VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Rytis Šveinauskas

ELEKTRONIKOS PLOKŠČIŲ FREZAVIMO STAKLIŲ DINAMINIAI TYRIMAI

INVESTIGATION OF PRINTED CIRCUIT BOARD MILLING MACHINE DYNAMICS

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX047
Mechaninių sistemų projektavimo ir gamybos specializacija
Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2022

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
_____
(Parašas)
__doc. dr. Ina Tetsman_
(Vardas, pavardė)
_____
(Data)

Rytis Šveinauskas

ELEKTRONIKOS PLOKŠČIŲ FREZAVIMO STAKLIŲ DINAMINIAI TYRIMAI (INVESTIGATION OF PRINTED CIRCUIT BOARD MILLING MACHINE DYNAMICS

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX047
Mechaninių sistemų projektavimo ir gamybos specializacija
Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas	dr. Paulius Ragauskas (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Konsultantas	_____ (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Lietuvių kalbos konsultantė	lekt. Angelika Petrėtienė (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)

Vilnius, 2022

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX047

Mechaninių sistemų projektavimo ir gamybos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)
__doc. dr. Ina Tetsman_
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

…….....Nr. .....
Vilnius

Studentui (ei) Ryčiui Šveinauskui.....…….....…….....….....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminiai tyrimai

patvirtinta 2022m. vasario 25 d. dekano potvarkiu Nr. 72me.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 202…m. ……..…… d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1) Išanalizuoti literatūrą, susijusią su elektroninių plokščių frezavimo problematika.
2) Sudaryti spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminių tyrimų metodiką.
3) Apskaičiuoti staklių dinaminį tikslumą.
4) Pamatuoti staklių dinaminį tikslumą.
5) Nustatyti staklių dinaminiam tikslumui įtaką darančius veiksnius.
6) Suformuluoti išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

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

Vadovas .... dr. Paulius Ragauskas.....
(Parašas) (Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

……..
(Parašas)

…….....Rytis Šveinauskas…....
(Vardas, pavardė)

.....2021-01-24.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra

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

Antrosios pakopos studijų **Mechanikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas	**Elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminiai tyrimai**
Autorius	**Rytis Šveinauskas**
Vadovas	**Paulius Ragauskas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Darbe aprašomas elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminis tyrimas. Tyrimo tikslai – apskaičiuoti ir išmatuoti elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminį pjūvio tikslumą X ir Y ašių kryptimis bei nustatyti staklių paklaidų šaltinius. Literatūros apžvalgos dalyje aprašomi nagrinėti literatūros šaltiniai, kurie yra susiję su darbe nagrinėjamų spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo staklių ir elektronikos plokščių gedimų problematika. Frezavimo staklių teorinių tyrimų dalyje aprašomi visi darbe atliekami teoriniai tyrimai. Frezavimo staklių virpesių praktinių matavimų dalyje aprašomi visi darbe atliekami praktiniai virpesių matavimai. Teorinis tyrimas atliekamas naudojant „Solidworks“ ir „Ansys“ programinę įrangą. Praktinis tyrimas atliekamas naudojant „National Instruments NI USB-4431“ signalo imtuvą ir du vienetus „IMI Sensors 603C01“ akcelerometrų. Rezultatų santraukoje glaustai aprašomi tyrimuose gauti rezultatai – rastos staklių paklaidos X ir Y ašių kryptimis bei nustatyti staklių virpesių šaltiniai. Rezultatų apdorojimo skyriuje aprašoma metodika, kaip įvertinamas staklių dinaminis tikslumas ir jis apskaičiuojamas naudojant tyrimuose gautus rezultatus.

Darbą sudaro 10 dalių: Įvadas, frezavimo staklių problematikos apžvalgos dalis, literatūros apžvalga, frezavimo staklių teorinių tyrimų dalis, frezavimo staklių virpesių praktinių matavimų dalis, rezultatų santrauka, rezultatų apdorojimo dalis, išvados, literatūros sąrašas, priedai.

Darbo apimtis – 81 p. teksto be priedų, 45 iliustracijos, 17 lentelių, 44 bibliografiniai šaltiniai.

