojama platforma 9 su cilindrinio korpusu 5 sujungta trimis

standžiomis-lanksčiomis svirtimis 7, kurios atlieka bazavimo funkciją. Pozicionavimo padėtis valdoma elektroniniu valdymo bloku, keičiant įtampos amplitudę bei dažnį. Atitinkamai komutuojuojant pjezoelektriniams vykdikliams tiekiamą valdymo įtampą sukuriama standžiai įtvirtinto staliuko plokštumo svirčių 7 deformacijos. Sudaroma galimybė reguliuoti posvyrio kampą apie x, y ašis bei linijinį poslinkį z ašimi. Tokia sistema gali užtikrinti nanometrines prietaiso skyrą [2].

Pagrindinis prietaiso trūkumas – mažas pozicionavimo padėties reguliavimo lankstumas. Kadangi šios sistemos sukuriama trys laisvės laipsniai yra griežtai apriboti standžių svirčių konstrukcinių parametru. Taigi tai lemia siaurą šio pozicionavimo prietaiso pritaikymo sritį.

Dar vienas pjezoelektrinių vykdiklių pritaikymo būdas pozicionavimo pavarai buvo sukurtas Kauno technologijos universitete. 2009 metais išradimas užpatentuotas Lietuvos valstybiniame patentų biure [3].



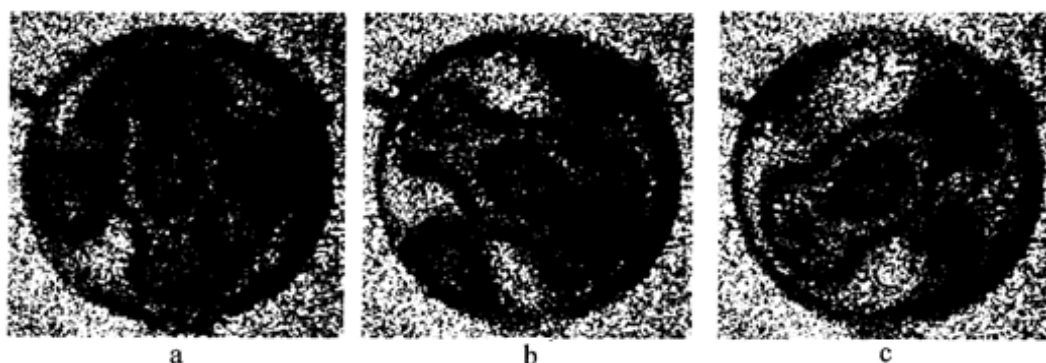
**1.3 pav.** Nupjautos sferos formos pjezokeraminio elemento schema iš priekio ir iš viršaus:

1. Kontaktinis paviršius; 2. Nupjautos sferos formos pjezokeraminis elementas; 3;4;5. Išoriniai elektrodai; 6. Vidinis elektrodas; 7. Trinčiai atsparus elementas; 8. Pozicionuojamas elementas [3]

1.3 paveiksle pavaizduotas trijų laisvės laipsnių pozicionavimo įrenginys, kurį sudaro kontaktinis paviršius, pjezokeraminis elementas su elektrodais, prijungtais prie aukšto dažnio maitinimo šaltinio, trijų, trinčiai atsparių elementų bei pozicionuojamo elemento. Pjezokeraminis elementas yra nupjautos sferos formos su pajungtais išoriniais ir vidiniu elektrodais. Visi trinčiai atsparūs elementai vienais paviršiais nejudamai pritvirtinti horizontalioje pjezokeraminio elemento plokštumoje, o kitais paviršiais laisvai remiasi į kontaktinį paviršius. Išoriniai elektrodai sudaro tris vienodas dalis, išdėstytas 120° kampu, pjezokeraminio elemento ašies atžvilgiu. Vidinis elektrodas yra ištisinis ir dengia visą

nupjautos sferos formos pjezoelektrinio elemento vidinę paviršiaus dalį. Pozicionuojamas elementas įtvirtintas hemisferos formos vykdiklio išorinės dalies ašies. Trinčiai atsparūs elementai išdėstyti  $120^\circ$  kampu vienas kito atžvilgiu bei  $60^\circ$  kampu nuo išorinių elektrodų padalinimo linijų [3].

Įrenginio veikimo principas: tiekiant iš aukšto dažnio maitinimo šaltinio įtampą į išorinius 3, 4, 5 elektrodus bei vidinį elektrodą 6, nupjautos sferos formos pjezoelementas pradeda virpėti maksimalia amplitude trinties elementų 7 vietose. Virpesiai per trinčiai atsparius elementus 7 kontaktuoja su kontaktiniu paviršiumi 1, ant kurio padėtas hemisferos formos pjezokeraminis elementas. Dėl trinties tarp šių paviršių ir sukuriama elipsinių mikrojudesių, formuojamas sukamasis judesys. Tokiu būdu galima keisti manipuluojamo objekto 8 sukamąją padėtį. Tiekiant aukšto dažnio įtampą į vieną iš išorinių elektrodų, pavyzdžiui 3 ir vidinį 6, formuojamas kryptingas judesys plokštumoje per trinčiai atsparų elementą, esantį žadinimo zonoje. Norint pakeisti pozicionavimo judesio kryptį, aukšto dažnio įtampa tiekama į kitą elektrodų grupę, pavyzdžiui išorinį 4 ir vidinį 6. Taigi ant išorės centrinės aukščiausios hemisferos formos pjezokeraminio elemento dalies taško pritvirtintas pozicionuojamas objektas 8 juda pasirinkta kryptimi [3].



**1.4 pav.** Hemisferos formos pjezoelektrinio elemento virpesių pasiskirstymo hologramos:

- a. Kai prie aukšto dažnio maitinimo šaltinio prijungti elektrodai 3, 6;
- b. Prijungti elektrodai 4, 6;
- c. Prijungti elektrodai 5, 6 [3]

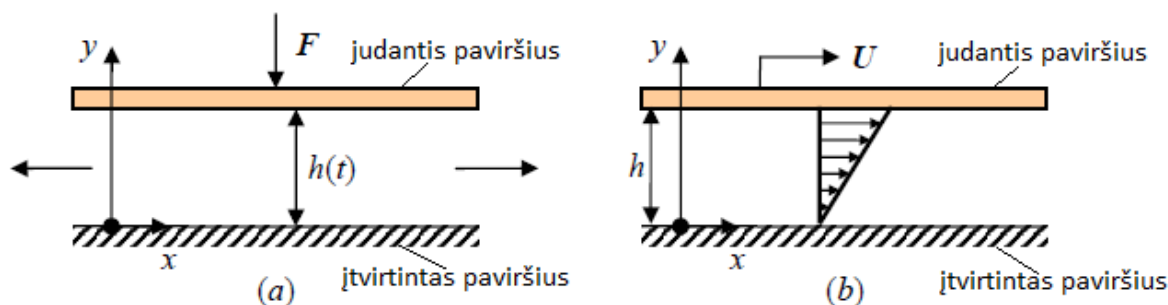
1.4 paveiksle pavaizduotos nupjautos sferos formos pjezoelektrinio elemento virpesių pasiskirstymo hologramos. Čia tamsūs tonai rodo maksimalias virpesių amplitudes, šviesūs – nulines. Centrinėje išorinėje aukščiausioje vykdiklio dalyje, kuriame pritvirtintas pozicionuojamas objektas 8, matoma žiedinė nulinės amplitudės virpesių sritis. Taigi virpesiai, sužadinti trinčiai atspariuose elementuose, neperduodami į pozicionuojamą elementą, tuo pačiu užtikrinamas pozicionavimo tikslumas [3].

Pagrindinis prietaiso trūkumas, kad konstrukcijoje taip pat naudojami pastovios trinties elementai, kuriems dylant mažėja sistemos pozicionavimo tikslumas. Taip pat naudojamas sudėtingos formos pjezokeraminis elementas, kurio galimas formos defektas yra iš dalies nesutampanti išorės elektrodų išdėstymo pozicijos, tai tiesiogiai veikia pozicionavimo tikslumą. Verta paminėti, kad

naudojamas gana sudėtingas valdymas, kadangi valdant pozicionavimo judesio parametrus reikia komutuoti keleto elektrodų išvadais.

## 1.2. Oro pagalvės efektas

Kuomet įtaiso paviršius yra lygiagretus šalia esančiai pagrindo paviršiaus plokštumai ir jo judesys nukreiptas link jos, gali būti palankios sąlygos susidaryti oro pagalvės efektui. Oro pagalvė (angl. „Squeeze film effect“) tarp paviršių susidaro dėl to, kad pasireiškia slėgio, esančio oro tarpelyje tarp paviršių, skirtumas tarp aplinkos slėgio. Kai įrenginys juda šalia pagrindo ar sienelės, tarpelyje esanti oro plėvelė suspaudžiama ir susidaro teigiamas diferencinis slėgis. Kuomet dujų slėgis išauga iki atitinkamos reikšmės, jos yra išstumiamos iš tarpelio. Tokiu atveju, kai įrenginys juda tolyn nuo sienelės, dujos yra įtraukiamos į tarpelį. Mažėjantis dujų slėgis tarpelyje lemia neigiamo diferencinio slėgio susidarymą. Vienmačiais atvejais, susidaranti įtaiso amortizacija yra atvirkščiai proporcinga tarpelio dydžiui – kuo mažesnis tarpelis, tuo didesnė amortizacinė jėga. Tokį procesą galime prilyginti aerostatiniam slydimo guoliui [4].

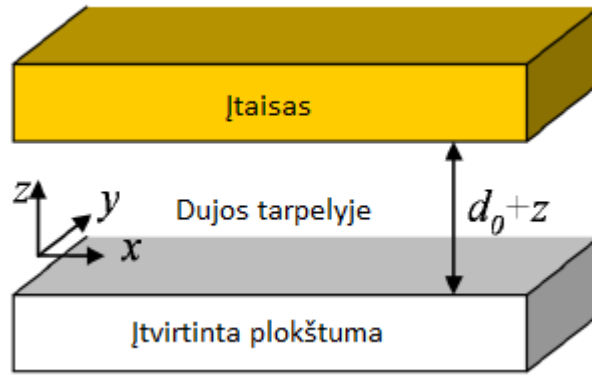


**1.5 pav.** Oro pagalvės efektas: a. Judančio paviršiaus judesys nukreiptas link pagrindo; b. Atvejis panašus pirmajam, tačiau čia judantis paviršius tuo pačiu slysta ant susidariusios oro plėvelės atitinkama kryptimi [4]

Kontinuumo atveju, oro pagalvės efektas tarp dviejų plokštelių gali būti apibūdinamas mokslininkų C.Naiver ir G.G.Stokes pasiūlytomis Naiver-Stokes lygtimis aprašančiomis skysčių – „fluidų“ judesį. Vis dėl to daugeliu atveju naudojama mokslininko O.Reynolds pasiūlyta linijinė izoterminė Reynolds lygtis suspaudžiamoms dujų plėvelėms [4]:

$$\frac{P_o d_o^2}{12 n_{eff}} \Delta^2 \cdot \left( \frac{p(x,y,t)}{P_o} \right) - \frac{\delta}{\delta t} \left( \frac{p(x,y,t)}{P_o} \right) = \frac{\delta}{\delta t} \left( \frac{z}{d_o} \right) \quad (1.1)$$

- čia:  $P_o$  – aplinkos slėgis;  
 $p(x, y, t)$  – slėgio pertraukimo dydis priklausantis nuo padėties ir laiko;  
 $n_{eff}$  – efektyvi terpės klampa, priklausanti nuo Knudsen numerio vertės;  
 $d_o$  – atstumas (tarpelis) tarp lygiagrečių plokštelių;  
 $z$  – tarpelio dydžio nuokrypis.



**1.6 pav.** Linijinės izoterminės Reynolds lygties suspaudžiamoms dujų plėvelėms atvaizdavimas [4]

Savo darbe apie izotermines suspaustų dujų plėveles, autorius J.J.Blech pateikia amortizacinės jėgos tarp dviejų plokštelių įvertinimo metodą, remiantis linijine Reynolds lygtimi. Autorius teigia, kad virpančios plokštumos atveju, pasireiškia tamprus ir slopinančio elementų sąlygotos jėgos, kurios sąveikauja tarp dviejų plokštelių paviršių dėl susidarantios dujų plėvelės suspaudimo ir ištempimo. Nedimensinė amortizacinė jėga veikianti, tarp tarpusavyje judančių stačiakampio formos lygiagrečių plokštelių, aprašoma lygtimi [5]:

$$f_0 = \frac{64\sigma\epsilon}{\pi^6} \sum_{m,n \text{ odd}} \frac{m^2 + \left(\frac{n}{\beta}\right)^2}{(mn)^2 \left\{ \left[ m^2 + \left(\frac{n}{\beta}\right)^2 \right]^2 + \frac{\sigma^2}{\pi^4} \right\}} \quad (1.2)$$

- čia:  $\sigma$  – suspaudžiamos dujų plėvelės numeris, (1.3) formulė;

$$\epsilon = \frac{A_0}{d_0} \text{ – svyravimų amplitudės santykis tarpelyje;}$$

$$\epsilon = \frac{l}{\omega} \text{ – plokštelės savąjį dažnį įvertinantis dydis.}$$

Suspaudžiamos dujų plėvelės numeris įvertina kaip stipriai klampa veikia amortizaciją [4].

$$\sigma = \frac{12\mu l^2 \omega}{P_0 d_0^2} \quad (1.3)$$

- čia:  $\mu$  – dujų klampa;  
 $\omega$  – svyravimų dažnis;  
 $P_0$  – aplinkos slėgis;  
 $d_0$  – atstumas (tarpelis) tarp lygiagrečių plokštelių.

Eksperimentiškai įrodyta ir literatūroje pateikta, kuomet:  $\sigma$  - suspaudžiamos dujų plėvelės numeris yra mažas, dujų elgsena tampa panaši nespūdžiai terpei ir tuo metu dominuoja klampaus pasipriešinimo jėgos. Ir atvirkščiai, kuomet  $\sigma$  yra didelis, dominuoja tampraus pasipriešinimo jėgos ir dujų elgsena prilyginama spūdžiai terpei, sąlygojančią mažesnius energijos nuostolius. Suminė amortizacinė jėga apibrėžiama [4]:

$$f_d = f_0 \cos(\tau) P_0 A \quad (1.4)$$

- čia:  $A$  – stačiakampio formos plokštelės paviršiaus plotas;  
 $P_0$  – aplinkos slėgis;  
 $\tau = \omega t$  – virpesių periodas.

Slopinimo darbas atliktas amortizacinės jėgos, plokštelės virpesių periodui, išreiškiamas [4]:

$$D = \int_0^T f_d \cdot \dot{x} dt = f_0 P_0 A \omega A_0 \int_0^T \cos^2(\tau) dt \quad (1.5)$$

$$D = \pi f_0 P_0 A A_0 \quad (1.6)$$

$$D = \pi \frac{64 P_0 A A_0^2}{\pi^5 d_0} \sum_{m,n \text{ odd}} \frac{m^2 + \left(\frac{n}{\beta}\right)^2}{(mn)^2 \left\{ \left[ m^2 + \left(\frac{n}{\beta}\right)^2 \right]^2 + \frac{\sigma^2}{\pi^4} \right\}} \quad (1.7)$$

## 2. MECHANINĖS KONSTRUKCIJOS PROJEKTAVIMAS, VIRPESIŲ MODŲ ANALIZĖ

### 2.1. Pradinių projektavimo duomenų nustatymas

Viena didžiausių mechatroninių pozicionavimo prietaisų gedimo priežasčių yra darbo metu tarp judančių elementų, dėl tepimo sutrikimų sąlygotos padidėjusios paviršių trinties, atsirandantis laisvumas. Tai lemia pozicionavimo tikslumo paklaidas. Manipuliavimo bei pozicionavimo įrenginiams taikomi tikslumo bei patvarumo parametrai kasmet įgauna vis aukštesnį reikalavimų lygį. Iš dalies patenkinti šias sąlygas padeda išmaniųjų medžiagų pritaikymas pozicionavimo procesui atlikti. Plačiausiai taikomi pjezoelektriniai vykdikliai. Tačiau siūlomos konstrukcijos pasižymi esminiu trūkumu – naudojamas tam tikros formos pastovios trinties elementas, kuris atlieka grandies, perduodančios pjezoelektrinio vykdiklio virpesius bei trinties porą sudarančio elemento funkciją. Taigi šiai aktualiai problemai išspręsti ar kiek įmanoma efektyviau lokalizuoti reikalingi tyrimai.

**Šio baigiamojo darbo tikslas** suprojektuoti valdomos trinties pozicionavimo pavarą, valdymo sistemą ir atlikti bandomojo modelio eksperimentinį tyrimą. Tokią pavarą būtų galima panaudoti įvairios paskirties pozicionavimo įrenginiuose, pavyzdžiui, kompaktiškomis medžiagų apdirbimo įrenginių pavarams ar mokslinių tyrimų laboratorijų įrangai.

Atsižvelgus į aukščiau pateiktus parametrus, nuspręsta suprojektuoti mechatroninę sistemą, kurią sudaro žiedo formos pjezokeraminis elementas, jo centrinėje dalyje patalpintas vibrovariklis arba linijiniai inerciniai vykdikliai, bei manipuluojamas staliukas.

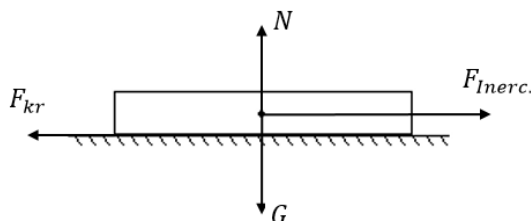
### 2.2. Mechaninės konstrukcijos projektavimas

Liečiantis dviem kūnų paviršiams, atsiranda trinties jėga, kuri trukdo vienam kūnui judėti kito kūno atžvilgiu. Prancūzų fizikas Š. Kulonas (1736-1806m.) ištyrinėjęs, sausų kūnų tarpusavio trintį, padarė šias išvadas:

1. Didžiausia trinties jėga nepriklauso nuo to, kokio didumo plotu liečiasi kūnai;
2. Didžiausia trinties jėga yra tiesiogiai proporcinga kūnus vieną prie kito spaudžiančios normalinės jėgos didumui;
3. Didžiausia trinties jėga priklauso nuo susiglaudusių kūnų medžiagos ir paviršių glotnumo;
4. Trinties jėgos kryptis priešinga kryptčiai, kuria kūnas, veikiamas jėgų slystų.

Didžiausia trinties jėga yra kritinė trinties jėga  $F_{kr}$ . Kai kūną veikianti jėga tampa didesnė už  $F_{kr}$ , pusiausvyra sutrinka – kūnas pradeda judėti. Taigi, didžiausia trinties jėga [16]:

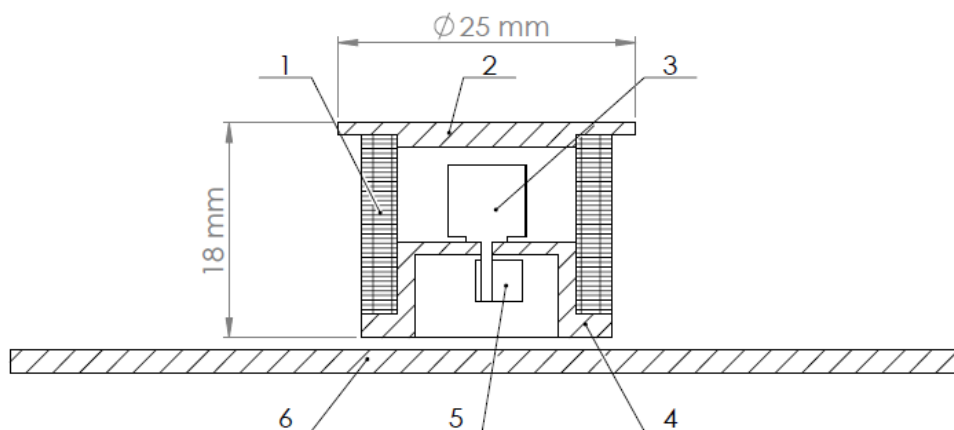
$$F_{kr} = \mu N \quad (2.1)$$



**2.1 pav.** Slydimo trinties modelis [16]

Kuriamos pozicionavimo pavaros kontaktinių paviršių, aliuminio – stiklo, trinties koeficientas lygus  $\mu = 0,6$ . Priklausomai nuo pavaros modelio svorio ir apkrovos, tiesiogiai priklauso ir trinties jėga sąveikaujanti tarp kontaktinių paviršių. Aktyvavus pjezoelektrinį vykdiklį jis pradeda virpėti užduotu dažniu, įtvirtintos glotnaus stiklo plokštumos atžvilgiu ir yra sudaromas oro pagalvės efektas. Taigi žingsniškai aktyvuojant pjezoelektrinį vykdiklį yra galimybė valdyti paviršius veikiančios trinties jėgos poveikį. Taip užtikrinamas minimalus inercinių vykdiklių generuojamos inercinės jėgos  $F_{inerc}$  poreikis, siekiant sudaryti pozicionavimo judesį. Tokiu būdu valdoma tarp pavaros kontaktinių paviršių sąveikaujanti trinties jėga.

Atliekant pirmąjį tiriamąjį darbą buvo nagrinėta keletas mechaninės konstrukcijos realizavimo būdų. Pirmojoje konstrukcijos koncepcijoje oro pagalvės efektas sukuriamas plokštumos atžvilgiu virpančio pjezoelektrinio elemento, pavaros judesys užduotomis kryptimis inicijuojamas vibrovariklio sukuriama išcentrinės jėgos.



**2.2 pav.** Valdamos trinties pavara panaudojant vibrovariklį, pjūvis: 1. Žiedo formos pjezokeraminis elementas; 2. Manipuliuojama plokštuma (staliukas); 3. Vibrovariklis; 4. Slydimo trinties kontaktinis paviršius ir korpuso elementas (įvorė); 5. Išcentrinė masė; 6. Nejudama glotni plokštuma

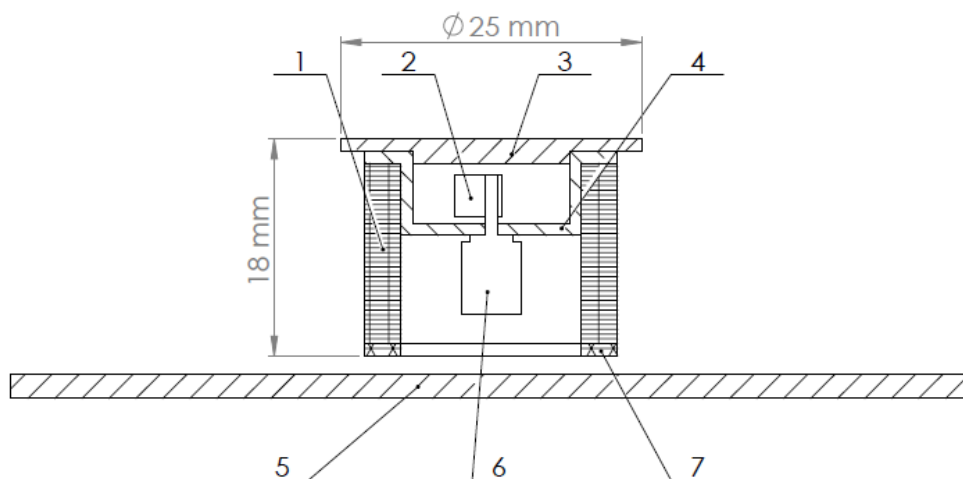
2.2 paveiksle pavaizduotas valdomos trinties trijų laisvės laipsnių pavaros konstrukcijos modelio pjūvis. Įrenginį sudaro žiedo formos pjezokeraminis elementas, su jo horizontaliu apatiniu paviršiumi nejudamai sujungta įvorė - trinties elementas, kuris atlieka ir vibrovariklio laikymo funkciją. Manipuliuojamas stalelio paviršius nejudamai sujungtas su pjezokeraminiu žiedu. Veikimo principas: pjezokeraminio elemento elektrodams padavus aukšto dažnio įtampą, pjezokeraminis elementas pradeda virpėti užduotu dažniu plokštumos 6 atžvilgiu. Tokiu būdu tarp trinties elemento 5 (įvorės) ir plokštumos



6 susidaro oro pagalvės efektas. Taigi suteikus judesio jėgą, galima keisti pavaros padėtį nejudamai įtvirtintos plokštumos atžvilgiu. Pavarai judesį atitinkama kryptimi suteikia vibrovariklio sukuriama išcentrinė jėga. Suderinant variklio sūkių dažnį, išcentrinės jėgos kryptį bei pjezokeraminio elemento aktyvavimo momentą, gali būti sukuriamas žingsninis judesys trimis laisvės laipsniais.

Įrenginys pasižymi nesudėtinga konstrukcija, kadangi naudojamas vienas standartinės formos pjezokeraminis elementas, turintis tik vieną elektrodų išvadų grupę. Taip pat dėl tarpelyje tarp trinties elemento ir plokštumos paviršių susidarančio oro pagalvės efekto, trinties elemento paviršius tarnauja ilgesnį laiką, kadangi pavaros judesio metu išvengiama pastovios sausosios slydimo trinties.

Pirmoje pavaros koncepcijoje slydimo trinties kontaktinis paviršius ir korpuso elementas ant kurio tvirtinamas vibrovariklis, dėl įvorės formos yra konstrukciškai standus. Tai gali sudaryti nepageidaujamą efektą – sumažinti žiedo formos pjezoelektrinio elemento virpesių amplitudę. Taigi būtina pakoreguoti šio elemento konstrukciją.

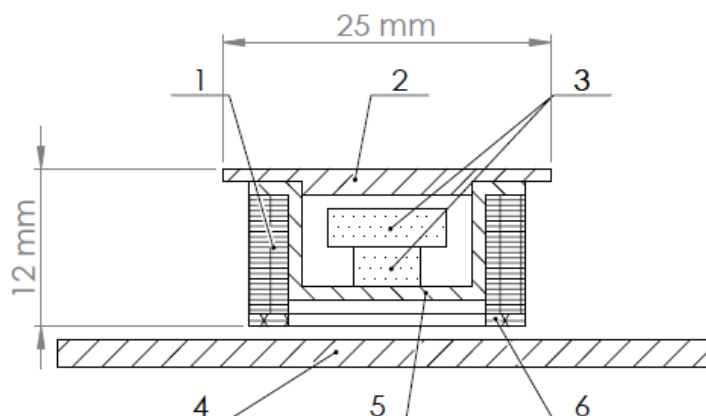


**2.3 pav.** Koreguota valdomos trinties pvara panaudojant vibrovariklį, pjūvis: 1. Žiedo formos pjezokeraminis elementas; 2. Išcentrinė masė; 3. Manipuliuojama plokštuma (staliukas); 4. Korpuso elementas (įvorė); 5. Nejudama glotni plokštuma; 6. Vibrovariklis; 7. Žiedo formos slydimo trinties kontaktinis paviršius

2.3 paveiksle pavaizduotas siūlomos valdomos trinties trijų laisvės laipsnių koreguotos pavaros konstrukcijos modelio pjūvis. Įrenginį sudaro žiedo formos pjezokeraminis elementas, su jo horizontaliu apatiniu paviršiumi nejudamai sujungtas žiedo formos trinties elementas. Vibrovariklis tvirtinamas įvorėje 4, kuri nejudamai sujungta su pjezokeraminio elemento viršutiniu paviršiumi. Manipuliuojamas stalelio paviršius nejudamai sujungtas su įvore 4. Įrenginio veikimo principas atitinka aprašytą pirmajai pavaros koncepcijai. Pagrindinis skirtumas – šioje konstrukcijoje parinktas trinties elementas yra žiedo formos. Tokia trinties elemento forma užtikrina mažesnę pjezoelektrinio elemento generuojamų virpesių slopinimą. Tačiau abi siūlomos konstrukcijos pasižymi esminiu trūkumu – vibrovariklio vibracija nuolatos perduodama pozicionavimo staleliui. Tai nepageidaujamas efektas, kuris lemia ribotą tokios sistemos pritaikymo sritį, kadangi daugumoje tikslaus pozicionavimo pavarų sukuriami virpesiai turi

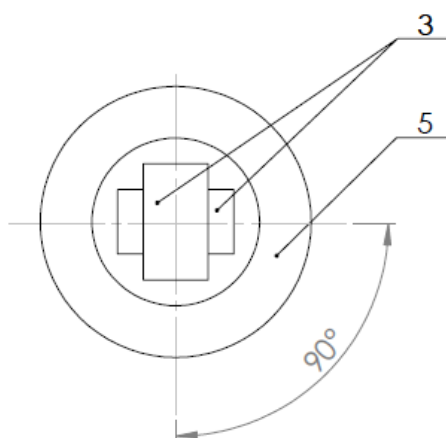
būti trumpalaikiai. Taip pat verta paminėti, kad norint nustatyti vibrovariklio sukuriamos išcentrinės jėgos kryptį ir reikiamą pjezoelektrinio elemento aktyvavimo momentą reikalingas sudėtingas valdymo sistemos algoritmas. Taigi atsižvelgus į šiuos trūkumus, reikia sumodeliuoti geresnių savybių pozicionavimo pavaros sistemą.

Išnagrinėję ir pateikę esminius pirmosios ir antrosios pavarų koncepcijų trūkumus, modeliuojame trečiąją konstrukciją. Šioje pavaros koncepcijoje oro pagalvės efektas taip pat sukuriamas plokštumos atžvilgiu virpančio pjezoelektrinio elemento. Tačiau įrenginio judesys užduotomis kryptimis inicijuojamas dviejų linijinių inercinių vykdiklių.



**2.4 pav.** Valdomos trinties pavara panaudojant linijinius inercinius vykdiklius, pjūvis: 1. Žiedo formos pjezokeraminis elementas; 2. Manipuliuojama plokštuma (staliukas); 3. Linijiniai inerciniai vykdikliai; 4. Nejudama glotni plokštuma; 5. Korpuso elementas (įvorė); 6. Žiedo formos slydimo trinties kontaktinis paviršius

2.4 paveiksle pavaizduotas trečiosios siūlomos valdomos trinties trijų laisvės laipsnių pavaros konstrukcijos modelio pjūvis. Įrenginį sudaro žiedo formos pjezokeraminis elementas, su jo horizontaliu apatiniu paviršiumi nejudamai sujungtas žiedo formos trinties elementas.



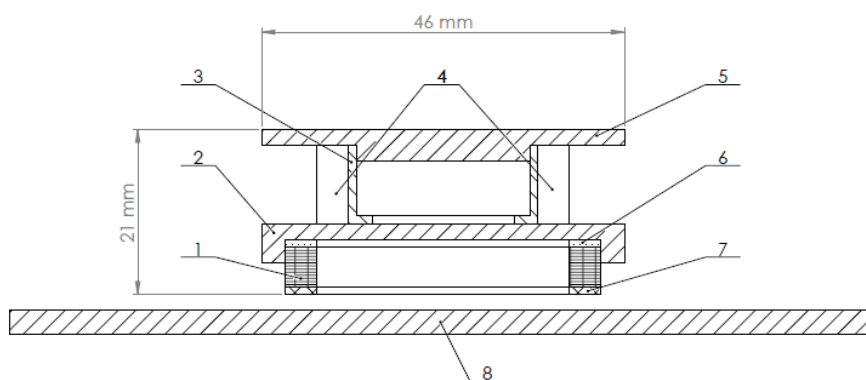
**2.5 pav.** Lininių inercinių vykdiklių padėtis, tarpusavio atžvilgiu, vaizdas iš viršaus: 3. Linijiniai inerciniai vykdikliai; 5. Korpuso elementas (įvorė)

2.5 paveiksle pavaizduoti linijiniai varikliai, išdėstyti  $90^\circ$  vienas kito atžvilgiu, tvirtinami įvorėje 5, kuri nejudamai sujungta su pjezokeraminio elemento viršutiniu paviršiumi. Manipuliuojamas stalelio paviršius taip pat nejudamai sujungtas su įvore 5.

Veikimo principas: pjezokeraminio elemento elektrodams padavus aukšto dažnio įtampą, pjezokeraminis elementas pradeda virpėti užduotu dažniu plokštumos 4 atžvilgiu. Tokiu būdu tarp trinties elemento 6 ir plokštumos 4 susidaro oro pagalvės efektas. Taigi suteikus judesio jėgą, galima keisti pavaros padėtį nejudamai įtvirtintos plokštumos atžvilgiu. Pavarai judesį atitinkama kryptimi suteikia linijinių inercinių vykdiklių sukuriama inercinė jėga. Suderinant inercinių vykdiklių valdymo poliškumą ir seką bei pjezokeraminio elemento aktyvavimo momentą, gali būti sukuriama žingsninis judesys dvejais laisvės laipsniais.

Lyginant su pirmąja ir antrąja pozicionavimo pavarų koncepcijomis, šios pavaros konstrukcija yra kompaktiškesnė. Pagrindinis privalumas – pozicionavimo judesiui suteikti naudojami du linijiniai inerciniai vykdikliai, kurių sukuriama ir pozicionuojamam objektui perduodamos vibracijos yra mažo dydžio ir pasireiškia tik pozicionavimo judesio metu. Taip pat, kadangi naudojami linijiniai  $90^\circ$  vienas kito atžvilgiu išdėstyti vykdikliai, galima tiksliau valdyti pavaros judesio kryptį. Verta paminėti, kad tokios pavaros valdymas nesudėtingas - atitinkamai komutuojant vykdiklio išvadais, remiantis nesudėtingu valdymo algoritmu galima formuoti valdymo signalus.

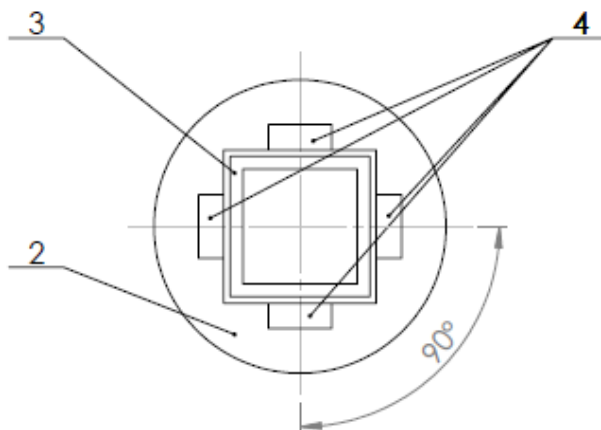
Aukščiau aptarti pirmojo tiriamojo darbo metu pasiūlyti ir apžvelgti trys valdomos trinties pozicionavimo sistemos mechaninės dalies realizavimo būdai. Atsižvelgus į pavarų konstrukcijų koncepcijų trūkumus, nuspręsta modeliuoti patobulintą ketvirtąją konstrukciją. Šioje pavaros koncepcijoje oro pagalvės efektas taip pat sukuriama plokštumos atžvilgiu virpančio pjezoelektrinio elemento. Tačiau įrenginio judesys užduotomis kryptimis inicijuojamas keturių linijinių inercinių vykdiklių.



**2.6 pav.** Valdomos trinties pavara, panaudojant keturis linijinius inercinius vykdiklius, pjūvis:

1. Žiedo formos pjezokeraminis elementas; 2. Korpuso elementas (dangtelis); 3. Tvirtinimo elementas (rėmelis); 4. Linijiniai inerciniai vykdikliai; 5. Manipuliuojama plokštuma (staliukas); 6. Guminė tarpinė; 7. Žiedo formos slydimo trinties elementas; 8. Nejudama glotni plokštuma

2.6 paveiksle pavaizduotas valdomos trinties dviejų laisvės laipsnių pavaros konstrukcijos modelio pjūvis. Įrenginį sudaro žiedo formos pjezokeraminis elementas, su jo horizontaliu apatiniu paviršiumi nejudamai sujungtas žiedo formos trinties elementas.

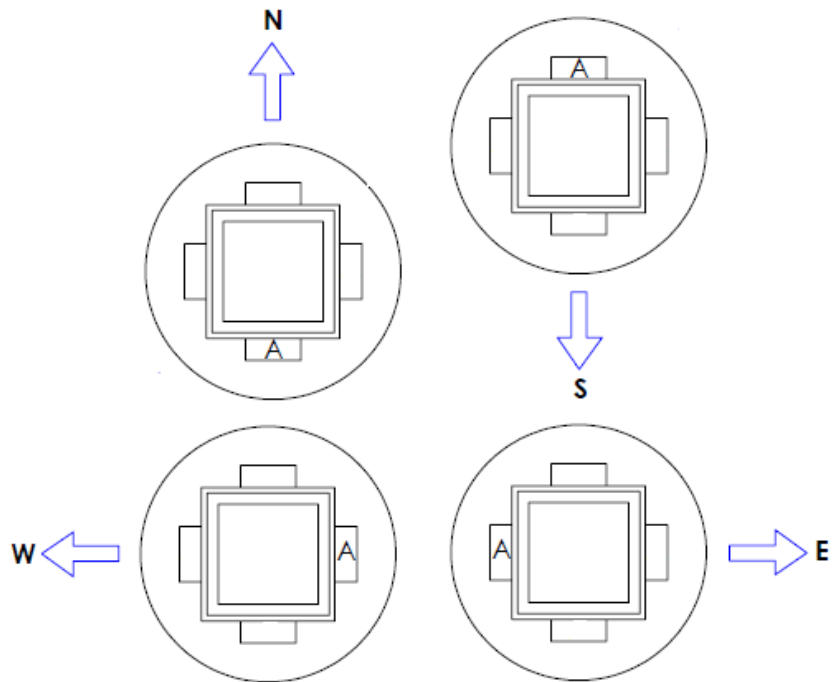


**2.7 pav.** Linijinių inercinių vykdiklių padėtis tarpusavio atžvilgiu, vaizdas iš viršaus: 2. Korpuso elementas (dangtelis); 3. Tvirtinimo elementas (rėmelis); 4. Linijiniai inerciniai vykdikliai

2.7 paveiksle pavaizduoti inerciniai linijiniai vykdikliai, išdėstyti  $90^\circ$  vienas kito atžvilgiu, tvirtinami ant rėmelio 4, kuri nejudamai sujungta su pjezokeraminio elemento viršutiniu paviršiumi. Manipuliuojamas stalelio paviršius taip pat nejudamai sujungtas su tvirtinimo elementu – rėmeliu 4.

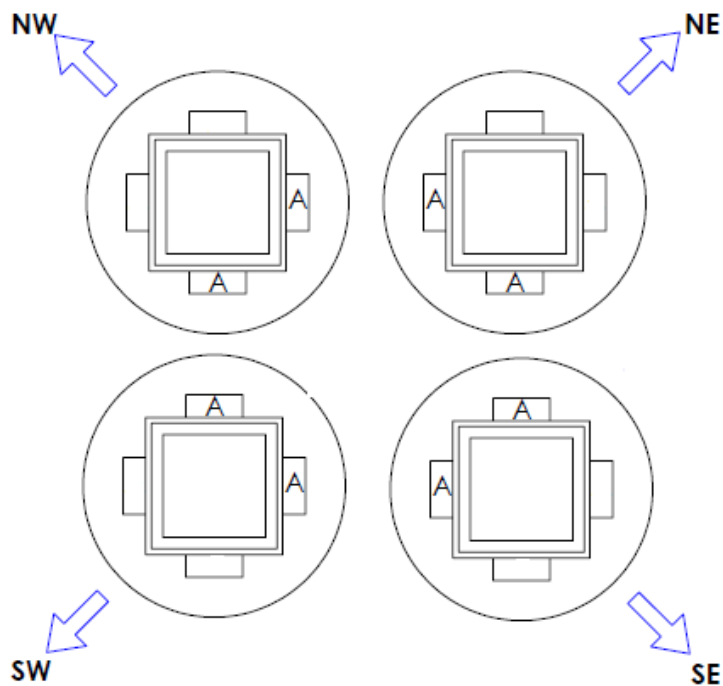
Veikimo principas: pjezokeraminio elemento elektrodams padavus aukšto dažnio įtampą, pjezokeraminis elementas pradeda virpėti užduotu dažniu glotnios nejudamos plokštumos 8 atžvilgiu. Tokiu būdu tarp trinties elemento 7 ir plokštumos 8 susidaro oro pagalvės efektas. Taigi suteikus judesio jėgą, galima keisti pavaros padėtį nejudamai įtvirtintos plokštumos atžvilgiu. Pavarai judesį atitinkama kryptimi suteikia keturių linijinių inercinių vykdiklių sukuriama inercijos jėgos. Suderinant inercinių vykdiklių valdymo seką bei pjezokeraminio elemento aktyvavimo momentą, gali būti sukuriamas žingsninis judesys dvejais laisvės laipsniais.

Lyginant su pirmajame tiriamajame projekte aprašytomis pozicionavimo pavarų koncepcijomis, šios pavaros konstrukcija yra kompaktiškesnė. Pagrindinis privalumas – pozicionavimo judesiui suteikti naudojami keturi linijiniai inerciniai vykdikliai, kurių sukuriama ir pozicionuojamam objektui perduodamos vibracijos yra mažo dydžio ir pasireiškia tik pozicionavimo judesio metu. Taip pat, kadangi naudojami keturi linijiniai  $90^\circ$  vienas kito atžvilgiu išdėstyti vykdikliai, galima tiksliau valdyti pavaros judesio kryptį. Tokia inercinių vykdiklių išdėstymo schema leidžia pasiekti geresnį svorio pasiskirstymą. Verta paminėti, kad tokios pavaros valdymas nesudėtingas - atitinkamai komutuojant vykdiklio išvadais bei remiantis valdymu algoritmu, galima formuoti valdymo signalus.



**2.8 pav.** Galimos pozicionavimo pavaros judėjimo kryptys, aktyvuojant atitinkamą linijinį inercinį vykdiklį ( A - žymi aktyvuotą vykdiklį)

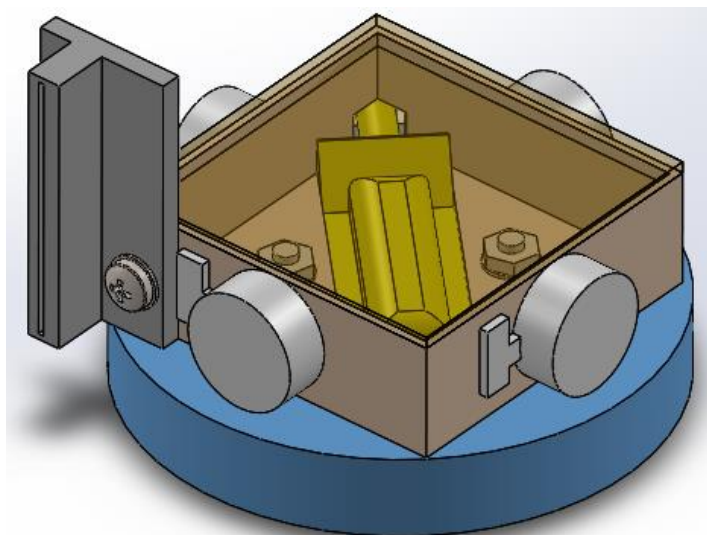
Žingsninio judesio sukūrimui užduota kryptimi, vienu momentu, reikiamu impulso pločiu, aktyvuojamas pjezokeraminis vykdiklis ir atitinkamas linijinis inercinis vykdiklis arba pora šių vykdiklių. Judesio krypties atvaizdavimui panaudoti kompase naudojami simboliai. Siekiant sukurti pavaros judesį įstriža kryptimi, reikia aktyvuoti atitinkamą inercinių vykdiklių porą.



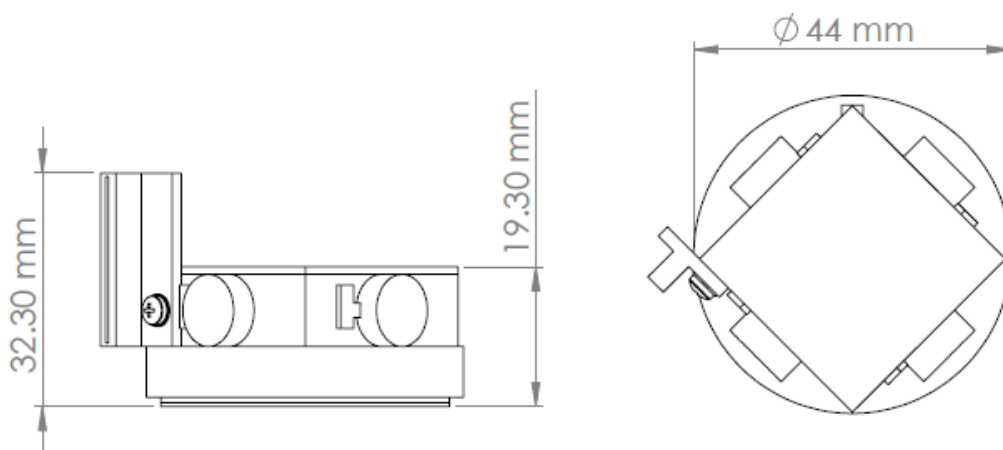
**2.9 pav.** Galimos pozicionavimo pavaros judėjimo kryptys, aktyvuojant atitinkamą linijinių inercinių vykdiklių porą ( A - žymi aktyvuotą vykdiklį)

Įvertinus galimas tokio tipo pavaros realizavimo galimybes nutarta sukonstruoti ir eksperimentiškai ištirti valdomos trinties pavaros modelį, kurio pagrindą sudaro pjezoelektrinis vykdiklis ir keturi linijiniai inerciniai vykdikliai.

Naudojant SolidWorks 2013 kompiuterinio projektavimo programinį paketą, buvo sumodeliuotas eksperimentinis valdomos trinties pozicionavimo pavaros modelis.



**2.10 pav.** Eksperimentinės valdomos trinties pavaros kompiuterinis modelis

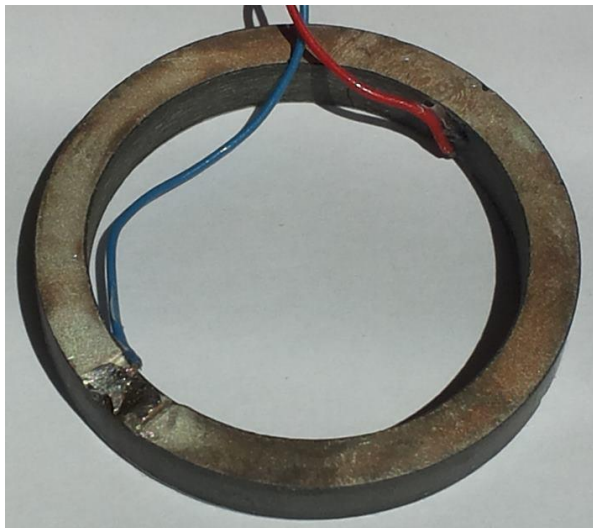


**2.11 pav.** Gabaritiniai matmenys

2.11 paveiksle pateikti valdomos trinties pozicionavimo pavaros gabaritiniai matmenys, vaizdas iš šono ir iš viršaus.

### 2.3. Pjezoelektrinio elemento rezonansinio dažnio nustatymo tyrimas

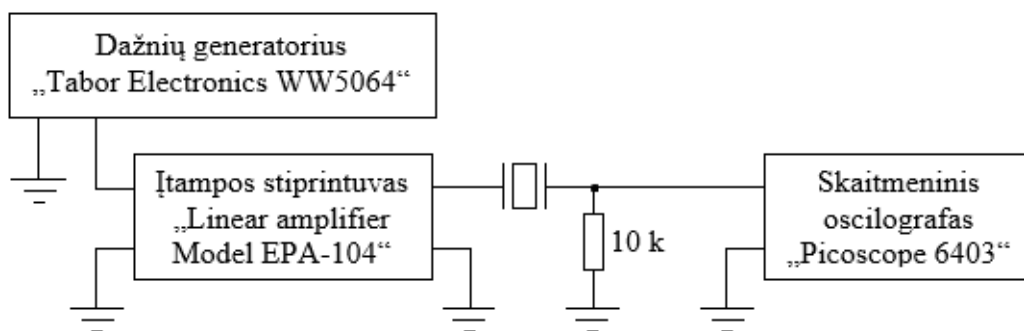
Oro pagalvės efektas sukuriamas glotnios plokštumos atžvilgiu virpančio pjezoelektrinio elemento. Rezonansinis dažnis yra svarbus parametras, siekiant nustatyti didžiausią virpesių amplitudę. Parinkto žiedo formos pjezoelektrinio elemento pjezokeramikos markė yra PZT – 4.



2.12 pav. Žiedo formos pjezokeraminis elementas

2.12 paveiksle pavaizduotas žiedo formos pjezokeraminis elementas. Siekiant neviršyti pjezokeramikos Kiuri temperatūros, jungiamieji laidai prie vykdiklio elektrodų buvo prilituoti naudojant reguliuojamos temperatūros litavimo stotelę. Parinkta 280 °C litavimo temperatūra.