Darbo tematika parašytas mokslinis straipsnis "Elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminiai tyrimai", kuris buvo pristatytas ir aprobuotas 25-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: Virpesiai, CNC staklės, dinaminės paklaidos, frezavimas

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Mechanics
Department of Mechanical and Material Engineering

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Mechanical Engineering** study programme Master Graduation Thesis 4

Title	**Investigation of Printed Circuit Board Milling Machine Dynamics**
Author	**Rytis Šveinauskas**
Academic supervisor	**Paulius Ragauskas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The paper describes the investigation of printed circuit board milling machine dynamics. The aims of the research are to calculate and measure the dynamic accuracy of electronic board milling machines in the direction of the X and Y axes and to determine the sources of machine error. The literature overview part describes the analysed literature that is related to problems of milling machines for printed electronics and electronic board failures. The theoretical research part of the milling machine describes all the theoretical research performed in the work. The section of practical measurements of vibrations of milling machines describes all practical measurements of vibrations performed in the work. Theoretical research is performed using „Solidworks“ and „Ansys“ software. The field test is performed using a National Instruments „NI USB-4431“ signal receiver with two „IMI Sensors 603C01“ accelerometers. The summation of the results briefly describes the results of the research - machine errors in the direction of the X and Y axes and the sources of machine vibrations.Results processing chapter describes the methodology for evaluating the dynamic accuracy of the machine and shows the calculation of the dynamic accuracy of the machine using the results of the study.

The work consists of 10 parts: Introduction, milling machine problem review part, literature review, milling machine theoretical research part, milling machine vibration practical measurements part, summary of results, results processing part, conclusions, references, appendices.

Thesis consists of: 81 pages of text without appendixes, 45 pictures, 17 tables, 44 bibliographical entries.

A scientific article "Investigation of printed circuit board milling machine dynamics" was written on the topic of the work, which was presented and approved at the 25th Lithuanian Young Scientists Conference "Mokslas – Lietuvos ateitis".

Work attachments are included separately.

Keywords: Vibrations, CNC machines, dynamic errors, milling

TURINYS

Įvadas 13
1. Frezavimo staklių problematikos apžvalga 16
2. Literatūros apžvalga 20
2.1. Elektronikos plokščių gedimai 20
2.2. Frezavimo staklių ir gaminių tyrimo būdai 22
3. Frezavimo staklių teoriniai tyrimai 36
3.1. Frezų savųjų virpesių teorinis tyrimas 36
3.2. Suklio veleno mušimo jėgos tyrimas 41
3.3. Varančiųjų sraigtų mušimo jėgos tyrimo metodologija 46
3.4. Staklių virpesių teorinis tyrimas 48
4. Frezavimo staklių virpesių praktinis matavimas 59
4.1. Y sijos sukeliamų virpesių matavimas 61
4.2. X sijos sukeliamų vibracijų matavimas 65
4.3. Suklio sukeliamų vibracijų matavimas 69
5. Rezultatų santrauka 75
6. Rezultatų apdorojimas 77
Išvados 80
Literatūros sąrašas 81
Priedai 84