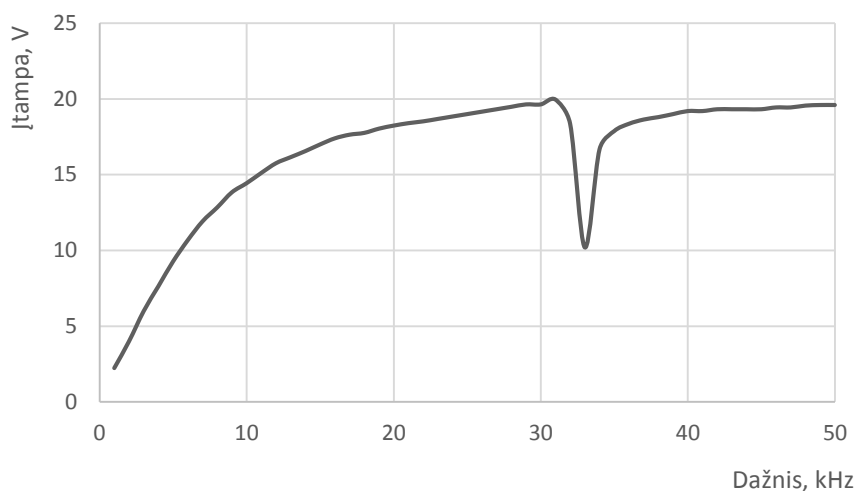
Pjezokeraminio elemento rezonansinis dažnis buvo nustatytas eksperimentiniu būdu. Siekiant sumažinti pašalinius veiksnius, sąlygojančius matavimų netikslumą, žiedo formos vykdiklio kiaurymė buvo perverta siūlu ir tokiu būdu pjezovykdiklis pakabintas ore.



2.13 pav. Rezonansinio dažnio nustatymo stendo įrenginių jungimo schema

2.13 paveiksle pavaizduota rezonansinio dažnio nustatymo stendo įrenginių jungimo schema. Atliekant pirminį eksperimentinį tyrimą, pjezoelektriniui elementui, atitinkamai 1 kHz žingsniais, buvo tiekama 1 – 50 kHz dažnio sinusoidės formos žadinimo įtampa. Matavimai atlikti naudojant skaitmeninį oscilografą, matuojant įtampos kritimą ties 10 kΩ varža.

Apibendrinus matavimų rezultatus buvo sudaryta žiedo formos pjezokeraminio vykdiklio charakteristika, pateikta 2.14 paveiksle.



**2.14 pav.** Pjezokeraminio elemento rezonansinio dažnio matavimo rezultatai: išmatuota vykdiklio charakteristika

Matavimų rezultatai rodo, kad pjezoelektrinio elemento rezonansinis dažnis yra 33 kHz. Verta paminėti, kad bandymo metu, atitinkamai žadinant pjezokeraminį elementą, pavyko sukurti oro pagalvės efektą tarp apatinio pjezokeraminio elemento elektrodo ir nejudamai įvirtintos glotnaus stiklo plokštumos. Bandymo metu nustatėme, kad efektyviausias pjezovykdiklio žadinimo dažnis yra 31,4 kHz. Atsižvelgus į eksperimentinio tyrimo metu išmatuotą rezonansinio dažnį ir oro pagalvei sudaryti reikalingą dažnį, yra akivaizdus šių verčių nesutapimas. To priežastis – skirtingi pjezokeraminio elemento įtvirtinimo parametrai. Pirminio eksperimentinio tyrimo metu pjezovykdiklis buvo pervertas per kiaurymę ir pakabintas ore. Tačiau kuomet buvo sukurtas oro pagalvės efektas, pjezokeraminio elemento apatinis paviršius kontaktavo su nejudama glotnia plokštuma ir tuo metu pasireiškė tam tikro dydžio trinties jėga. Verta paminėti, kad bandymo metu nustatyta, kad tam tikrą laiką pjezoelektrinį vykdiklį žadinant didesne nei 75 V amplitude, pjezokeramika pradeda kaisti. Siekiant to išvengti, nuspręsta, naudoti 70 V pjezoelektrinio vykdiklio žadinimo signalo įtampos amplitudę.

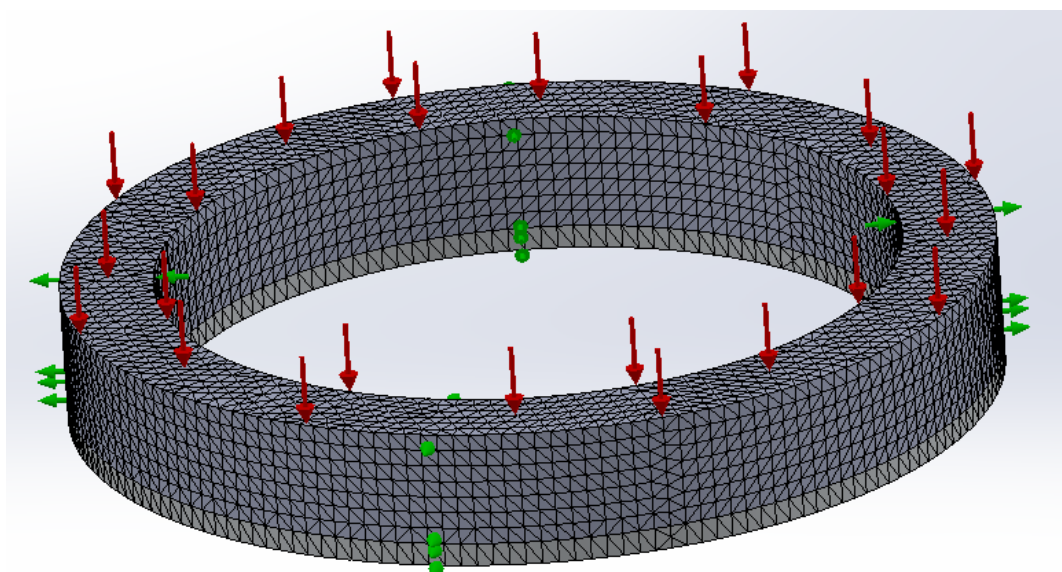
#### 2.4. Pjezoelektrinio elemento virpesių modų analizė

Atlikus eksperimentinį tyrimą buvo nustatytas pjezovykdiklio rezonansinis dažnis. Taigi turėdami reikiamus pjezovykdiklio parametrus, galime nustatyti pjezoelemento virpesių modas, kurios sąlygoja oro pagalvės efekto susidarymą.

Virpesių modų analizei atlikti naudojamas SolidWorks 2013 programinis paketas. Virpesių tyrime analizuojamas žiedo formos pjezoelektrinis elementas, nejudamai sujungtas su žiedo formos trinties elementu. Trinties elementas naudojamas užtikrinti tam, kad nebūtų pažeistas pjezoelektrinio elemento elektrodo paviršius.

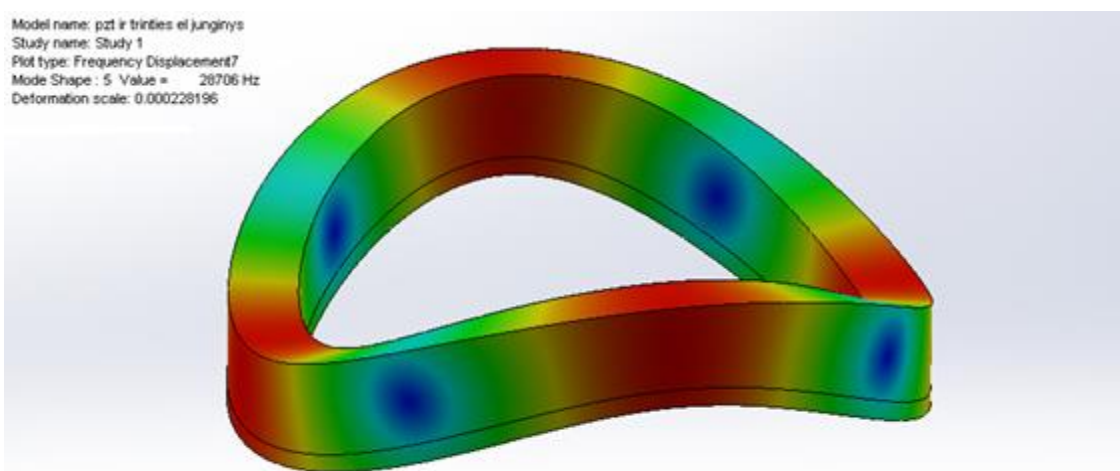


Sudarytas surinkimo modelis buvo suvaržytas atitinkamais įtvirtinimais ir nurodytos reikiamos apkrovos.



**2.15 pav.** Pjezokeramikos ir trinties elemento modeliui sudarytas baiginių elementų tinklelis, nurodyti reikiami suvaržymai

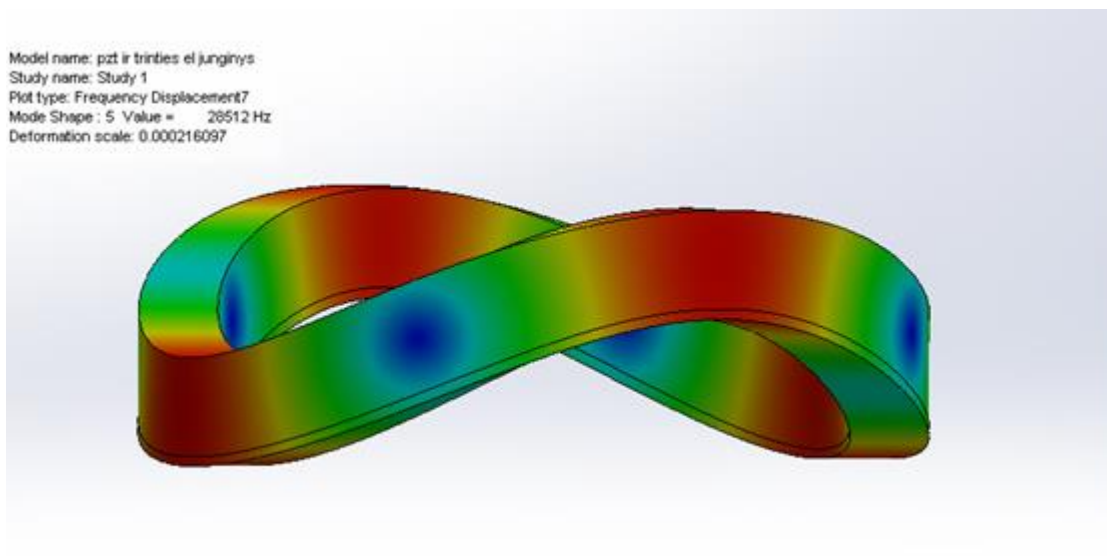
Virpesių analizės atskaitos parametru, nurodytas pirminio eksperimentinio tyrimo metu nustatytas pjezokeramikos rezonansinis dažnis: 33kHz. Parinkta pjezokeramikos medžiaga – keramika „Ceramic porcelain“. Trinties elemento medžiaga – aliuminis „AISI-6061-T6“. Virpesių modų analizė buvo atliekama esant skirtingiems trinties elemento storiams: 1 mm ir 0,5 mm.



**2.16 pav.** Pjezokeramikos ir 1 mm storio trinties elemento junginio virpesių moda

2.16 paveiksle pavaizduota pjezokeramikos su 1 mm storio trinties elementu virpesių moda. Pateikta virpesių moda susidaro esat 28706 Hz žadinimo dažniui. Pavaizduota virpesių forma yra tinkama oro pagalvės efekto tarp trinties elemento ir glotnios plokštumos sudarymui.

Siekiant palyginti skirtingas konfigūracijas, atlikome skaičiavimus, parenkant 0,5 mm trinties elemento storį.



**2.17 pav.** Pjezokeramikos ir 0,5 mm storio trinties elemento junginio virpesių moda

2.17 paveiksle pavaizduota pjezokeramikos su 0,5 mm storio trinties elementu virpesių moda. Pateikta virpesių moda susidaro esant 28512 Hz žadinimo dažniui. Pavaizduota virpesių forma yra tinkama oro pagalvės efekto tarp trinties elemento ir glotnios plokštumos sudarymui.

Palyginę virpesių modas esant 1 mm storio trinties elementui (2.16 paveikslas) ir esant 0,5 mm storio trinties elementui (2.17 paveikslas), galime teigti, kad abiem nurodytais atvejais tokios pačios formos virpesių modos susidaro esant nedideliam žadinimo dažnių skirtumui. Esant 1mm trinties elemento storiui ties 28706 Hz, atitinkamai esant 0,5 mm storiui, ties 28512 Hz.

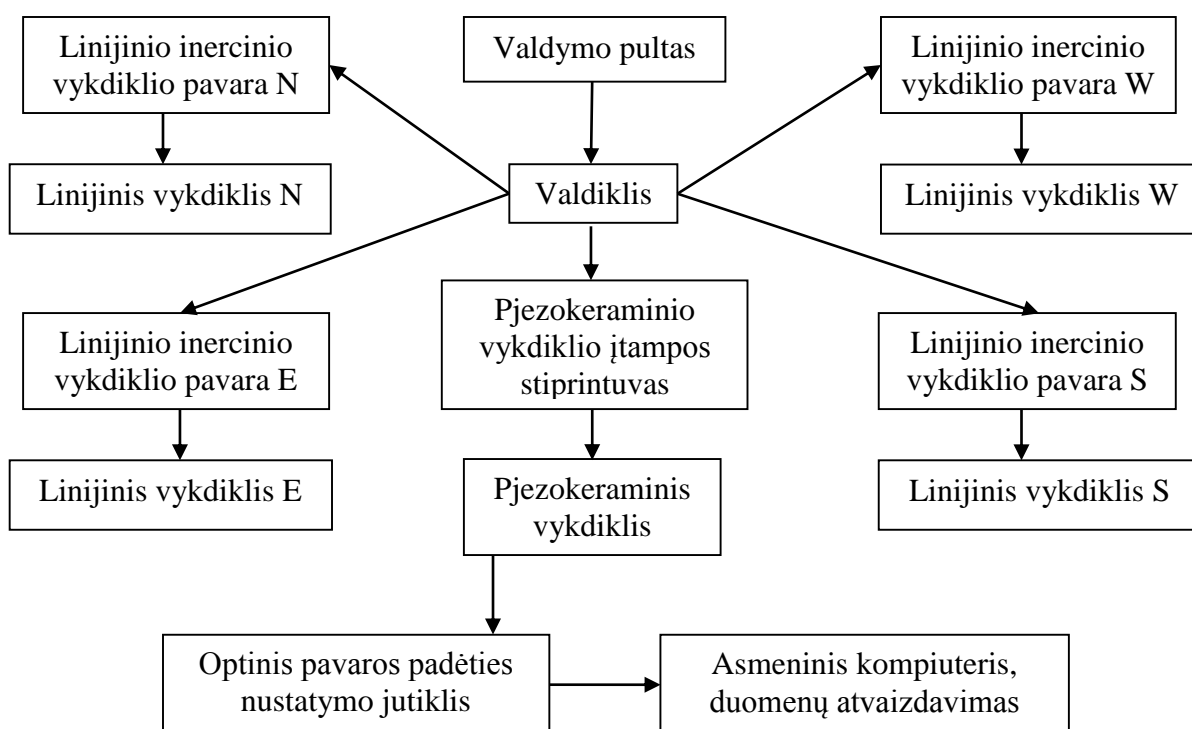
Atliekant skaičiavimus, taip pat buvo gautos atitinkamos virpesių modų formos, esant kelis kartus aukštesniam žadinimo dažniui, lyginant su pjezoelektrinio elemento rezonansinio dažniu. Eksperimentinio tyrimo metu nustatytas pjezoelektrinio elemento rezonansinis dažnis siekia 33 kHz. Taigi šiuo atveju nebuvo atsižvelgta į aukštesnio dažnio srityse pasireiškiančias virpesių modas.

Kadangi abiem anksčiau nurodytais atvejais virpesių modų forma yra tinkama oro pagalvės efektui tarp trinties elemento ir glotnios plokštumos sudarymui, galima pasirinkti 1 mm arba 0,5 mm storio trinties elementą. Vis dėlto nuspręsta naudoti 0,5 mm storio trinties elementą, dėl gaunamo mažesnio slopinimo efekto. Kadangi šiuo atveju reikiama virpesių moda susidaro, esant žemesniam žadinimo dažniui. Taip pat užtikrinamas mažesnis visos konstrukcijos svoris.

### 3. VALDYMO SISTEMOS SUDARYMAS

#### 3.1. Valdymo sistemos aprašymas

Valdomos trinties pozicionavimo pavarą aktyvavimo metu, dėl pjezoelektrinio vykdiklio sukuriama oro pagalvės efekto ir linijinių inercinių vykdiklių sukuriama inercijos jėgos juda atitinkama užduota kryptimi. Judesio kryptis parenkama naudojant valdymo pultą. Pavaros valdymui turi būti naudojamas programuojamas loginis valdiklis, kadangi reikalingas vykdiklių valdymo signalų formavimas. Pjezokeraminiam vykdikliui reikalingas įtampos stiprintuvas, linijiniams inerciniams vykdikliams – atitinkamos dažninės pavaros. Oro pagalvės efektas sukuriamas ant glotnios stiklo plokštumos, vadinasi reikalingas bekontaktis pavaros pozicionavimo padėties nustatymo jutiklis. Įvertinus konstrukcinius parametrus, nuspręsta naudoti optinį padėties nustatymo jutiklį, kurio registruojami duomenys apdorojami programiškai ir grafiškai atvaizduojami asmeninio kompiuterio ekrane. Taigi, kad būtų galima apibrėžti objektus suteikiančius duomenis apie valdomo proceso eigą, sudaroma valdymo sistemos struktūrinė schema.

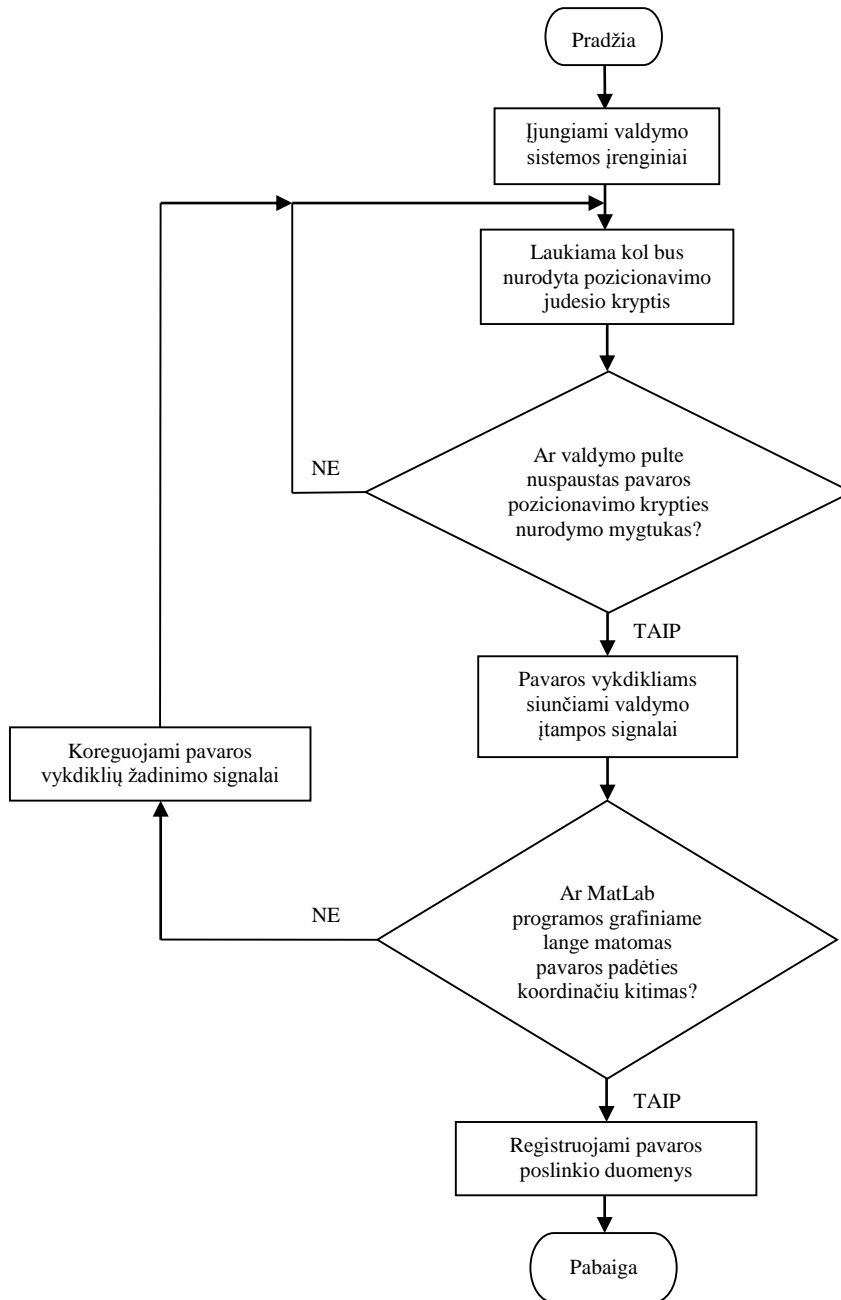


3.1 pav. Valdymo sistemos struktūrinė schema

Nutarta sudaryti valdymo sistemą be grįžtamojo ryšio, kadangi kuriamas pavaros modelis yra eksperimentinis ir nėra pritaikytas konkrečiai pozicionavimo sistemai.

### 3.2. Valdymo sistemos algoritmo sudarymas

Atsižvelgus į projektuojamos sistemos funkcinis parametrus sudaromas valdymo sistemos algoritmas.



3.2 pav. Valdomos trinties pozicionavimo pavaros valdymo sistemos algoritmas

Kaip buvo minėta anksčiau, nutarta sudaryti valdymo sistemą be grįžtamojo ryšio, kadangi kuriama eksperimentinė pvara. Valdymo pultu užduodamas reikiamos krypties judesio nurodymo signalas siunčiamas valdikliui. Valdiklis, pagal sukompiliuotą programą, vykdo atitinkamą veiksmų seką, kuri priklausomai nuo užduotos judesio krypties suformuoja vykdklių žadinimo signalus. Šie aktyvavimo signalai paduodami vienam arba porai linijinių inercinių vykdklių pavaros kanalų. Dažninės pavaros sustiprintas žadinimo signalas paduodamas linijiniams vykdkliams. Tokiu būdu

sugeneruojama reikiamos krypties inercinė jėga pozicionavimo judesiui sukurti. Atitinkamai reikiamu metu kitas žadinimo signalas paduodamas pjezoelektrinio vykdiklio įtampos stiprintuvui, kuris sustiprintą signalą tiekia pjezoelektriniam vykdikliui. Dėl sudaromo oro pagalvės efekto sumažinama tarp kontaktuojančių paviršių pasireiškianti trintis. Taigi, linijinių inercinių vykdiklių generuojamos inercijos jėgos pakanka tam, kad užduota kryptimi būtų inicijuojamas pozicionavimo judesys. Pavarai atliekant judesį, pozicionavimo padėtį nustato optinis padėties jutiklis. Naudojant USB sąsają, padėties nustatymo signalas perduodamas asmeniniam kompiuteriui. Naudojant MatLab programinį paketą ir sukompiliuotą programos kodą, jutiklio registruojami duomenys yra apdorojami ir pateikiami grafiniame lange. Stebint grafiniame lange atvaizduojamų pozicionavimo padėtį nurodančių koordinačių verčių kitimą, vertinama pavaros judesio kryptis ir poslinkis. Eksperimentinio tyrimo metu, koreguojant mikrovaldiklio programos kodą, buvo keičiami pavaros vykdiklių žadinimo signalų parametrai.

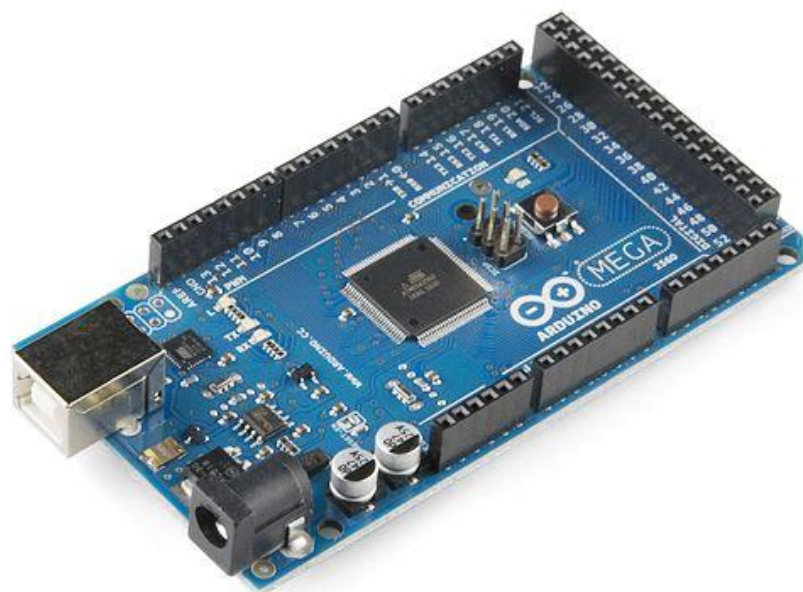
### **3.3. Valdymo įtaisų ir sistemos elementų parinkimas, projektavimas ir surinkimas**

Projektuojamam eksperimentiniam valdomos trinties pozicionavimo pavaros modeliui reikalingi pagrindiniai elementai:

- Programuojamas valdiklis;
- Valdymo pultas;
- Keturi linijiniai inerciniai vykdikliai;
- Keturių kanalų linijinių inercinių vykdiklių dažninė pavara;
- Optinis jutiklis pavaros padėties registravimui;
- Pjezoelektrinis vykdiklis;
- Pjezoelektrinio vykdiklio įtampos stiprintuvas.

#### **3.3.1. Pasirinkto valdiklio parametrai**

Projektuojamas eksperimentinis valdomos trinties pozicionavimo pavaros modelis, taigi nuspręsta naudoti universalų programuojamą įterptinį kompiuterį Arduino Mega 2560, kurio pagrindą sudaro Atmega 2560 mikrovaldiklis.



**3.3 pav.** Įterptinis kompiuteris Arduino Mega 2560 [5]

3.3 paveiksle pavaizduotas įterptinis kompiuteris Arduino Mega 2560. Tokio tipo valdiklis buvo pasirinktas, kadangi projektuojamai pavarai reikalinga atitinkama valdymo greitimeika bei valdymo signalų išvadų skaičius. Mikrovaldiklio programos kodas pateiktas **priede nr.1**.

**1 lentelė.** Pagrindiniai Arduino Mega 2560 parametrai [5]

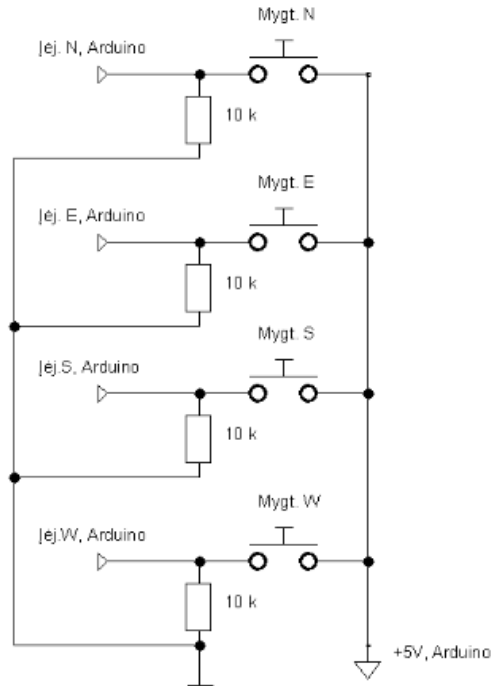
Mikrovaldiklis	Atmega 2560
Taktinis dažnis	16 MHz
Darbinė įtampa	6-20 V
Skaitmeniniai įėjimai/išėjimai	54
PWM išėjimai	14
Analoginiai įėjimai	16
Nuolatinė srovė įėjime/išėjime	40 mA
Flash atmintis	256 KB, iš kurių 8KB įkroviklio (Bootloader)
SDRAM	8 KB
EEPROM	4 KB

### 3.3.2. Valdymo pultas

Žingsninio judesio sukūrimui užduota kryptimi, vienu momentu, reikiamu įtampos impulsu, turi būti aktyvuojamas pjezokeraminis vykdiklis ir atitinkamas linijinis inercinis vykdiklis arba pora šių vykdiklių. Krypties atvaizdavimo patogumui, panaudoti kompase naudojami simboliai. Galimos judesio kryptys anksčiau aptartos poskyryje **2.3. Mechaninės konstrukcijos projektavimas**.

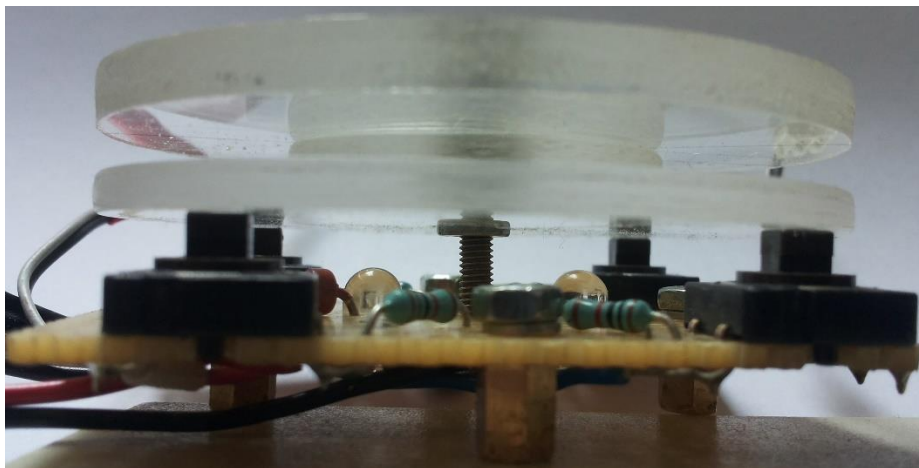
Kadangi valdomos trinties pozicionavimo pavaros judesys gali būti užduodamas aštuoniomis pasirinktomis kryptimis, turi būti naudojamas patogus pozicionavimo krypties valdymo pultas. Nuspręsta naudoti keturis krypties nurodymo mygtukus, tarpusavyje mechaniškai susietus apvaliu disku.

Sudarome pozicionavimo krypties valdymo pulto elektrinę schemą.



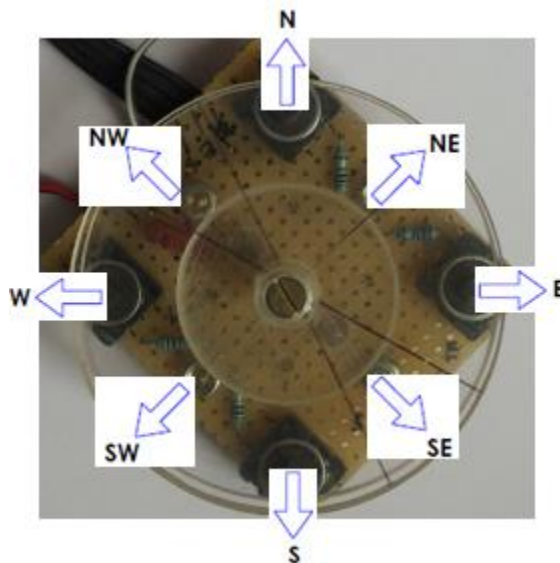
**3.4 pav.** Pavaros judesio krypties valdymo pulto elektrinė schema

3.4 paveiksle pavaizduota krypties valdymo pulto elektrinė schema. Krypties nurodymui naudojami keturi valdiklio skaitmeniniai įėjimai. Galimos mygtuko būsenos: nuspaustas atitinka loginį 1 ( 5V įtampa) , nenuspaustas – loginį 0. Siekiant užtikrinti, kad nenuspaudus mygtuko kiekvienas valdiklio įėjimas būtų registruojamas kaip loginis 0, naudojame 10 kΩ rezistorius, sujungtus valdiklio neigiamu poliumi. Tokiu būdu išvengiame taip vadinamo loginio nulio „dreifo“.



**3.5 pav.** Surinkto valdymo pulto mygtukų modulio vaizdas iš šono

3.5 ir 3.6 paveiksluose pateikti surinkto valdymo pulto mygtukų modulio vaizdai iš šono ir viršaus.



**3.6 pav.** Surinkto valdymo pulto mygtukų modulio vaizdas iš viršaus, pavaizduotos galimos pozicionavimo judesio nurodymo kryptys

Naudojami keturi krypties nurodymo mygtukai, tarpusavyje mechaniškai susieti apvaliu disku. Tokia valdymo pulto konstrukcija leidžia patogiai nurodyti reikiamą pavaros pozicionavimo kryptį. Nuspaudus disko paviršiaus plotus esančius virš mygtukų, galimos kryptys yra N, E, S, W. Atitinkamai spaudžiant disko plotus tarp gretimai išdėstytų mygtukų, aktyvuojama atitinkama mygtukų pora ir gali būti nurodytos kryptys: NE, SE, SW, NW. Galimos mygtukų komutavimo poros buvo nurodytos sudarant valdiklio programos kodą.

### 3.3.3. Linijiniai inerciniai vykdikliai

Pavaros judesys užduotomis kryptimis inicijuojamas keturių linijinių inercinių vykdiklių. Taigi parenkami keturi 1037S1 C1C9 inerciniai vykdikliai.

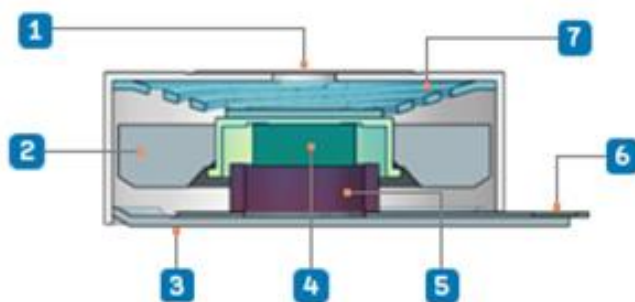


**3.7 pav.** Linijinis inercinis vykdiklis 1037S1 C1C9 [6]

3.7 paveiksle pavaizduotas linijinis inercinis vykdiklis 1037S1 C1C9. Jo konstrukciją sudaro judanti masė sujungta su pastoviu magnetu, pritvirtintu ant spyruoklės ir apvijų ritė. Apvijoms tiekiant

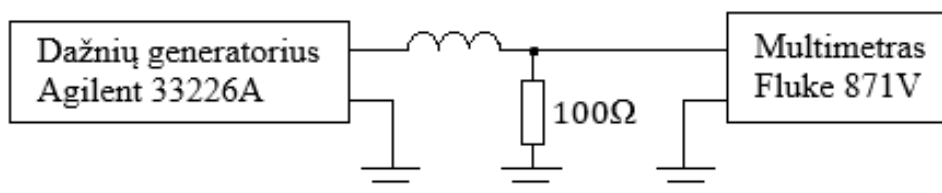


atitinkamą įtampą, generuojamas magnetinis laukas, kuris sąveikauja su pastovaus magneto magnetiniu lauku ir priverčia jį judėti. Prie spyruoklės pritvirtinta masė sąlygoja rezonansinį efektą.



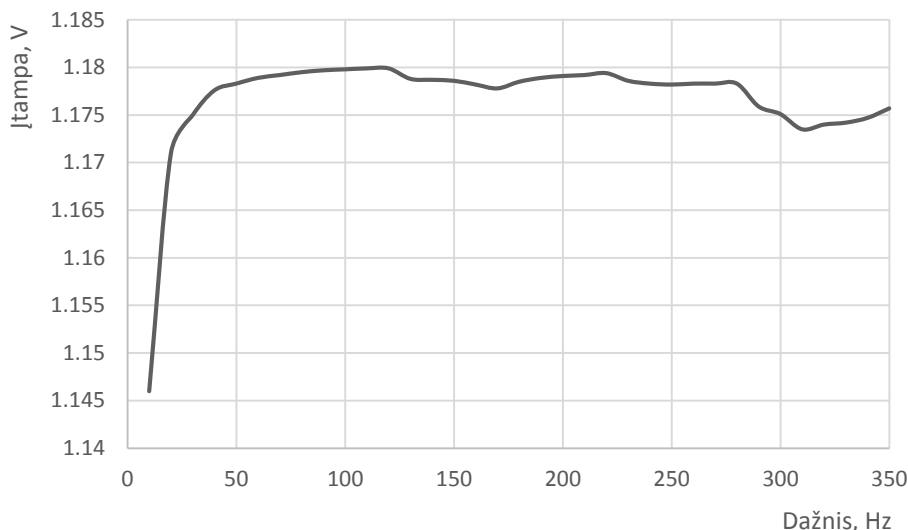
**3.8 pav.** Linijinio inercinio vykdiklio konstrukcija, pjūvis: 1. Korpuso dangtelis; 2. Masė; 3. Korpuso pagrindas; 4. Magnetas; 5. Apvijų ritė; 6. Elektriniai kontaktai; 7. Spyruoklė [7]

Šis linijinis vykdiklis turi atitinkamą savąjį rezonansinį dažnį, kuriam esant gaunamas didžiausias vykdiklio efektyvumas. Taigi, norint pasiekti didžiausią sukuriamos inercijos jėgos amplitudę, būtina eksperimentiškai nustatyti šio vykdiklio rezonansinį dažnį. Linijinio inercinio vykdiklio tvirtinimo kiaurymė buvo perverta siūlu ir tokiu būdu vykdiklis pakabintas ore, siekiant sumažinti pašalinius veiksnius, sąlygojančius matavimų netikslumą.



**3.8 pav.** Rezonansinio dažnio nustatymo stendo įrenginių jungimo schema

3.8 paveiksle pavaizduota vykdiklio rezonansinio dažnio nustatymo stendo įrenginių jungimo schema. Atliekant pirminį eksperimentinį tyrimą, linijiniui inerciniui vykdikliui, atitinkamai 10 Hz žingsniais, buvo tiekama 10 – 350 Hz dažnio stačiakampio formos 3,0 V amplitudės žadinimo įtampa ir matuojamas įtampos kritimas ties 100 Ω varža. Apibendrinus matavimų rezultatus buvo sudaryta linijinio inercinio vykdiklio charakteristika, pateikta 3.9 paveiksle.



**3.9 pav.** Linijinio inercinio vykdiklio rezonansinio dažnio matavimo rezultatai: išmatuota vykdiklio charakteristika

Eksperimentinio rezonansinio dažnio tyrimo rezultatai rodo, kad linijinio inercinio vykdiklio rezonansinis dažnis yra 310 Hz. Taigi vykdikliai bus žadinami naudojant būtent tokio dažnio stačiakampio formos impulsus.

### 3.3.4. Linijinių inercinių vykdiklių dažninės pavaros

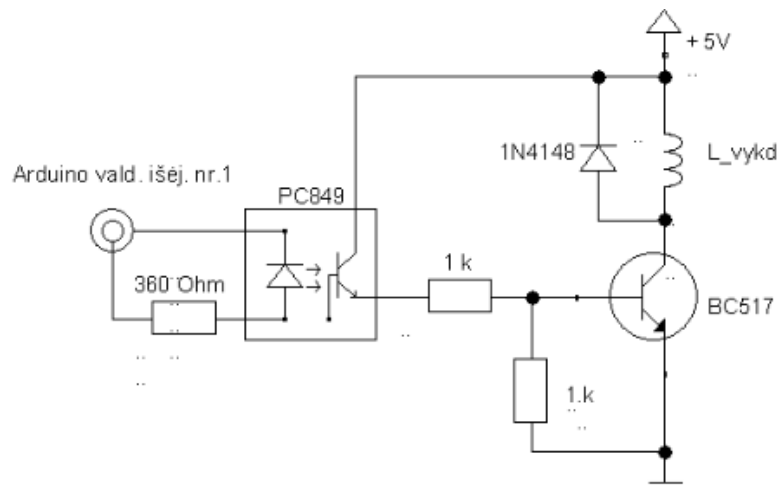
Tokio tipo linijiniams inerciniams vykdikliams turi būti tiekama atitinkamo dažnio stačiakampio formos įtampa. Formuojant tam tikro impulso pločio moduliacijos signalo paketus sukuriama inercijos jėga, kuri panaudojama pavaros slenkamojo judesio sudarymui. Atlikus eksperimentinį tyrimą buvo nustatytas linijinio inercinio vykdiklio rezonansinis dažnis, kuris yra 310 Hz. Taigi turėdami reikiamus šio vykdiklio parametrus, galime sudaryti dažninių pavarų elektrines schemas.

Vykdiklio apvijos varža yra  $R_V = 25\Omega$ , maitinimo šaltinio įtampa:  $U_V = 5V$ . Taigi galime apskaičiuoti didžiausią srovę, kuri gali tekėti vykdiklio apvija:

$$I_V = \frac{U_V}{R_V} = \frac{5}{25} = 0,2A \quad (3.1)$$

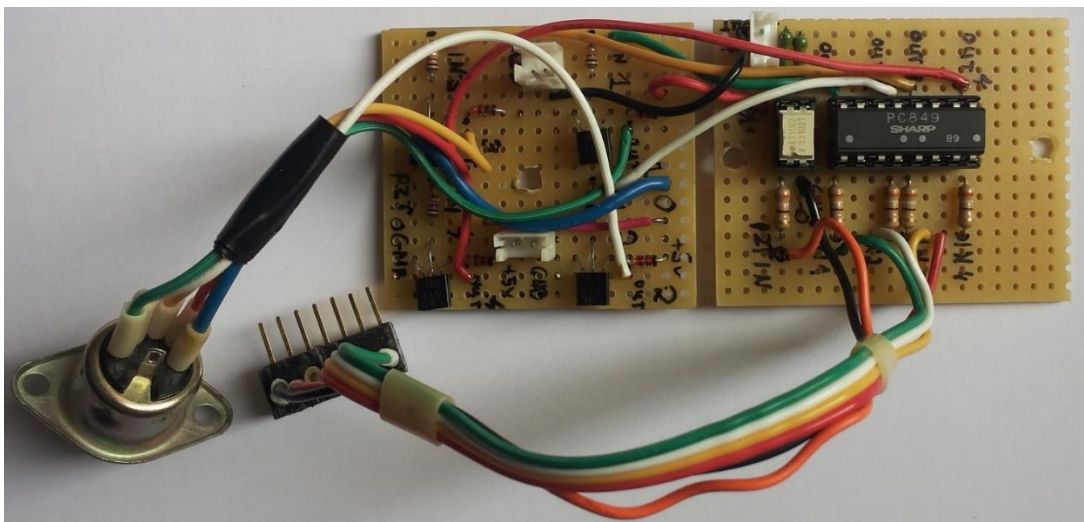
Kadangi žinome didžiausią vykdiklio naudojamą srovę, valdiklio užduoto valdymo signalo stiprinimui parenkame npn tipo BC517 tranzistorių, kurio maksimali darbinė srovė siekia 1A. Siekiant apsaugoti tranzistorių nuo linijinės pavaros apvijoje indukuojamos saviindukcijos įtampos, apsaugai parenkame diodą 1N4148. Taip pat siekiant galvaniskai atskirti valdiklio išvadus nuo linijinių vykdiklių dažninių pavarų, naudojame foto tranzistorinę optoporą. Kadangi reikalingi keturios vykdiklių dažninės pavaros, parenkame keturių kanalų optoporą PC849 [9, 10, 11].

Sudarome elektrinę schemą, kurioje pateikiamas vieno linijinio inercinio vykdiklio dažninės pavaros fragmentas. Elektrinės schemos braižymui naudojome programinį paketą TinyCad.



**3.10 pav.** Vieno linijinio inercinio vykdiklio kanalo dažninės pavaros elektrinė schema

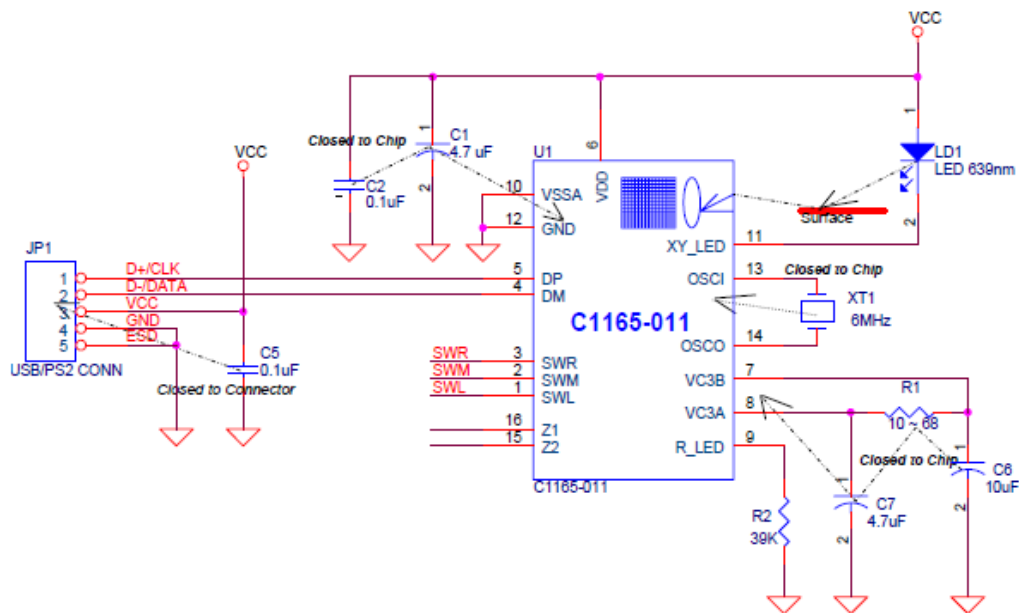
3.10 paveiksle pavaizduotas vieno kanalo inercinio vykdiklio dažninės pavaros elektrinės schemos fragmentas. Iš valdiklio Arduino Mega padavus reikiamo dažnio ir impulso pločio moduliacijos signalo paketą optoporai, atitinkamai keičiamas foto tranzistoriaus laidumas (rakto režimas). Optoporos foto tranzistorius atlieka pirmos pakopos tranzistoriaus funkciją ir valdo BC517 galios tranzistoriaus bazės-emiterio srovės dydį. Tokiu būdu keičiamas BC517 tranzistoriaus kolektoriaus-emiterio srovės dydis ir atitinkamai aktyvuojamas linijinis inercinis vykdiklis. Kadangi naudojami keturi inerciniai vykdikliai, buvo surinktas keturių kanalų dažninės pavaros modulis.



**3.11 pav.** Surinktas keturių kanalų dažninės linijinių inercinių vykdiklių pavaros modulis

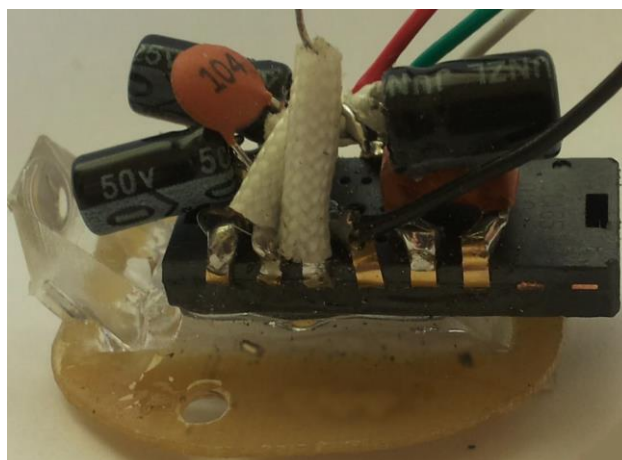
### 3.3.5. Pozicionavimo padėties nustatymo jutiklis

Valdomos trinties pozicionavimo pavara aktyvavimo metu, dėl oro pagalvės efekto ir linijinių inercinių vykdiklių sukuriama inercijos jėgos juda atitinkama užduota kryptimi. Oro pagalvės efektas sukuriama ant glotnios stiklo plokštumos, vadinasi reikalingas bekontaktis pavara pozicionavimo padėties nustatymo jutiklis. Įvertinus konstrukcinius parametrus, nuspręsta naudoti optinį padėties nustatymo jutiklį C1165-011 ir modifikuotą elektrinį USB sąsajos grandyną, kuris naudojamas asmeninio kompiuterio pelei.



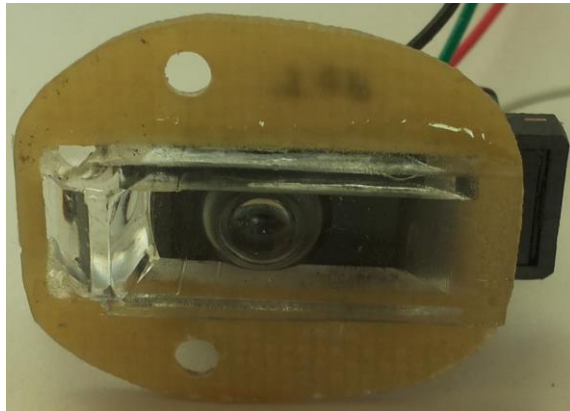
3.12 pav. Modifikuota C1165-011 optinio jutiklio USB sąsajos elektrinė schema [12]

3.12 paveiksle pateikta modifikuota C1165-011 optinio jutiklio elektrinė schema. Optinis jutiklis panaudotas iš kompiuterio pelės. Kadangi reikalinga tik optinio jutiklio elektrinė grandinė, buvo atsisakyta dalis elektrinių komponentų.



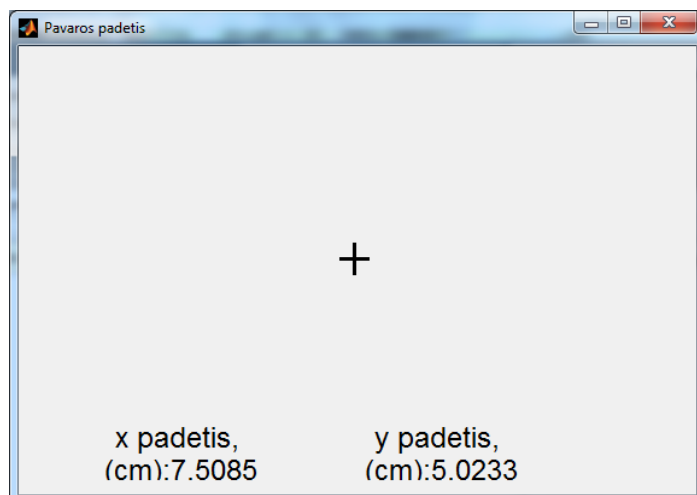
3.13 pav. Optinio jutiklio modulis, vaizdas iš šono

Siekiant užtikrinti kompaktišką konstrukciją, buvo modifikuotas optinio jutiklio lęšis. Taip pat patogiam jutiklio pritvirtinimui ir atstumui iki glotnaus stiklo plokštumos reguliavimui buvo pagaminta tvirtinimo plokštelė. Tvirtinimo plokštelės medžiaga parinktas stiklotekstolitas, kadangi būtina užtikrinti kuo mažesnę konstrukcijos svorį. Siekiant užtikrinti sklandų optinio jutiklio veikimą, kitą glotnaus stiklo plokštumos pusę dengia baltas popierius. Optinis jutiklis, lęšis ir tvirtinimo plokštelė neišardomai sujungti panaudojant epoksidinę dervą. 3.13 ir 3.14 paveiksluose pavaizduotas surinktas optinio jutiklio modulis.



**3.14 pav.** Optinio jutiklio modulis, vaizdas iš apačios

Naudojant USB sąsaja, pozicionavimo pavaros padėties optinio jutiklio registruojami duomenis perduodami asmeniniam kompiuteriui. Duomenų apdorojimui ir atvaizdavimui naudojamas MathWorks MatLab 2012b programinis paketas. Duomenų apdorojimo programa sukurta remiantis dr. Wei Shang (New Brunswick Universitetas) pateiktu pavyzdžiu [13].



**3.15 pav.** Pavaros padėties registravimo MatLab programos grafinis langas

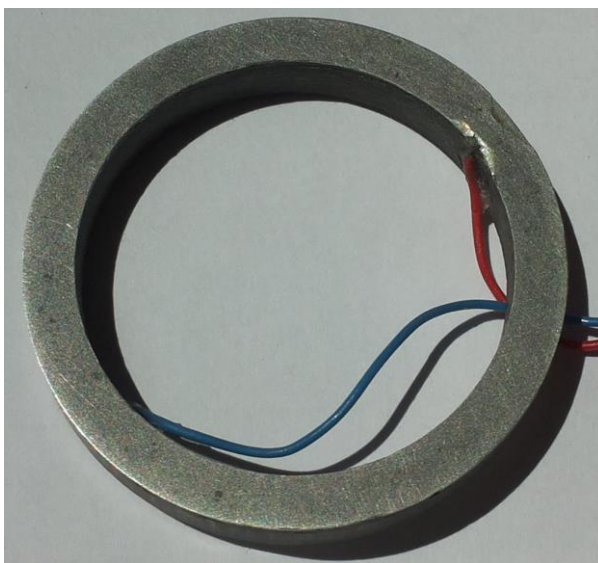
3.15 paveiksle pateiktas pavaros padėties registravimo MatLab programos grafinis langas. Grafinio lango matmenys atitinka glotnios pozicionavimo plokštumos matmenis (15 x 10 cm).

Pavaros padėtis atvaizduojama xy plokštumoje, x ir y ašių vertės pateikiamos nuo 0 koordinatinių plokštumos atskaitos taško. Galima didžiausia optinio jutiklio padėties registravimo skyra yra  $1\mu m$  (arba 0,001cm).

### 3.3.8. Pjezoelektrinis vykdiklis

Siekiant apsaugoti pjezoelektrinio elemento elektrodo paviršių, būtina naudoti trinties elementą. Aliuminio skardos trinties elemento storio parinkimas anksčiau aptartas skyrelyje **2.4 Pjezoelektrinio elemento virpesių modų analizė.**

Trinties elemento nejudamam sujungimui su pjezoelektriniu vykdikliu buvo panaudota epoksidinė derva, kuri užtikrina stiprią adheziją. Iš aliuminio skardos suformuoto trinties elemento ir apatinis pjezoelektrinio vykdiklio paviršiai buvo nuriebalinti ir padengti plonu epoksidinės dervos sluoksniu. Sujungus derva padengtus paviršius, klijuojami elementai padėti ant glotnios plokštumos ir siekiant užtikrinti tolygų adhezijos kontakto pasiskirstymo plotą, buvo suslėgti – apkrauti 5kg svoriu kol sukietės epoksidinė derva. Nuo gauto vykdiklio ir trinties elemento junginio briaunų buvo mechaniškai pašalintas dervos perteklius. Taip pat siekiant užtikrinti paviršiaus glotnumą, trinties elemento paviršius buvo nušlifluotas naudojant P2000 grūdėtumo šlifavimo popierių, kuris buvo įtvirtintas ant glotnios plokštės paviršiaus.

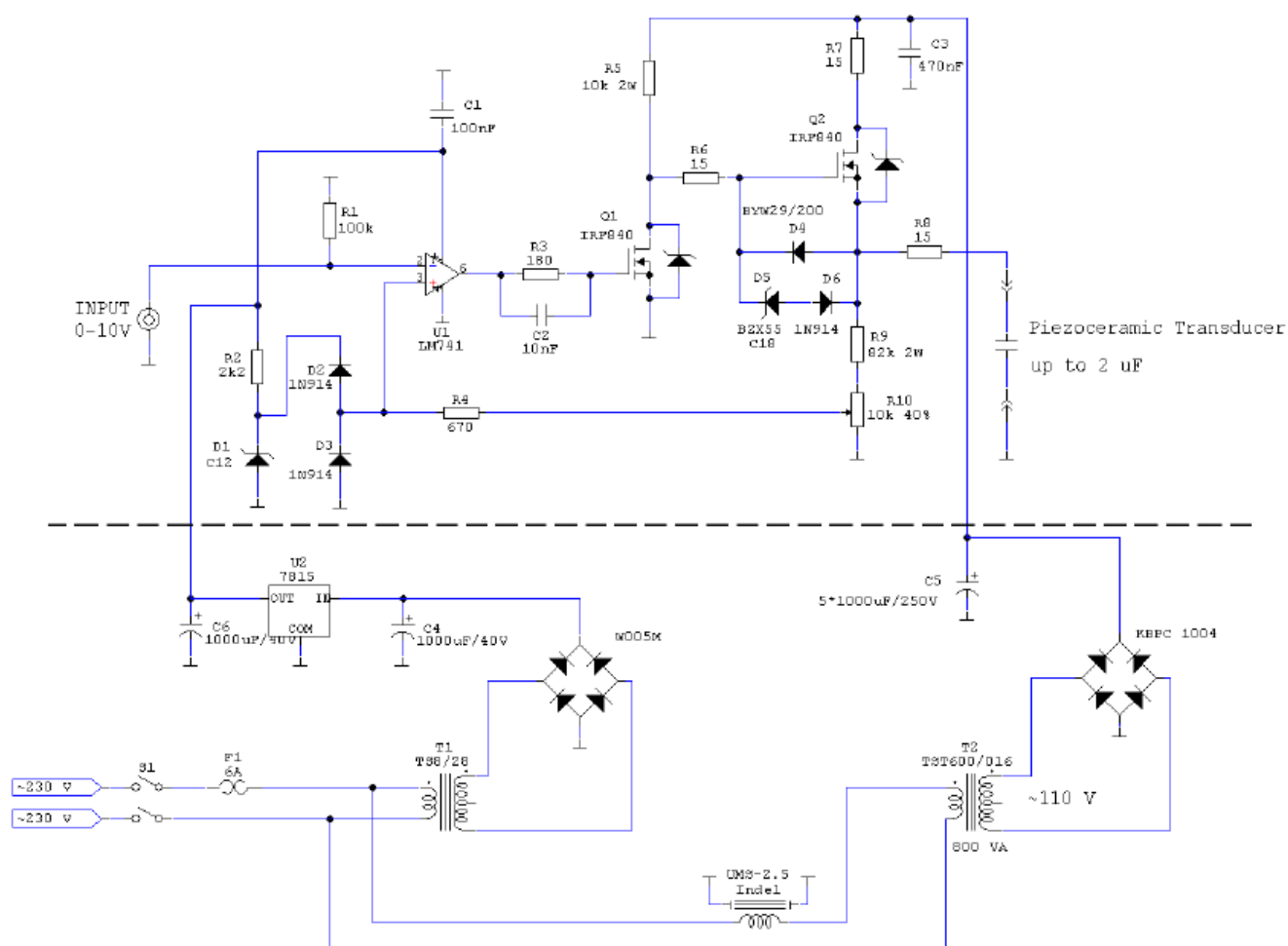


**3.16 pav.** Pjezoelektrinis vykdiklis su priklijuotu trinties elementu

3.16 paveiksle pavaizduotas pjezoelektrinis vykdiklis su priklijuotu trinties elementu. Anksčiau, **2.3 skyriuje** aprašytame eksperimentinio rezonansinio dažnio tyrimo metu, nustatėme, kad efektyviausias pjezovykdiklio žadinimo dažnis yra 31,4 kHz. Taigi siekiant valdyti oro pagalvės efekto sudarymo momentą, nuspręsta pjezoelektrinį vykdiklį aktyvuoti atitinkamai komutuojant valdiklio formuojamais 31,4 kHz dažnio stačiakampio formos įtampos signalo impulsais.

### 3.3.8. Pjezoelektrinio vykdiklio įtampos stiprintuvas

Norint užtikrinti sklandų pavaros žingsninį judesį, pjezoelektrinis vykdiklis, turi būti aktyvuojamas valdiklio formuojamais 31,4 kHz dažnio stačiakampio formos įtampos signalo impulsais. Pradinėje konstrukcijoje buvo naudojamas valdiklio Arduino Mega užduotas žadinimo signalas. Tačiau oscilografu stebint šį aukšto dažnio signalą buvo nustatyta, kad pasireiškia tam tikri signalo formą iškraipantys trikdžiai. Kadangi naudojamas pastovus žadinimo signalo dažnis, siekiant išvengti trikdžių, nuspręsta pagaminti atskirą stačiakampio formos žadinimo signalo multivibratorių, kurio generuojamo signalą komutuoja valdiklis. Formuojamus valdymo signalus būtina sustiprinti, kadangi vykdiklio aktyvavimui reikalinga 70 V žadinimo signalo įtampos amplitudė. Pasirinkto įtampos stiprintuvo elektrinės schemos autoriai: S. Jakiela, J. Zaslona ir J.A. Michalski, Lenkijos mokslų akademija, 2012m. [14].

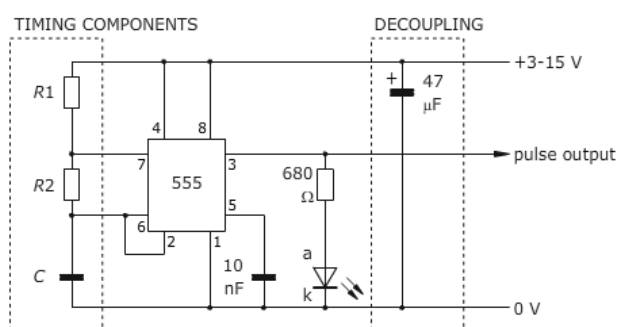


3.17 pav. Pjezoelektrinio vykdiklio įtampos stiprintuvo elektrinė schema [14]

3.17 paveiksle pavaizduota pjezoelektrinio vykdiklio įtampos stiprintuvo elektrinė schema. Įtampos stiprintuvą sudaro pradinis valdymo signalo stiprintuvas, dvi galios tranzistorių pakopos ir maitinimo šaltinis. Pradinio signalo stiprinimo funkciją atlieka operacinis stiprintuvas LM 741 su atviru grįžtamojo ryšio kontūru. Stiprintuvo įėjime paduodamas stačiakampio formos 10 V amplitudės

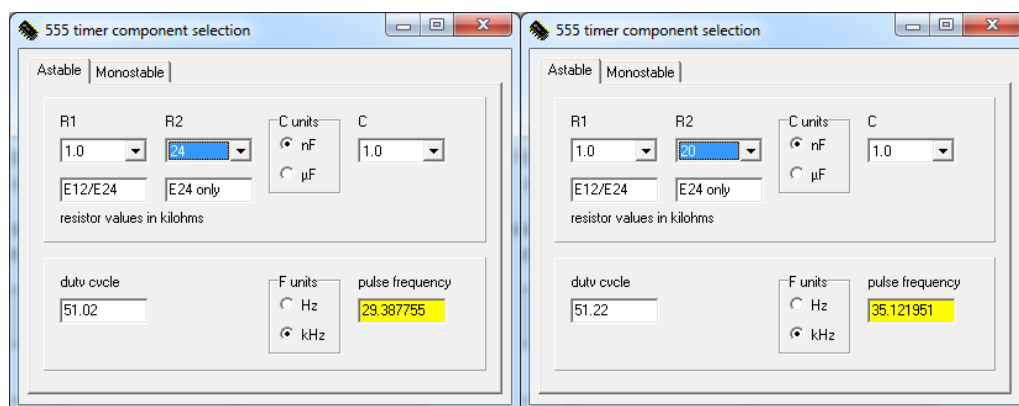
žadinimo signalas. Paduotas signalas yra sustiprinamas ir naudojamas galios tranzistorių IRF 840 komutavimui „rakto“ režimu. Tokiu būdu sustiprinti 155 V amplitudės stačiakampio formos įtampos impulsai yra tiekiami pjezoelektriniui vykdikliui, kuris atitinkamai virpa užduotu signalo dažniu. [14]

Atsižvelgę į valdomos trinties pozicionavimo pavarai naudojamo pjezoelektrinio elektrinio vykdklio rezonansinio dažnio matavimo ir bandymų rezultatus, nusprendėme vykdkliui tiekti 70 V amplitudės įtampos žadinimo signalą. Parinktas stačiakampio formos žadinimo signalo dažnis yra 31,4 kHz, taigi norint užtikrinti norint užtikrinti sklandų stiprintuvo darbą, esant aukštam darbiniam dažniui, buvo nuspręsta naudoti operacinį stiprintuvą AD 8065. Kaip buvo minėta anksčiau, siekiant išvengti trikdžių, nuspręsta pagaminti atskirą stačiakampio formos žadinimo signalo generatorių - multivibratorių, kurio generuojamo signalą komutuoja valdiklis [17, 18].



**3.18 pav.** Universali tipinė NE555 stačiakampių impulsų generatoriaus elektrinė schema [15]

Stačiakampio formos impulsų generavimui nusprendėme naudoti NE 555 mikroschemą. 3.18 paveiksle pateikta Dr. W.D. Phillips, Doctronics, sudaryta universali stačiakampių impulsų generatoriaus elektrinė schema. Priklausomai nuo pasirinkto reikiamo signalo dažnio, turi būti parinktos  $R_1$ ,  $R_2$  rezistorių varžos bei kondensatoriaus  $C$  talpa. Reikalingas žadinimo signalo dažnis yra 31,4 kHz. Taigi, reikiamus elektrinių komponentų parametrus apskaičiavome Dr. W.D. Phillips sudaryta skaičiuoklės programa [15].

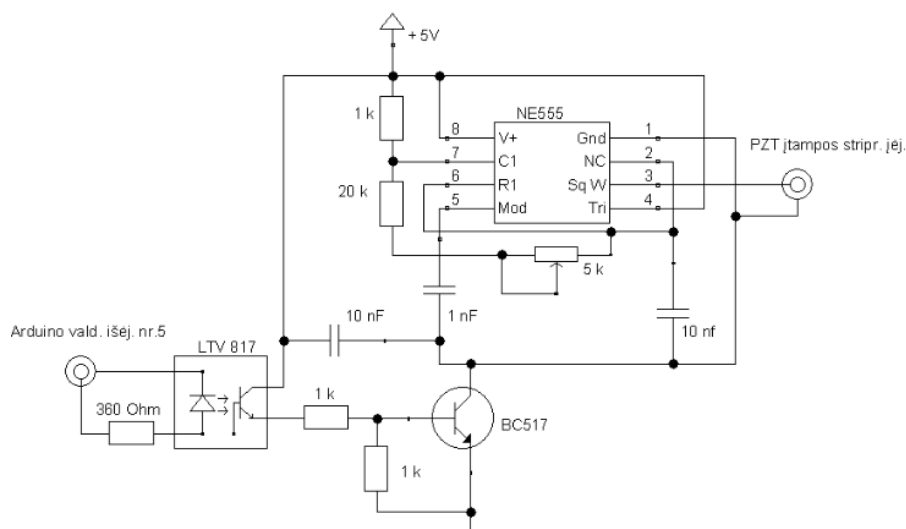


**3.19 pav.** Dr. W.D. Phillips, „Doctronics“ sudarytos NE 555 skaičiuoklės programiniai langai, apskaičiuoti impulsų generatoriaus elektrinės grandinės komponentų parametrai.



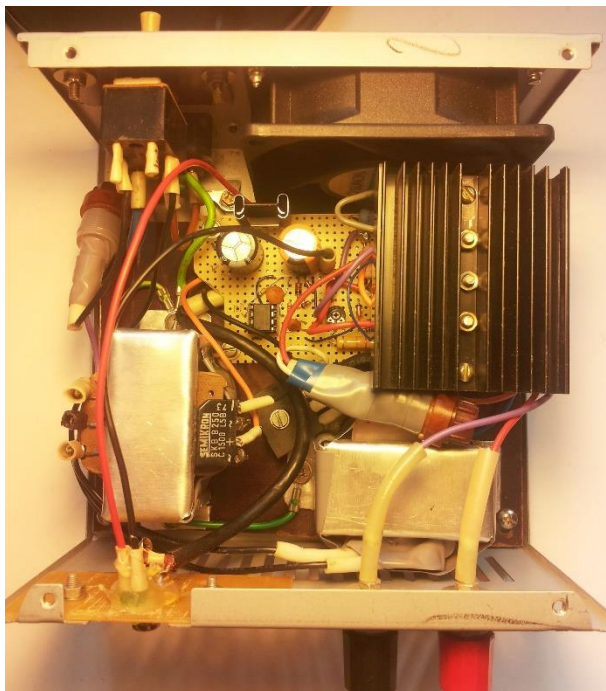
3.19 paveiksle pateikti apskaičiuoti impulsų generatoriaus elektrinės grandinės komponentų parametrai. Kaip minėta anksčiau, reikalingas žadinimo signalo dažnis yra 31,4 kHz. Nustatyta, kad naudojant galimas pastovias rezistorių varžas  $R_2 = 24 \text{ k}\Omega$  arba  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ , galimi artimiausi signalo dažniai yra atitinkamai  $f_1 = 29,38 \text{ kHz}$  ir  $f_2 = 35,12 \text{ kHz}$ . Taigi nuspręsta naudoti  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$  varžą, nuosekliai sujungtą su  $5 \text{ k}\Omega$  paderinamu rezistoriumi, kad būtų sudaryta galimybė pakoreguoti generuojamo signalo dažnį: kiek įmanoma tiksliau priartinti prie 31,4 kHz.

Apskaičiavę reikiamus impulsų generatoriaus elektrinių komponentų parametrus, sudarėme valdiklio komutuojamo stačiakampio formos impulsų generatoriaus elektrinę schemą.



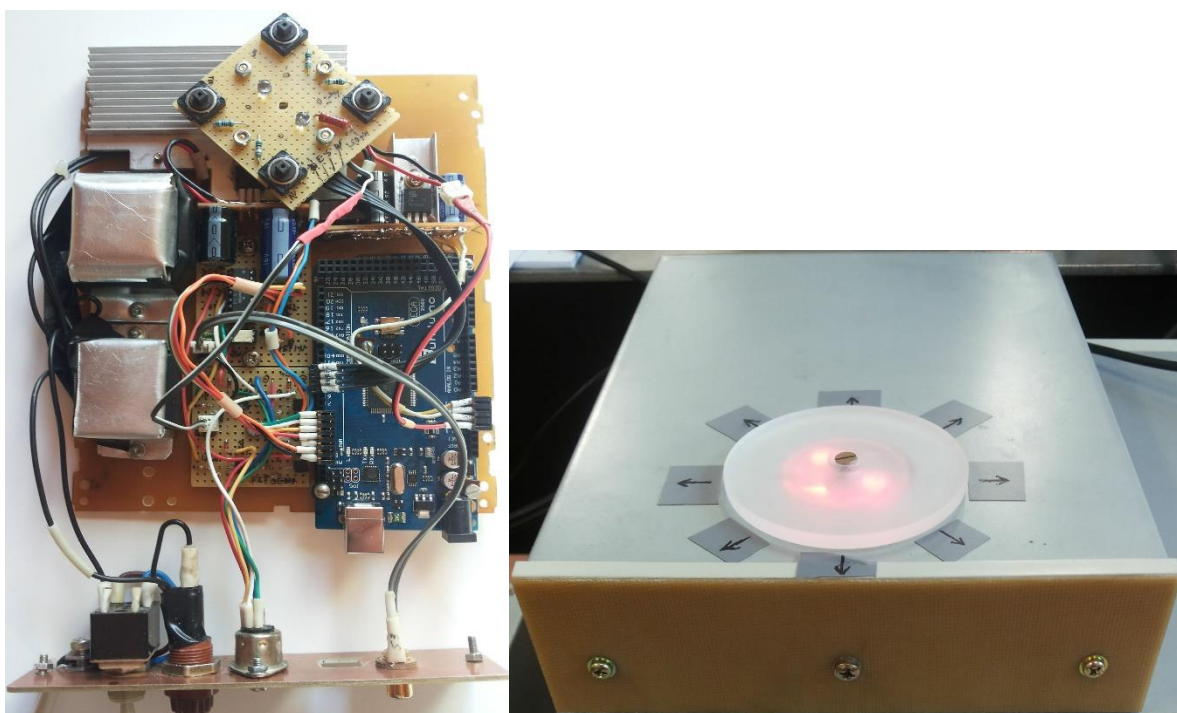
**3.20 pav.** Sudaryta valdiklio komutuojamo impulsų generatoriaus elektrinė schema

3.20 paveiksle pateikta sudaryta valdiklio komutuojamo stačiakampio formos impulsų generatoriaus elektrinė schema. Impulsų generatoriaus pagrindą sudaro mikroschema NE 555. Taip pat, naudojama optopora, kadangi reikia galvaniskai atskirti valdiklio išvadus nuo signalo generatoriaus ir įtampos stiprintuvo elektrinės grandinės. Iš valdiklio Arduino Mega padavus reikiamos trukmės signalo impulsą optoporai, atitinkamai keičiamas foto tranzistoriaus laidumas („rakto“ režimas). Optoporos foto tranzistorius atlieka pirmos pakopos tranzistoriaus funkciją ir valdo BC 517 galios tranzistoriaus bazės-emiterio srovės dydį. Tokiu būdu keičiamas BC 517 tranzistoriaus kolektoriaus-emiterio laidumas ir atitinkamai įjungiamas ir išjungiamas impulsų generatorius. Taigi, pjezoelektrinio vykdiklio stiprintuvui žingsniškai tiekiamas 31,4 kHz stačiakampio formos signalas. Įtampos stiprintuvas įėjimo grandinei paduodamą žadinimo signalą sustiprina ir jį tiekia pjezoelektriniui vykdikliui. Tokiu būdu, atitinkamai sudarant valdiklio programą, reikiamu momentu galima sukurti oro pagalvės efektą tarp pjezoelektrinio vykdiklio ir glotnios plokštumos paviršių [9, 19].



**3.21 pav.** Surinktas pjezoelektrinio vykdiklio įtampos stiprintuvas

3.21 paveiksle pavaizduotas į korpusą sumontuotas pjezoelektrinio įtampos vykdiklio stiprintuvas. Siekiant, kad visi valdymo sistemos elementai būtų kuo kompaktiškiau surinkti, valdiklį, valdymo pultą ir keturių kanalų inercinių vykdiklių dažninę pavarą sumontavome į vieną korpusą.

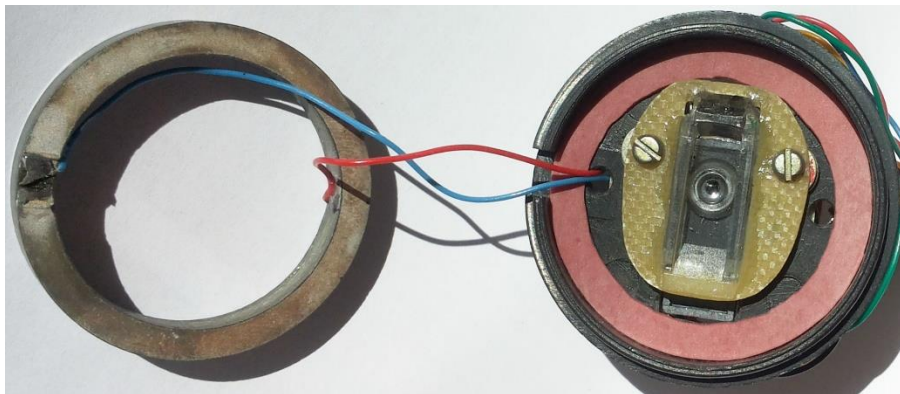


**3.22 pav.** Valdiklis, valdymo pultas ir linijinių vykdiklių pavaros sumontuotos į vieną korpusą

## 4. EKSPERIMENTINIO MODELIO TYRIMAS

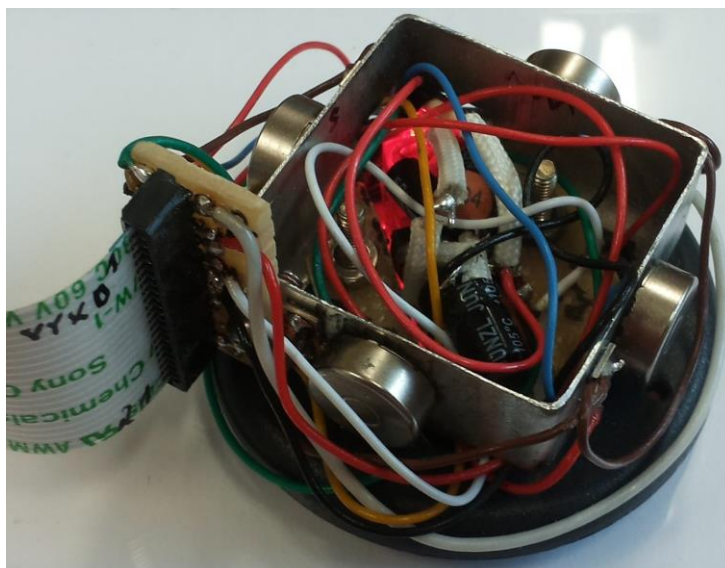
### 4.1. Pavaros modelio gamyba

Parinkus ir pagaminus reikiamus valdymo sistemos komponentus buvo surinktas eksperimentinės pavaros modelis. Ant apatinio dangtelio paviršiaus priklijuota guminė tarpinė virpesiams slopinti ir naudojant silikono klijus, pritvirtintas pjezoelektrinis vykdiklis.



4.1 pav. Eksperimentinės pavaros surinkimas, vaizdas iš apačios

Linijiniai inerciniai vykdikliai buvo priklijuoti prie plieninio rėmelio. Prie plastikinio dangtelio dviem 2mm varžtais pritvirtintas optinis jutiklis ir plieninis rėmelis su linijiniais vykdikliais. Prie rėmelio 2mm varžtu pritvirtintas lanksčios jungiamųjų laidų juostos šleifo lizdas. Prie šio lizdo išvadų buvo prilituoti vykdiklių bei optinio jutiklio jungiamieji laidai.



4.2 pav. Surinkta valdomos trinties pozicionavimo pvara

4.2 paveiksle pavaizduota surinkta valdomos trinties pozicionavimo pvara. Optinio jutiklio ir užduoties vykdiklių valdymo signalams perduoti nutarta naudoti lanksčia laidų juosta – šleifą. Kadangi, lyginant su atskirais vienos gyslos jungiamaisiais laidais, naudojama laidų juosta užtikrina mažesnę įtaką pavaros judesio charakteristikoms. Surinkto pavaros modelio svoris: 44 gramai.

Siekiant tinkamai pozicionuoti naudojamą glotnaus stiklo plokštumą, buvo sukonstruotas reguliuojamo lygio glotnios plokštumos pagrindas, pavaizduotas 4.3 paveiksle.

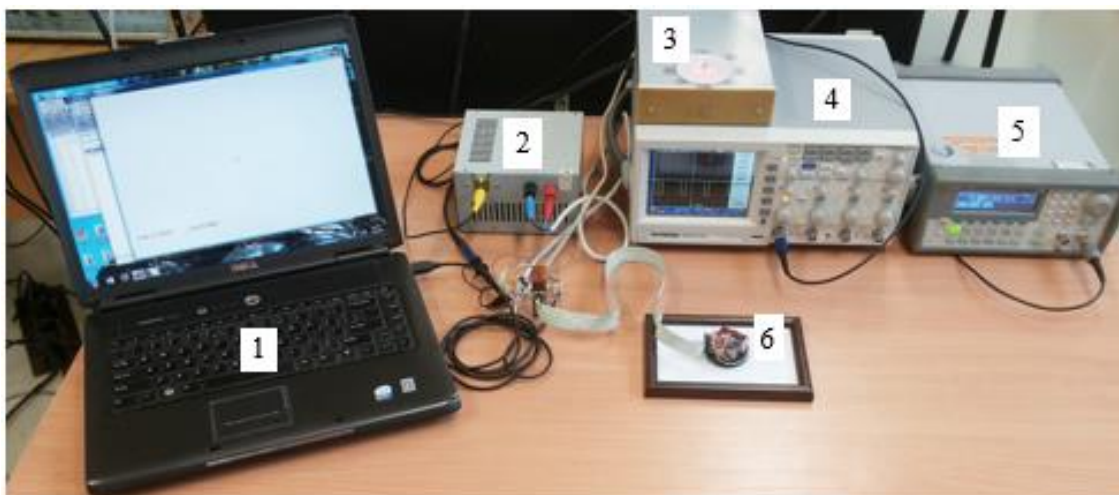


**4.3 pav.** Reguliuojamo lygio glotnios plokštumos pagrindas

Plokštumos pagrindą sudaro 2 cm storio medienos drožlių plokštė, kurios apatinėje dalyje pritvirtintos trys reguliuojamo ilgio kojelės. Ant plokštės viršutinės dalies pritvirtinta glotnaus stiklo atraiža (15x10cm) ir pavaros jungiamųjų laidų juostos stovėlis. Tarp stiklo ir plokštės paviršių įtvirtintas baltas popierius užtikrina sklandų optinio padėties jutiklio veikimą. Atliekant eksperimentus plokštumos lygis buvo nustatomas naudojant gulsčiuką, atitinkamai padėtą ant glotnaus stiklo plokštumos. Lygio reguliavimas atliktas keičiant trijų reguliuojamų pagrindo kojelių ilgį.

#### **4.2. Eksperimentinio modelio tyrimas**

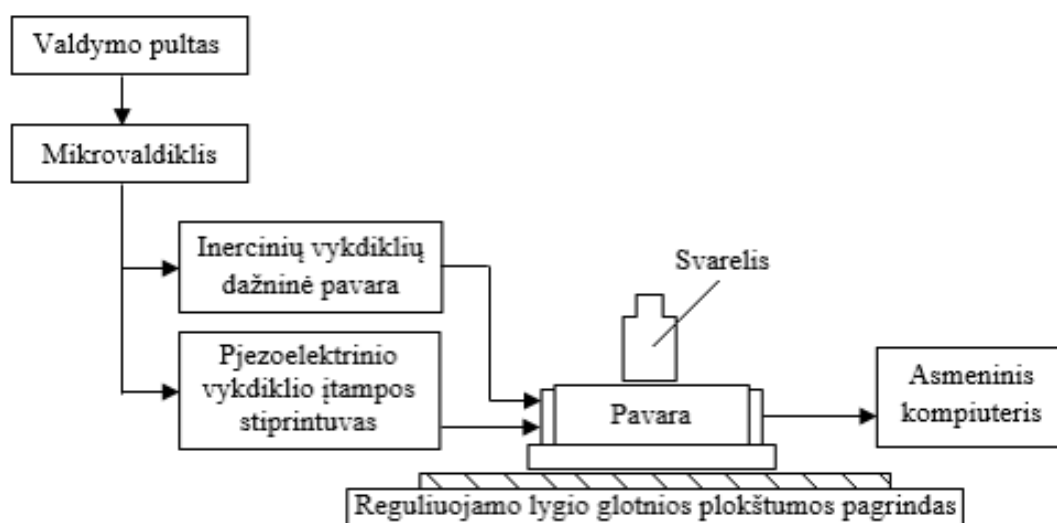
Sukonstravus eksperimentinį pavaros modelį bei valdymo sistemos modulius, buvo atlikta valdymo signalų patikra oscilografu. Buvo stebima skirtingo dažnio bei amplitudės valdymo signalų įtaką pavaros pozicionavimo judesio sudarymui.



**4.4 pav.** Valdymo signalų patikrai naudota įranga

4.4 paveiksle pavaizduota valdymo signalų patikrai naudota įranga: 1 – asmeninis kompiuteris grafiniam pozicionavimo judesio atvaizdavimui, 2 – pjezoelektrinio vykdiklio įtampos stiprintuvas, 3 – valdymo pultas, 4 – skaitmeninis oscilografas GW Instek GDS – 2104, 5 – dažnių generatorius Agilent 33220A, 6 – eksperimentinis valdomos trinties pavaros modelis. Atliekant valdymo signalų patikrą oscilografu buvo pastebėta, kad pjezoelektriniui vykdikliui iš valdiklio Arduino Mega 2560 tiekiamas 31,4 kHz žadinimo signalas turi signalo formą iškraipančių trikdžių. Taigi siekiant išvengti trikdžių, nuspręsta pjezoelektrinio vykdiklio žadinimo signalui sukonstruoti atskirą stačiakampio formos žadinimo signalo generatorių (**aprašyta skyrelyje 3.3.8. Pjezoelektrinio vykdiklio įtampos stiprintuvas**). Nutarta pradinės pavaros veikimo patikros metu pjezoelektrinio vykdiklio žadinimo signalui naudoti dažnių generatorių Agilent 33220A. Oscilografu stebint linijinių vykdiklių dažnines pavaros žadinimo signalus nustatyta, kad jie yra tinkamos formos ir veikimo metu pašaliniai trikdžiai nepasireiškia. Įsitikinta, kad naudojant MatLab 2012b programinį paketą sudaryta optinio padėties jutiklio duomenis apdorojanti programa sėkmingai atvaizduoja pavaros padėtį asmeniniame kompiuteryje pateiktame grafiniame lange. Taip pat, atitinkamai žadinant pjezoelektrinį vykdiklį, ant glotnios stiklo plokštumos pavyko sukurti oro pagalvės efektą. Tačiau nustatėme, kad linijinių inercinių vykdiklių generuojamos inercijos jėgos nepakanka sklandžiam pavaros pozicionavimo judesio sudarymui. Nuspręsta modifikuoti linijinių vykdiklių dažnines pavaras: sustiprinamo žadinimo signalo amplitudę padidinti nuo 5 V iki 12 V.

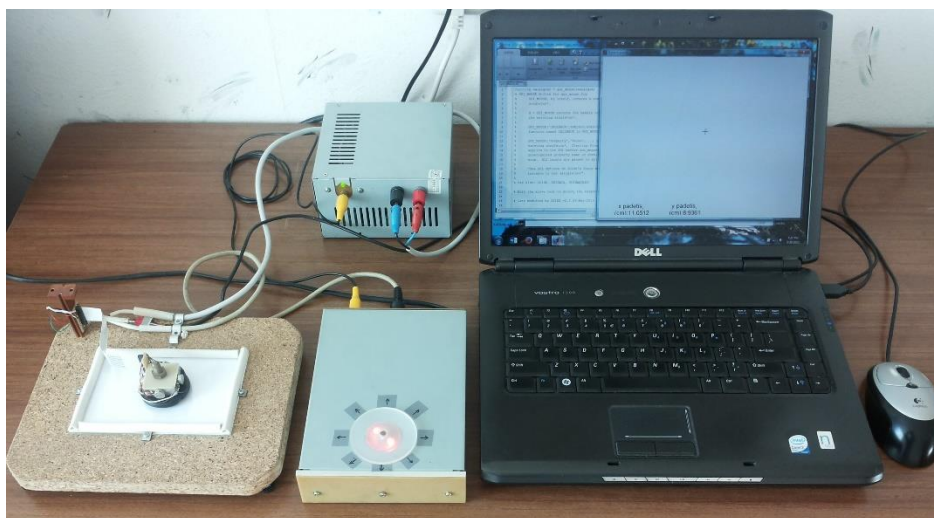
Modifikavus linijinių inercinių vykdiklių dažnines pavaras buvo sėkmingai sukurtas dviejų laisvės laipsnių pozicionavimo judesys. Atliekant eksperimentinį tyrimą, nutarta ištirti vienos krypties pozicionavimo judesio parametrus, kuomet pavara apkraunama atitinkamu svoriu. Tokia tyrimo eiga pasirinkta, kadangi pavarai naudojama lanksti laidų juosta turi įtaką pozicionavimo tikslumui.



4.5 pav. Pavaros eksperimentinio tyrimo stendo įrenginių struktūrinė schema

Eksperimentiniame tyrime buvo naudota pavaros modelio projektavimo eigoje sukonstruota valdymo įranga. Atliekant bandymus su linijiniais inerciniais vykdikliais, buvo nustatyta, kad vykdiklio

sukuriamos inercinės jėgos dydį patogiu užduoti keičiant žadinimo įtampos dažnį. Taigi nutarta pavaros sukuriama poslinkio matavimus atlikti esant keturiems parinktiems linijinio inercinio vykdiklio žadinimo dažniams:  $f_1 = 150 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 200 \text{ Hz}$ ,  $f_3 = 250 \text{ Hz}$  ir  $f_4 = 310 \text{ Hz}$  (*rezonansinis*). Pjezoelektriniui vykdikliui buvo tiekiamas pastovios amplitudės  $U_{Pzt} = 70 \text{ V}$  ir 31,4 kHz dažnio žadinimo signalas, linijiniui inerciniui vykdikliui atitinkamai pastovios amplitudės  $U_{LRA} = 12 \text{ V}$  žadinimo įtampa. Pavara, atitinkamai 30 g žingsniais, buvo apkrauta svareliais, kurių svoris siekė nuo 30 iki 1500 g. Parinktas vienodas  $t_{\text{žad.}} = 0,5 \text{ s}$  trukmės žadinimo signalo impulsas buvo paduotas vienam linijiniui inerciniui vykdikliui ir pjezoelektriniui elementui.



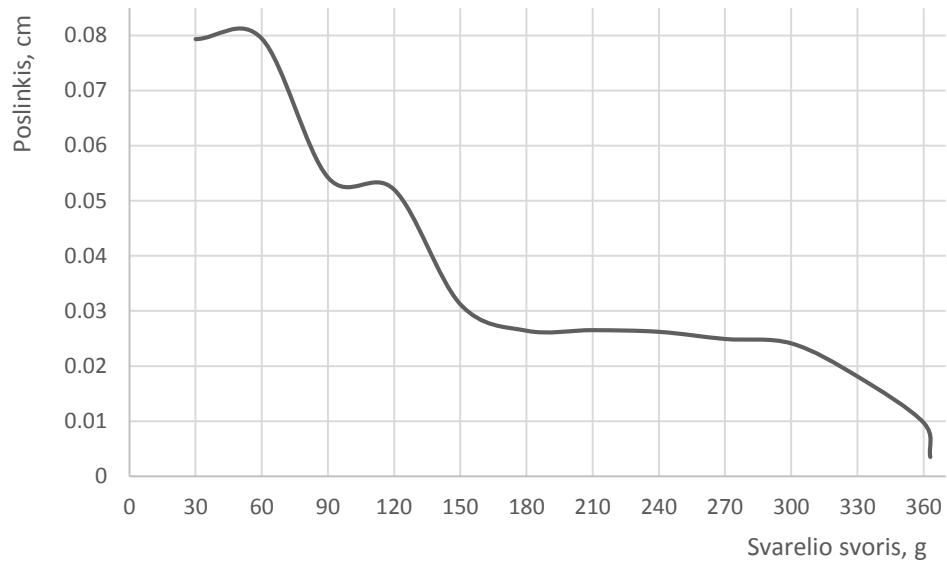
**4.6 pav.** Pavaros eksperimentiniame tyrime naudotas stendas

Pavaros padėtis nustatoma naudojant optinį jutiklį. Sukuriamas poslinkis buvo vertinamas stebint pavaros padėties registravimo MatLab programos grafinį langą ir jame atvaizduojamos vienos pavaros judesio krypties koordinatės.

### **4.3. Eksperimentinio modelio tyrimo rezultatai**

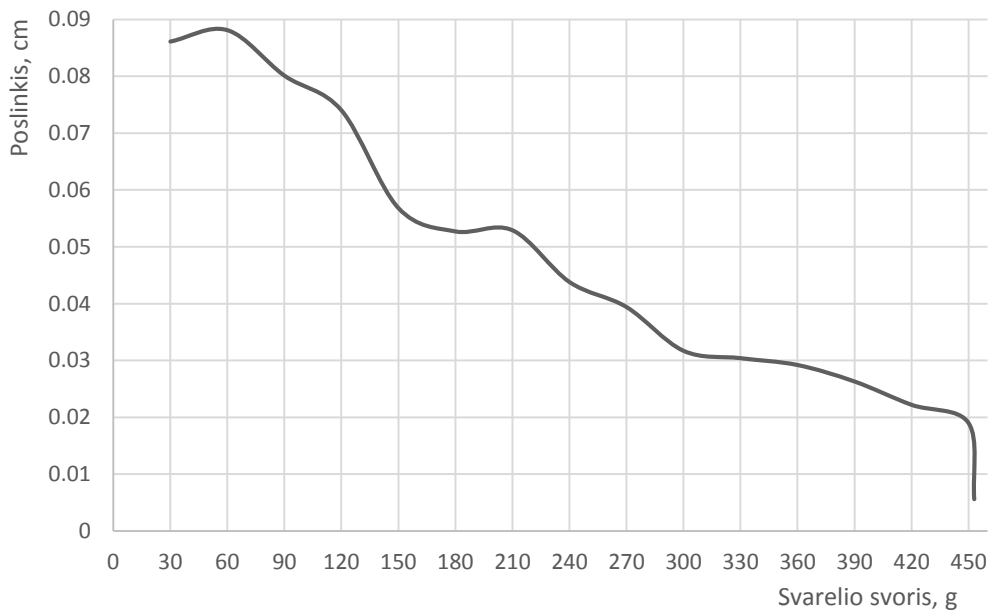
Tyrimo metu buvo stebima kiek sumažėja pavaros sukuriamas poslinkis, keičiant inercinio vykdiklio žadinimo dažnį ir svarelių sukuriamą apkrovą. Vykdiklio žadinimo dažnis buvo keičiamas koreguojant mikrovaldiklio programos kodą. Esant atitinkamam parinktam žadinimo dažniui, apkrovos svarelis masė buvo didinama iki dydžio, kuriam esant pavara nebegalėjo sukurti judesio. Sudarytos matavimų rezultatų lentelės pateikiamos **priede nr.2**.

4.7, 4.8, 4.9 ir 4.10 paveiksluose pateikti pavaros sukuriama poslinkio priklausomybės nuo apkrovos svorio ir linijinio inercinio vykdiklio žadinimo dažnio tyrimų rezultatai.



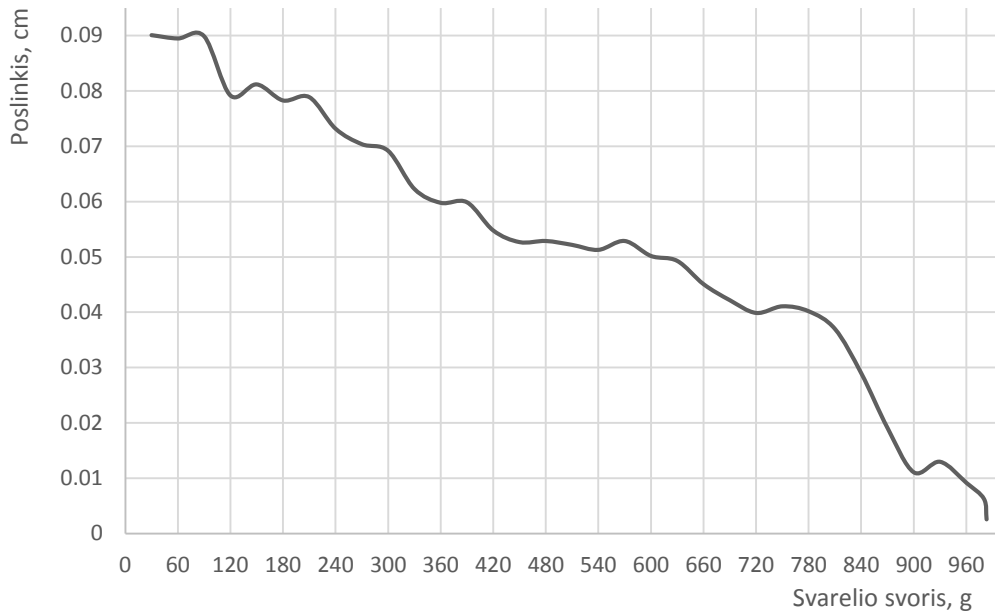
**4.7 pav.** Pavaros sukuriamo poslinkio priklausomybė apkrovos svorio, kai linijinio inercinio vykdiklio žadinimo dažnis  $f_1 = 150 \text{ Hz}$ ,  $t_{\text{žad.}} = 0,5 \text{ s}$

4.7 paveikslas: esant pradinei  $m_{\text{prad}1} = 30 \text{ g}$  apkrovai, pavaros sukuriamas poslinkis yra  $s_{\text{prad}1} = 0,0793 \text{ cm}$  ( $793 \mu\text{m}$ ). Didžiausia galima apkrova siekia  $m_{\text{maks}1} = 363 \text{ g}$ , esant  $s_{\text{min}1} = 0,0035 \text{ cm}$  ( $35 \mu\text{m}$ ) poslinkiui.



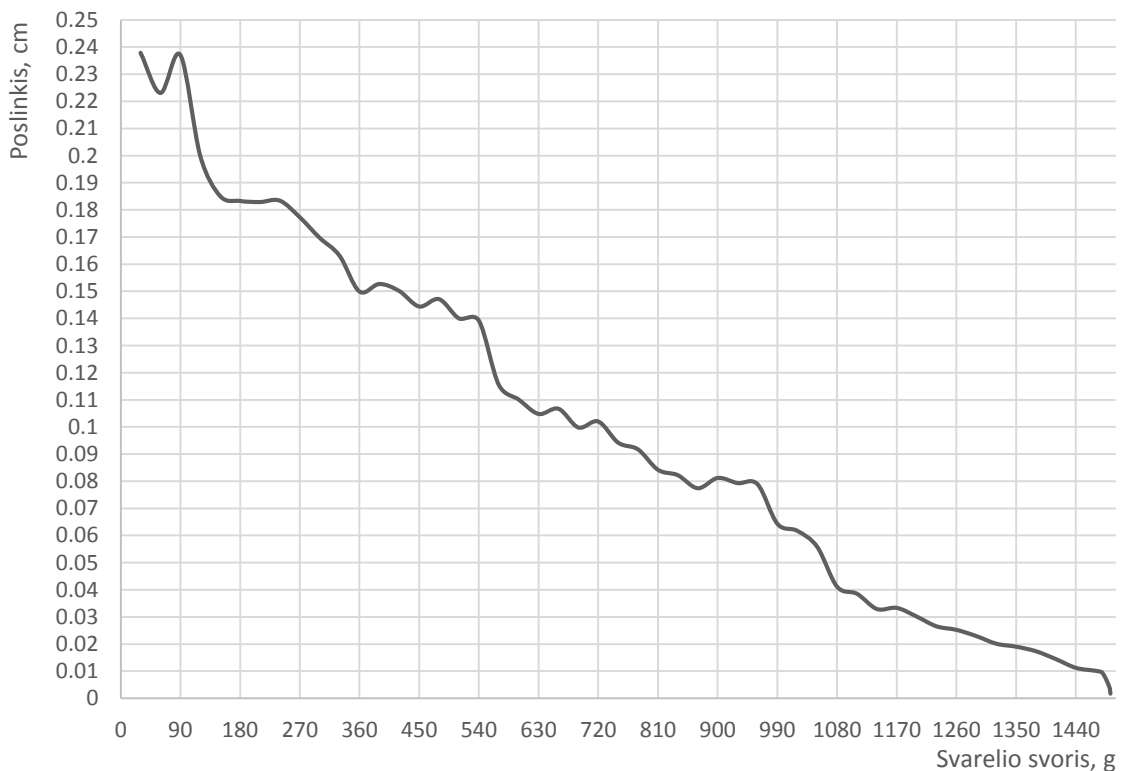
**4.8 pav.** Pavaros sukuriamo poslinkio priklausomybė apkrovos svorio, kai linijinio inercinio vykdiklio žadinimo dažnis  $f_2 = 200 \text{ Hz}$ ,  $t_{\text{žad.}} = 0,5 \text{ s}$

4.8 paveikslas: esant pradinei  $m_{\text{prad}2} = 30 \text{ g}$  apkrovai, pavaros sukuriamas poslinkis yra  $s_{\text{prad}2} = 0,0881 \text{ cm}$  ( $881 \mu\text{m}$ ). Didžiausia galima apkrova siekia  $m_{\text{maks}2} = 453 \text{ g}$ , esant  $s_{\text{min}2} = 0,0056 \text{ cm}$  ( $56 \mu\text{m}$ ) poslinkiui.



**4.9 pav.** Pavaros sukuriamo poslinkio priklausomybė apkrovos svorio, kai linijinio inercinio vykdiklio žadinimo dažnis  $f_3 = 250 \text{ Hz}$ ,  $t_{\text{žad.}} = 0,5 \text{ s}$

4.9 paveikslas: esant pradinei  $m_{\text{prad3}} = 30 \text{ g}$  apkrovai, pavaros sukuriamas poslinkis yra  $s_{\text{prad3}} = 0,0901 \text{ cm}$  ( $901 \mu\text{m}$ ). Maksimali galima apkrova siekia  $m_{\text{maks3}} = 983 \text{ g}$ , esant  $s_{\text{min3}} = 0,0026 \text{ cm}$  ( $26 \mu\text{m}$ ) poslinkiui.



**4.10 pav.** Pavaros sukuriamo poslinkio priklausomybė apkrovos svorio, kai linijinio inercinio vykdiklio žadinimo dažnis  $f_4 = 310 \text{ Hz}$  (rezonansinis),  $t_{\text{žad.}} = 0,5 \text{ s}$



4.10 paveikslas: esant pradinei  $m_{prad4} = 30 \text{ g}$  apkrovai, pavaros sukuriamas poslinkis yra  $s_{prad4} = 0,2379 \text{ cm}$ . Didžiausia galima apkrova  $m_{maks3} = 1492 \text{ g}$ , esant  $s_{min4} = 0,0017 \text{ cm}$  ( $17 \mu\text{m}$ ). Atliekant eksperimentinį tyrimą pastebėta, kad didinant apkrovos svorį, mažėja pavaros jungiamosios laidų juostos įtaką pavaros poslinkio sudarymui. Tai pasireiškia kadangi, didinant pavaros apkrovą, atitinkamai didėja ir neaktyvuotos pavaros statinė trinties jėga tarp sąveikaujančių trinties elemento ir glotnaus stiklo plokštumos paviršių. Taigi staiga nutraukus pjezoelektrinio elemento ir linijinio inercinio vykdiklio žadinimą, greičiau stabilizuojama pavaros padėtis ir sutrumpėja pavaros savistabdos laikas. Eksperimentinį tyrimą galima suskirstyti į keturias dalis. Bandymai buvo atlikti esant keturiems skirtingiems linijinio inercinio vykdiklio žadinimo dažniams:  $f_1 = 150 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 200 \text{ Hz}$ ,  $f_3 = 250 \text{ Hz}$ ,  $f_4 = 310 \text{ Hz}$  (*rezonansinis*) ir esant pastoviai  $t_{zad.} = 0,5 \text{ s}$  žadinimo impulso trukmei. Visais šiais tyrimo etapais atliktų matavimų rezultatai rodo, kad sukuriamas pavaros poslinkis atitinkamai mažėja beveik tiesiškai, kuomet didinamas apkrovos svoris. Atsižvelgę į matavimų rezultatus galime teigti, kad esant didesnei nei  $270 \text{ g}$  apkrovai, visais keturiais eksperimento etapais, pavaros poslinkio reikšmės kinta tolygiau, lyginant su mažesnėmis apkrovomis. **Išvada:** tokios konstrukcijos valdomos trinties pavarą tikslingiausia naudoti pozicionavimo sistemai, kurios manipuluojamo objekto svoris yra didesnis už  $270 \text{ g}$ . Nustatyta, kad atitinkamai keičiant linijinio inercinio vykdiklio žadinimo įtampos dažnį, galima parinkti reikiamą pavaros sukuriamo poslinkio dydį. Verta paminėti, kad eksperimentinės pavaros konstrukcija nėra idealiai išbalansuota, taigi esant tokiai konfigūracijai, gana sudėtinga sudaryti tikslų pavaros pozicionavimo judesį. Eksperimentiškai nustatytas didžiausias manipuluojamo objekto svoris yra  $m_{maks} = 1492 \text{ g}$ , esant  $s_{min} = 0,0017 \text{ cm}$  ( $17 \mu\text{m}$ ) poslinkiui, kuomet linijinis inercinis vykdiklis žadinamas  $f = 310 \text{ Hz}$  rezonansiniu dažniu.

## IŠVADOS

1. Atlikus patentų ir oro pagalvės sudarymo efekto analizę, nuspręsta sukurti eksperimentinę valdomos trinties pozicionavimo pavarą, panaudojant pjezoelektrinį elementą.
2. Pozicionavimo pavaros pagrindiniais elementais nutarta naudoti žiedo formos pjezoelektrinį elementą ir keturis linijinius inercinius vykdiklius, tarpusavyje išdėstytus  $90^\circ$  kampais.
3. Suprojektuota valdymo sistema. Sukonstruotas valdymo pultas, keturių kanalų linijinių inercinių vykdiklių dažninė pavara, pjezoelektrinio vykdiklio įtampos stiprintuvas, pritaikytas modifikuotas optinis jutiklis C1165-011.
4. Sukonstruotas eksperimentinis valdomos trinties pavaros modelis, kurio savasis svoris yra 44 gramai.
5. Nustatyta, kad eksperimentinę valdomos trinties pozicionavimo pavarą tikslingiausia naudoti pozicionavimo sistemai, kurios manipuluojamo objekto svoris yra didesnis už 270g.
6. Eksperimentinio tyrimo eigoje nustatyta, kad didžiausias galimas manipuluojamos objekto svoris yra  $m_{maks} = 1492 \text{ g}$ , esant  $s_{min} = 0,0017 \text{ cm}$  ( $17 \mu\text{m}$ ) poslinkiui.

## PASIŪLYMAI

1. Išbandyti linijinių vykdiklių žadinimą atvirkščio pjūklo formos įtampos signalu ir ištirti pavaros savistabdos charakteristikas.
2. Patobulinti vykdiklių dažnines pavaras ir tokiu būdu sumažinti jungiamųjų laidų skaičių.
3. Suprojektuoti monolitinę pavaros korpuso konstrukciją, kuri užtikrintų didesnę pozicionavimo tikslumą.

## LITERATŪRA

1. Lietuvos valstybinis patentų biuras, patentas nr. LT5947B Precizinis pozicionavimo įrenginys. Autoriai: R.Bansevičius, A.Bubulis, V.Jūrėnas, A.Barakauskas, A.Kasparaitis, patento savininkas – Kauno technologijos universitetas, 2011m. Lietuvos technikos biblioteka. [ Žiūrėta 2014-05-10].
2. Patento CN102969031A aprašas, 2013m, Google patents. [ Žiūrėta 2014-05-10].
3. Lietuvos valstybinis patentų biuras, patentas nr. LT5721B Trijų laisvės laipsnių įrenginys. Autoriai: R.Bansevičius, A.Bubulis, patento savininkas – Kauno technologijos universitetas, 2009m. Lietuvos technikos biblioteka. [ Žiūrėta 2014-05-11].
4. S.M.Hutcherson, Theoretical and numerical studies of air damping of micro-resonators in the non-continuum regime. Georgia institute of technology, 2004m., p. 9, 13-15. [ Žiūrėta 2014-05-16].
5. Arduino Mega 2560 dokumentacija [Žiūrėta 2014-10-08].
6. Linijinis inercinis vykdiklis 1037S1 C1C9. [ Žiūrėta 2014-09-14]. Prieiga per internetą: <http://www.dx.com/p/diy-repair-part-replacement-motor-for-iphone-4s-silver-139892#.VGy31MnESUR>.
7. Informacija apie linijinius inercinius vykdiklius. [ Žiūrėta 2014-09-05]. Prieiga per internetą: <http://www.precisionmicrodrives.com/vibrating-vibrator-vibration-motors/linear-resonant-actuator-lra-haptic-vibration-motors>.
8. Informacija apie linijinius inercinius vykdiklius. [ Žiūrėta 2015-01-04]. Prieiga per internetą: [www.em.avnet.com/en-us/design/featuredpromotions/Pages/Samsung-Electro-Mechanics-Haptic-Motors%E2%80%93Linear-Resonant-Actuators.aspx](http://www.em.avnet.com/en-us/design/featuredpromotions/Pages/Samsung-Electro-Mechanics-Haptic-Motors%E2%80%93Linear-Resonant-Actuators.aspx)
9. Tranzistoriaus BC517 dokumentacija. [ Žiūrėta 2015-04-09].
10. Diodo 1N4148 dokumentacija. [ Žiūrėta 2015-04-09].
11. Optoporos PC849 dokumentacija. [ Žiūrėta 2015-04-09].
12. Optinio jutiklio C1165-011 dokumentacija. [ Žiūrėta 2015-04-12].
12. Dr. Wei Shang, New Brunswick Universitetas. Kompiuterio pelės padėties registravimas „panaudojant „MatLab“ programinį paketą, pavyzdys. [ Žiūrėta 2015-04-07]. Prieiga per internetą: <http://we15hang.blogspot.com/2012/01/matlab-gui-tracking-mouse-locations.htm>
13. Square wave driver for piezoceramic actuators, straipsnis. Autoriai: S. Jakiela, J. Zaslona ur J.A. Michalski, Lenkijos mokslų akademija, 2012m., p.2-7. [ Žiūrėta 2015-03-17].
14. Dr. W.D. Phillips, „Doctronics“, informacija apie NE555 mikroschemą ir programinis paketas – stačiakampio formos impulsų generatoriaus elektrinių komponentų parametrų skaičiuoklė. [ Žiūrėta 2015-03-28]. Prieiga per internetą: <http://www.doctronics.co.uk/down555.htm>
15. A. Federavičius, E. Jurkauskienė, J. Mikučionienė, N. Rudgalvienė, Teorinė mechanika: teorijos pagrindai ir uždaviniai. Kaunas, Technologija, 2010m. p.104-105.[ Žiūrėta 2015-04-22].
16. Operacinio stiprintuvo AD8065 dokumentacija. [ Žiūrėta 2015-04-10].

17. Tranzistoriaus IRF840 dokumentacija. [ Žiūrėta 2015-04-10].
18. Optoporos LTV817 dokumentacija. [ Žiūrėta 2015-04-29].

# PRIEDAI

## Priedas nr. 1

Mikrovaldiklio programos kodas:

```
// Tadas Apulskis MEM 3/11 valdomos trinties pavaros mikrovaldiklio programos kodas
```

```
const int mygtN = 24; // N
const int mygtE = 22; // E
const int mygtS = 28; // S
const int mygtW = 26; // W
const int SlraPin = 6;
const int WlraPin = 7;
const int ElraPin = 8;
const int NlraPin = 11;
const int PztPin = 9;
int busenaN = 0;
int busenaE = 0;
int busenaS = 0;
int busenaW = 0;
void setup() {
  pinMode(mygtN, INPUT);
  pinMode(mygtE, INPUT);
  pinMode(mygtS, INPUT);
  pinMode(mygtW, INPUT);
  pinMode(SlraPin, OUTPUT);
  pinMode(WlraPin, OUTPUT);
  pinMode(ElraPin, OUTPUT);
  pinMode(NlraPin, OUTPUT);
  pinMode(PztPin, OUTPUT);
}
void loop() {
  // nuskaitymos mygtuku busenos
  busenaN = digitalRead(mygtN);
  busenaE = digitalRead(mygtE);
  busenaS = digitalRead(mygtS);
  busenaW = digitalRead(mygtW);
  // jei mygtukas nuspaustas, busena HIGH
  if (busenaN == HIGH) {
    // ijungiamas Lra N ir PZT:
    digitalWrite(NlraPin, HIGH); //pulso high
    delayMicroseconds(2200); //laukti mikrosekundziu
    digitalWrite(NlraPin, LOW); //pulso low
    digitalWrite(PztPin, HIGH); //pulso high
    delayMicroseconds(2200); //laukti mikrosekundziu
    digitalWrite(PztPin, LOW); //pulso low
    delay(1); // pulso low
  }
  else {
    // isjungiamas Lra N ir PZT:
    digitalWrite(NlraPin, LOW);
  }
}
```

```

    digitalWrite(PztPin, LOW);
}
if (busenaE == HIGH) {
    // ijungiamas Lra E ir PZT:
    digitalWrite(ElraPin, HIGH); //pulso high
    delayMicroseconds(2200); //laukti mikrosekundziu
    digitalWrite(ElraPin, LOW); //pulso low
    digitalWrite(PztPin, HIGH); //pulso high
    delayMicroseconds(2200); //laukti mikrosekundziu
    digitalWrite(PztPin, LOW); //pulso low
    delay(1); // pulso low
}
else {
    // isjungiamas Lra E ir PZT:
    digitalWrite(ElraPin, LOW);
    digitalWrite(PztPin, LOW);
}
if (busenaS == HIGH) {
    // ijungiamas Lra S ir PZT:
    digitalWrite(SlraPin, HIGH); //pulso high
    delayMicroseconds(2200); //laukti mikrosekundziu
    digitalWrite(SlraPin, LOW); //pulso low
    digitalWrite(PztPin, HIGH); //pulso high
    delayMicroseconds(2200); //laukti mikrosekundziu
    digitalWrite(PztPin, LOW); //pulso low
    delay(1); // pulso low
}
else {
    // isjungiamas Lra S ir PZT:
    digitalWrite(SlraPin, LOW);
    digitalWrite(PztPin, LOW);
}
if (busenaW == HIGH) {
    // ijungiamas Lra W:
    digitalWrite(WlraPin, HIGH); //pulso high
    delayMicroseconds(2200); //laukti mikrosekundziu
    digitalWrite(WlraPin, LOW); //pulso low
    digitalWrite(PztPin, HIGH); //pulso high
    delayMicroseconds(2200); //laukti mikrosekundziu
    digitalWrite(PztPin, LOW); //pulso low
    delay(1); // pulso low
}
else {
    // isjungiamas Lra W ir PZT:
    digitalWrite(WlraPin, LOW);
    digitalWrite(PztPin, LOW);
}
}
]

```

## Priedas nr. 2

**4.1 Lentelė.** Matavimų rezultatai, kai linijinio vykdiklio žadinimo dažnis  $f_1 = 150\text{Hz}$ ,  $t_{\text{žad.}} = 0,5\text{s}$

Svarelis svoris m, g	Pavaros poslinkis s, cm
30	0,0793
60	0,0794
90	0,0542
120	0,0520
150	0,0312
180	0,0264
210	0,0265
240	0,0262
270	0,0249
300	0,0241
330	0,0181
360	0,0097
363	0,0035

**4.2 Lentelė.** Matavimų rezultatai, kai linijinio vykdiklio žadinimo dažnis  $f_2 = 200\text{Hz}$ ,  $t_{\text{žad.}} = 0,5\text{s}$

Svarelis svoris m, g	Pavaros poslinkis s, cm
30	0,0861
60	0,0881
90	0,0801
120	0,0740
150	0,0568
180	0,0527
210	0,0529
240	0,0438
270	0,0394
300	0,0317
330	0,0304
360	0,0292
390	0,0263
420	0,0222
450	0,0190
453	0,0056

**4.3 Lentelė.** Matavimų rezultatai, kai linijinio vykdiklio žadinimo dažnis  $f_3 = 250\text{Hz}$ ,  $t_{\text{žad.}} = 0,5\text{s}$

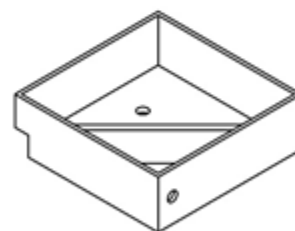
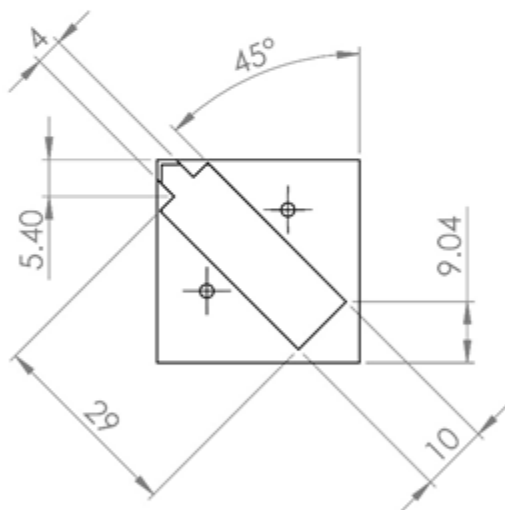
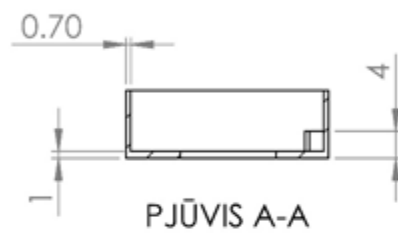
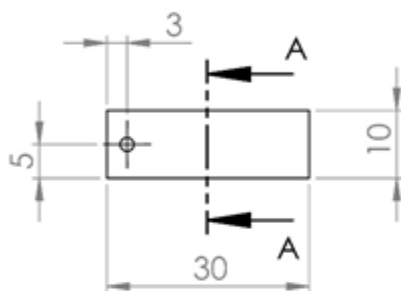
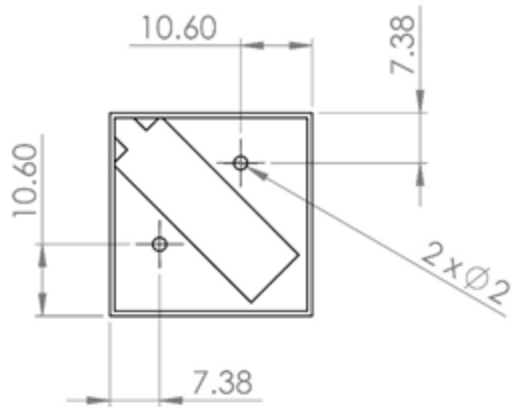
Svarelis svoris m, g	Pavaros poslinkis s, cm
30	0,0901
60	0,0895
90	0,0899
120	0,0792
150	0,0812
180	0,0783
210	0,0789
240	0,0732
270	0,0704
300	0,0692
330	0,0623
360	0,0598
390	0,0599
420	0,0548
450	0,0527
480	0,0529
510	0,0522
540	0,0513
570	0,0529
600	0,0502
630	0,0493
660	0,0451
690	0,0422
720	0,0399
750	0,0411
780	0,0402
810	0,0370
840	0,0290
870	0,0191
900	0,0111
930	0,0130
960	0,0092
980	0,0063
983	0,0026



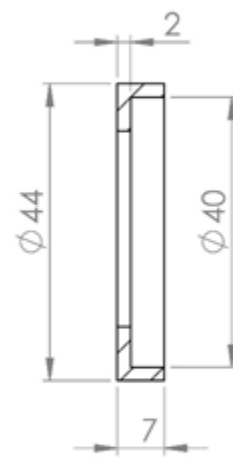
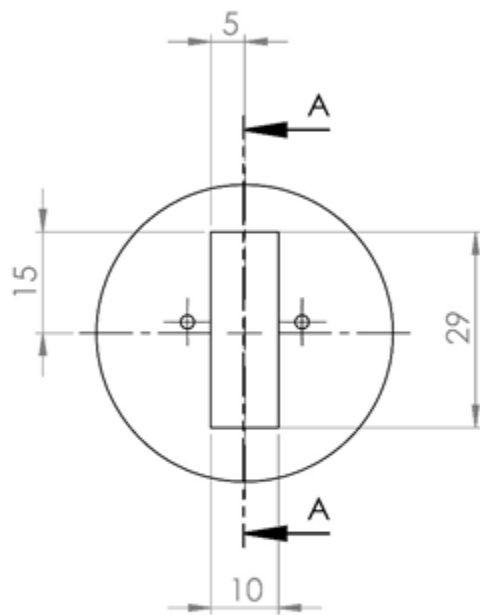
**4.4 Lentelė.** Matavimų rezultatai, kai linijinio vykdiklio žadinimo dažnis  $f_4 = 310\text{Hz}$  (rezonansinis),  $t_{\text{žad.}} = 0,5\text{s}$

Svarelio svoris m, g	Pavaros poslinkis s, cm
30	0,2379
60	0,2231
90	0,2371
120	0,1999
150	0,1851
180	0,1833
210	0,1829
240	0,1834
270	0,1773
300	0,1697
330	0,1631
360	0,1499
390	0,1527
420	0,1501
450	0,1444
480	0,1471
510	0,1400
540	0,1392
570	0,1155
600	0,1101
630	0,1048
660	0,1067
690	0,0998
720	0,1020
750	0,0942
780	0,0917
810	0,0842
840	0,0822
870	0,0774
900	0,0812
930	0,0793
960	0,0789
990	0,0643
1020	0,0617
1050	0,0558
1080	0,0411
1110	0,0385
1140	0,0329
1170	0,0333
1200	0,0301

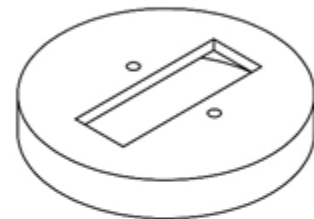
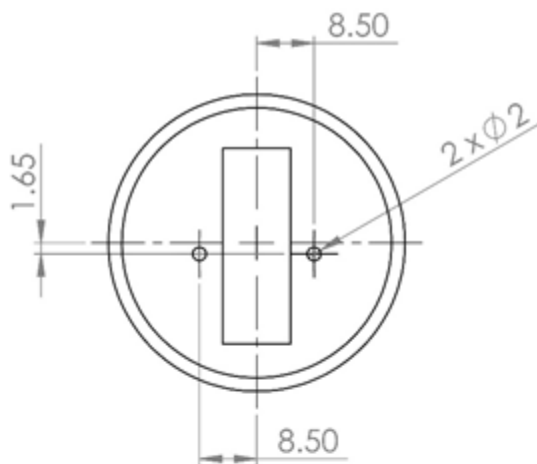
Svarelio svoris m, g	Pavaros poslinkis s, cm
1230	0,0265
1260	0,0252
1290	0,0229
1320	0,0201
1350	0,0190
1380	0,0173
1410	0,0144
1440	0,0112
1470	0,0101
1480	0,0093
1490	0,0044
1492	0,0017



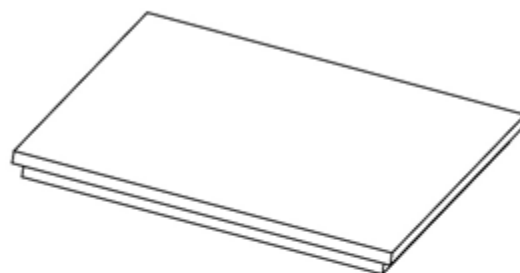
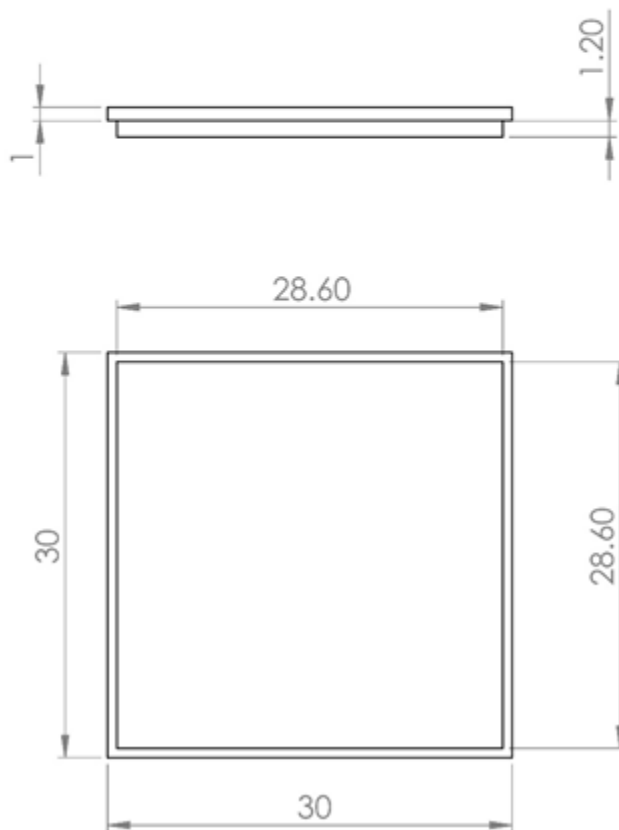
	Byla, laikmena Rėmelis	Papildoma informacija	Medžiaga <b>Plienas AISI 420</b>	Mastelis <b>1:1</b>
Padalinys <b>Mechatronikos</b>	Vadovas <b>Lekt.dr. D. Mažeika</b>	Dokumento tipas <b>Detalės brėžinys</b>	Dokumento statusas <b>Mokomasis</b>	
Organizacija <b>KTU MEM-3/11gr.</b>	Ruošė <b>T. Apulskis</b>	Pavadinimas <b>RĖMELIS</b>	Žymuo <b>MP.00.01.01</b>	
			Laida	Data 5/27/2015
			Kalba Lt	Lapas 1/1




PJŪVIS A-A



		Byla, laikmena Dangtelis	Papildoma informacija	Medžiaga ABS plastikas	Mastelis 1:1
Padalinys Mechatronikos	Vadovas Lekt.dr. D. Mažeika	Dokumento tipas Detalės brėžinys		Dokumento statusas Mokomasis	
Organizacija KTU MEM-3/11gr.	Ruošė T.Apulskis	Pavadinimas DANGTELIS		Žymuo MP.00.01.02	
				Laida	Data 5/27/2015
				Kalba Lt	Lapas 1/1



	Byla, laikmena staliukas	Papildoma informacija	Medžiaga <b>STIKLOTEKSTOLITAS</b>	Mastelis <b>2:1</b>
Padalinys Mechatronikos	Vadovas <b>Lekt. dr. D. Mažeika</b>	Dokumento tipas <b>Detalės brėžinys</b>	Dokumento statusas <b>Mokomasis</b>	
Organizacija <b>KTU MEM-3/11 gr.</b>	Ruošė <b>T. Apulskis</b>	Pavadinimas <b>RĖMELIO DANGTELIS</b>	Žymuo <b>MP.00.01.03</b>	
			Laida	Data 5/27/2015
			Kalba Lt	Lapas 1/1

# Technical Specification

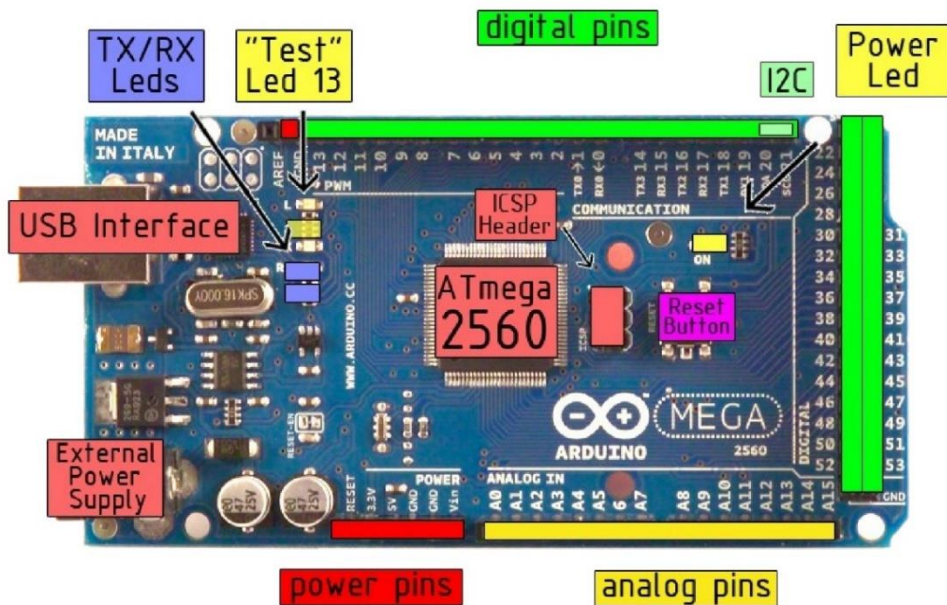


EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#) Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

## Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

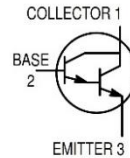
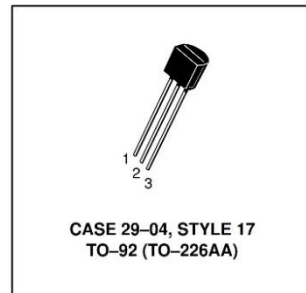
## the board



*radiospares* **RADIONICS**



**Darlington Transistors**  
NPN Silicon



**MAXIMUM RATINGS**

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector–Emitter Voltage	$V_{CES}$	30	Vdc
Collector–Base Voltage	$V_{CB}$	40	Vdc
Emitter–Base Voltage	$V_{EB}$	10	Vdc
Collector Current — Continuous	$I_C$	1.0	Adc
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	625 12	mW mW/°C
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	1.5 12	Watts mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	°C

**THERMAL CHARACTERISTICS**

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	°C/W

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
Collector–Emitter Breakdown Voltage ( $I_C = 2.0 \text{ mAdc}, V_{BE} = 0$ )	$V_{(BR)CES}$	30	—	—	Vdc
Collector–Base Breakdown Voltage ( $I_C = 10 \mu\text{Adc}, I_E = 0$ )	$V_{(BR)CBO}$	40	—	—	Vdc
Emitter–Base Breakdown Voltage ( $I_E = 100 \text{ nAdc}, I_C = 0$ )	$V_{(BR)EBO}$	10	—	—	Vdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 30 \text{ Vdc}$ )	$I_{CES}$	—	—	500	nAdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CB} = 30 \text{ Vdc}, I_E = 0$ )	$I_{CBO}$	—	—	100	nAdc
Emitter Cutoff Current ( $V_{EB} = 10 \text{ Vdc}, I_C = 0$ )	$I_{EBO}$	—	—	100	nAdc

# PC829 Series

\* TÜV (VDE0884) approved type is also available as an option.

## ■ Features

- Symmetrical terminal configuration  
**PC829** : 2-channel type  
**PC849** : 4-channel type
- High current transfer ratio  
 (CTR : MIN. 50% at  $I_F = 5\text{mA}$ ,  $V_{CE} = 5\text{V}$ )
- High isolation voltage between input and output ( $V_{iso} : 5\ 000\text{V}_{rms}$ )
- Recognized by UL, file No. E64380

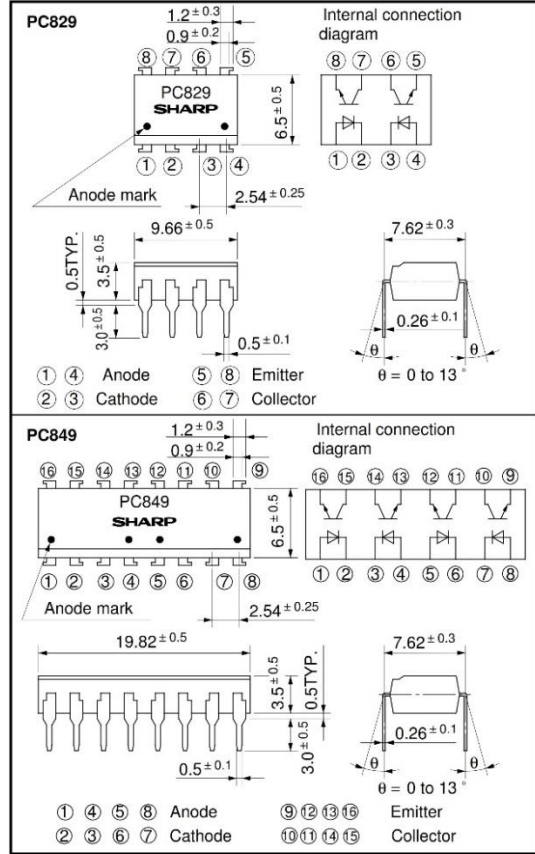
## ■ Applications

- Telephone exchangers
- Computer terminals
- System appliances, measuring instruments
- Signal transmission between circuits of different potentials and impedances

## High Density Mounting Type Photocoupler

### ■ Outline Dimensions

(Unit : mm)



### ■ Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Parameter	Symbol	Rating	Unit	
Input	Forward current	$I_F$	50 mA	
	<sup>1</sup> Peak forward current	$I_{FM}$	1 A	
	Reverse voltage	$V_R$	6 V	
	Power dissipation	$P$	70 mW	
Output	Collector-emitter voltage	$V_{CEO}$	35 V	
	Emitter-collector voltage	$V_{ECO}$	6 V	
	Collector current	$I_C$	50 mA	
	Collector power dissipation	$P_C$	150 mW	
	Total power dissipation	$P_{tot}$	170 mW	
	<sup>2</sup> Isolation voltage	$V_{iso}$	5 000	$V_{rms}$
	Operating temperature	$T_{opr}$	- 25 to + 100	°C
Storage temperature	$T_{stg}$	- 40 to + 125	°C	
<sup>3</sup> Soldering temperature	$T_{sol}$	260	°C	

\*1 Pulse width ≤ 100μs, Duty ratio : 0.001

\*2 40 to 60% RH, AC for 1 minute

\*3 For 10 seconds

\* In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that occur in equipment using any of SHARP's devices, shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest version of the device specification sheets before using any SHARP's device."



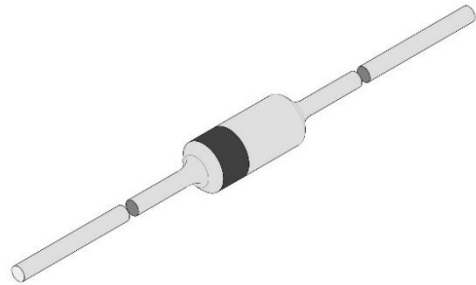
**1N4148.1N4448**

Vishay Telefunken

## Silicon Epitaxial Planar Diodes

### Features

- Electrically equivalent diodes: 1N4148 – 1N914  
1N4448 – 1N914B



94 9367

### Applications

Extreme fast switches

### Absolute Maximum Ratings

$T_j = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Test Conditions	Type	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage			$V_{RRM}$	100	V
Reverse voltage			$V_R$	75	V
Peak forward surge current	$t_p = 1\mu\text{s}$		$I_{FSM}$	2	A
Repetitive peak forward current			$I_{FRM}$	500	mA
Forward current			$I_F$	300	mA
Average forward current	$V_R = 0$		$I_{FAV}$	150	mA
Power dissipation	$l = 4\text{mm}, T_L = 45^\circ\text{C}$		$P_V$	440	mW
	$l = 4\text{mm}, T_L \leq 25^\circ\text{C}$		$P_V$	500	mW
Junction temperature			$T_j$	200	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range			$T_{stg}$	-65...+200	$^\circ\text{C}$

### Maximum Thermal Resistance

$T_j = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Test Conditions	Symbol	Value	Unit
Junction ambient	$l = 4\text{mm}, T_L = \text{constant}$	$R_{thJA}$	350	K/W



# C1165-011

# USB Optical Mouse SoC

Premium

## 8. Application Circuit Example for C1165-011

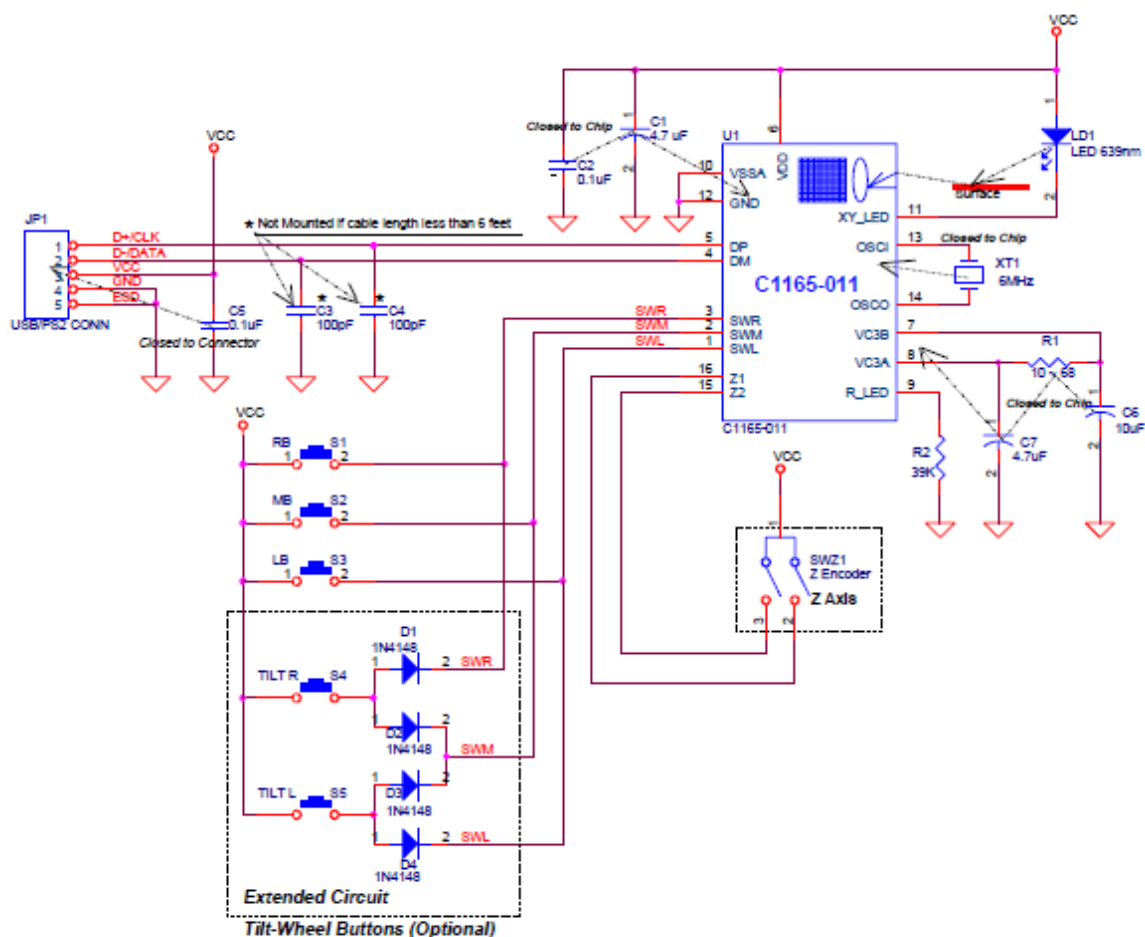


Figure 11: Application Schematic with C1165-011 16pins (3 buttons with Tilt-Wheel)



# High Performance, 145 MHz FastFET™ Op Amps

## AD8065/AD8066

### FEATURES

- FET input amplifier
- 1 pA input bias current
- Low cost
- High speed: 145 MHz, -3 dB bandwidth (G = +1)
- 180 V/μs slew rate (G = +2)
- Low noise
  - 7 nV/√Hz (f = 10 kHz)
  - 0.6 fA/√Hz (f = 10 kHz)
- Wide supply voltage range: 5 V to 24 V
- Single-supply and rail-to-rail output
- Low offset voltage 1.5 mV maximum
- High common-mode rejection ratio: -100 dB
- Excellent distortion specifications
- SFDR -88 dBc @ 1 MHz
- Low power: 6.4 mA/amplifier typical supply current
- No phase reversal
- Small packaging: SOIC-8, SOT-23-5, and MSOP-8

### GENERAL DESCRIPTION

The AD8065/AD8066<sup>1</sup> FastFET amplifiers are voltage feedback amplifiers with FET inputs offering high performance and ease of use. The AD8065 is a single amplifier, and the AD8066 is a dual amplifier. These amplifiers are developed in the Analog Devices, Inc. proprietary XFCB process and allow exceptionally low noise operation (7.0 nV/√Hz and 0.6 fA/√Hz) as well as very high input impedance.

With a wide supply voltage range from 5 V to 24 V, the ability to operate on single supplies, and a bandwidth of 145 MHz, the AD8065/AD8066 are designed to work in a variety of applications. For added versatility, the amplifiers also contain rail-to-rail outputs.

Despite the low cost, the amplifiers provide excellent overall performance. The differential gain and phase errors of 0.02% and 0.02°, respectively, along with 0.1 dB flatness out to 7 MHz, make these amplifiers ideal for video applications. Additionally, they offer a high slew rate of 180 V/μs, excellent distortion (SFDR of -88 dBc @ 1 MHz), extremely high common-mode rejection of -100 dB, and a low input offset voltage of 1.5 mV maximum under warmed up conditions. The AD8065/ AD8066

<sup>1</sup> Protected by U. S. Patent No. 6,262,633.

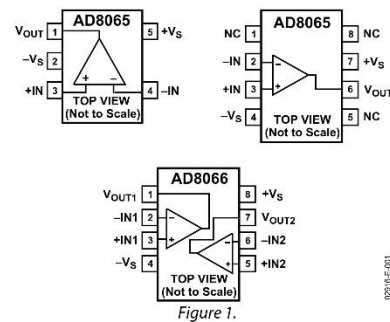
#### Rev. G

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

### APPLICATIONS

- Instrumentation
- Photodiode preamps
- Filters
- A/D drivers
- Level shifting
- Buffering

### CONNECTION DIAGRAMS



02916E-001

operate using only a 6.4 mA/amplifier typical supply current and are capable of delivering up to 30 mA of load current.

The AD8065/AD8066 are high performance, high speed, FET input amplifiers available in small packages: SOIC-8, MSOP-8, and SOT-23-5. They are rated to work over the industrial temperature range of -40°C to +85°C.

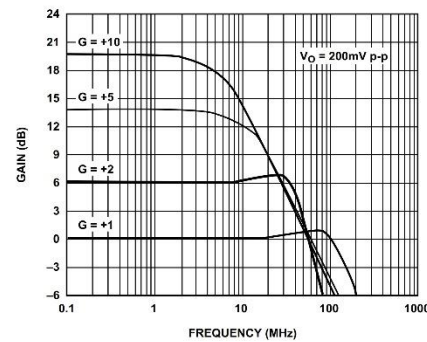


Figure 2. Small Signal Frequency Response

02916E-002

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 [www.analog.com](http://www.analog.com)  
Fax: 781.461.3113 © 2006 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



# IRF840

## N - CHANNEL 500V - 0.75Ω - 8A - TO-220 PowerMESH™ MOSFET

TYPE	V <sub>DSS</sub>	R <sub>DS(on)</sub>	I <sub>D</sub>
IRF840	500 V	< 0.85 Ω	8 A

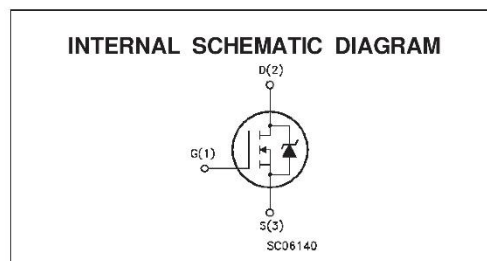
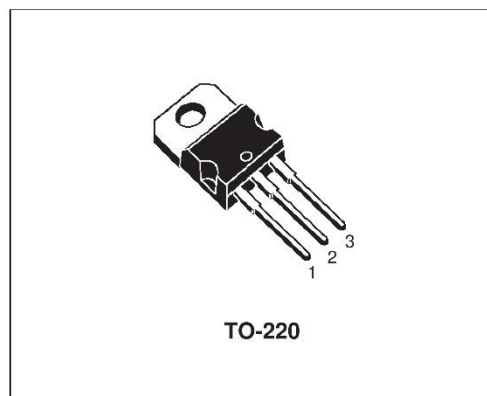
- TYPICAL R<sub>DS(on)</sub> = 0.75 Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- VERY LOW INTRINSIC CAPACITANCES
- GATE CHARGE MINIMIZED

### DESCRIPTION

This power MOSFET is designed using the company's consolidated strip layout-based MESH OVERLAY® process. This technology matches and improves the performances compared with standard parts from various sources.

### APPLICATIONS

- HIGH CURRENT, HIGH SPEED SWITCHING
- SWITCH MODE POWER SUPPLIES (SMPS)
- DC-AC CONVERTERS FOR WELDING EQUIPMENT AND UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES AND MOTOR DRIVER



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V <sub>DS</sub>	Drain-source Voltage (V <sub>GS</sub> = 0)	500	V
V <sub>DGR</sub>	Drain- gate Voltage (R <sub>GS</sub> = 20 kΩ)	500	V
V <sub>GS</sub>	Gate-source Voltage	± 20	V
I <sub>D</sub>	Drain Current (continuous) at T <sub>c</sub> = 25 °C	8.0	A
I <sub>D</sub>	Drain Current (continuous) at T <sub>c</sub> = 100 °C	5.1	A
I <sub>DM</sub> (*)	Drain Current (pulsed)	32	A
P <sub>tot</sub>	Total Dissipation at T <sub>c</sub> = 25 °C	125	W
	Derating Factor	1.0	W/°C
dv/dt(1)	Peak Diode Recovery voltage slope	3.5	V/ns
T <sub>stg</sub>	Storage Temperature	-65 to 150	°C
T <sub>j</sub>	Max. Operating Junction Temperature	150	°C

(\*) Pulse width limited by safe operating area (1) I<sub>SD</sub> ≤ 8A, di/dt ≤ 100 A/μs, V<sub>DD</sub> ≤ V<sub>(BR)DSS</sub>, T<sub>j</sub> ≤ T<sub>JMAX</sub>  
First Digit of the Datecode Being Z or K Identifies Silicon Characterized in this Datasheet



# High Density Mounting Type Photocoupler

LTV-817 Series

## Features

- Current transfer ratio  
(CTR : MIN. 50% at  $I_F=5mA$ ,  $V_{CE}=5V$ )
- High input-output isolation voltage:  
( $V_{iso}$  : 5,000V<sub>rms</sub>)
- Compact dual-in-line package  
LTV-817 : 1-channel type  
LTV-827 : 2-channel type  
LTV-847 : 4-channel type
- UL approved (No. E113898)
- TUV approved (No. R9653630)
- CSA approved (No. CA91533-1)
- FIMKO approved (No. 202634)
- NEMKO approved (No. P98101945)
- DEMKO approved (No. 307857)
- SEMKO approved (No. 9832157/01-03)
- VDE approved (No. 094722)
- Options available :  
-Leads with 0.4"(10.16mm)spacing (M Type)  
-Leads bends for surface mounting(S Type)  
-Tape and Reel of Type I for SMD(Add"-TA"Suffix)  
-Tape and Reel of Type II for SMD(Add"-TA1"Suffix)  
-VDE 0884 approvals (Add"-V"Suffix)

## Applications

1. Computer terminals.
2. System appliances, measuring instruments.
3. Registers, copiers, automatic vending machines.
4. Electric home appliances such as fan heaters, etc.
5. Signal transmission between circuits of different potentials and impedances.

## Package Dimensions