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo staklės „Supra M“ (darbo autoriaus nuotrauka) 15
2 pav. Anodinis užpildas plokštės skerspjūvyje (Sood ir Pecht, 2018) 21
3 pav. Elektronikos plokštės išsisluoksniavimo etapai (Akbari, Nourani ir Spelt, 2017) 22
4 pav. „Paprastojo frezavimo judesiai ir jėgos (a) trimatėje erdvėje (b) dvimatėje erdvėje“ (Liu et al., 2020) 23
5 pav. Pluošto ištraukimas frezuojant (Liu et al., 2020) 24
6 pav. Paviršiaus šiurkštumas frezuojant mažo standumo detalę (Mou, Zhu, Jiang ir Song, 2020) 26
7 pav. Staklių geometrinių tolerancijų analizė (Afkhamifar, Antonelli ir Chiabert, 2016) 27
8 pav. Matavimų teleskopiniu linijinės padėties jutikliu rezultatai (Jalaludin et al., 2017) 31
9 pav. Suklio standumo matavimų rezultatai naudojant skirtingus pjovimo parametrus (Sarhan ir Matsubara, 2015) 32
10 pav. Matavimas naudojant vienmatį artefaktą (Wei et al., 2019) 34
11 pav. Reikšmingi vibracijų matavimo taškai (Kilikevičius, Prokopovič, ir Makarskas, 2013) 35
12 pav. "Kukurūzo" formos freza (nuotrauka iš „CNC rebuild“) 36
13 pav. Frezos matmenų schema. (modifikuota nuotrauka iš „Amazon“) 37
14 pav. ⌀1,6 mm frezos modelis (modelį parengė darbo autorius) 38
15 pav. Suklys GDZ80X73-2.2 (darbo autoriaus nuotrauka) 42
16 pav. EBS R10B-VS horizontali rotorių balansavimo mašina (nuotrauka iš: „EBS rotor balancing machine“) 43
17 pav. Suklio velenas (darbo autoriaus nuotrauka) 44
18 pav. Veleno modelis su jėgų vektoriais (modelį parengė darbo autorius) 45
19 pav. X ir Y sijas varantys sraigtai (darbo autoriaus nuotrauka) 46
20 pav. Indikatorius „Mitutoyo 2046S“ (darbo autoriaus nuotrauka) 47
21 pav. Sraigto reakcijos jėgos skaičiavimas (modelį parengė darbo autorius) 48
22 pav. Teorinis staklių „Supra M“ modelis (darbo autoriaus nuotrauka) 49
23 pav. Paviršiai, kurių atžvilgiu pateikiami rezultatai (modelį parengė darbo autorius) 51
24 pav. Y sijos virpesius sukeliančių jėgų vektorių vaizdas „Ansys“ programinėje įrangoje (modelį parengė darbo autorius) 52

25 pav. Y sijos vibracijų Bode diagramos: a) X ašies kryptimi matuojant suklį, b) Y ašies kryptimi matuojant suklį, c) X ašies kryptimi matuojant frezą, d) Y ašies kryptimi matuojant frezą 53
26 pav. X sijos virpesius sukeliančių jėgų vektorių vaizdas „Ansys“ programinėje įrangoje (modelį parengė darbo autorius)..... 54
27 pav. X sijos vibracijų Bode diagramos: a) X ašies kryptimi matuojant suklį, b) Y ašies kryptimi matuojant suklį, c) X ašies kryptimi matuojant frezą, d) Y ašies kryptimi matuojant frezą 55
28 pav. Suklio virpesius sukeliančių jėgų vektorių vaizdas „Ansys“ programinėje įrangoje (modelį parengė darbo autorius)..... 56
29 pav. Suklio sukeliamų vibracijų Bode diagramos: a) X ašies kryptimi matuojant suklį, b) Y ašies kryptimi matuojant suklį, c) X ašies kryptimi matuojant frezą, d) Y ašies kryptimi matuojant frezą 57
30 pav. Signalo imtuvas NI USB-4431 (nuotrauka iš „Artisan technology group“)..... 59
31 pav. Akcelerometras "603C01" (nuotrauka iš „PCB piezotronics“)..... 59
32 pav. Akcelerometrų montavimas ant suklio korpuso (darbo autoriaus nuotrauka) 60
33 pav. Vibracijų matavimų rezultatai Y sijai judant 400 mm/min. Pastūma: a)pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta..... 62
34 pav. Vibracijų matavimų rezultatai Y sijai judant 500 mm/min. Pastūma: a) pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta..... 63
35 pav. Vibracijų matavimų rezultatai Y sijai judant 600 mm/min. Pastūma: a) pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta..... 64
36 pav. Vibracijų matavimų rezultatai X sijai judant 400 mm/min. Pastūma: a) pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta..... 66
37 pav. Vibracijų matavimų rezultatai X sijai judant 500 mm/min. Pastūma: a) pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta..... 67
38 pav. Vibracijų matavimų rezultatai X sijai judant 600 mm/min. Pastūma: a) pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta..... 68

39 pav. Suklio keliamų vibracijų matavimų rezultatai sukliui sukantis 21 000 aps./min. kampiniu dažniu: a) pilnutinės vibracijos X ir Y ašių kryptimi, b) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta..... 69
40 pav. „SKF 6005“ guolio modelio pjūvis (modelis gautas iš (SKF, 2022))..... 71
41 pav. Suklio keliamų vibracijų matavimų rezultatai sukliui sukantis 22 000 aps./min. kampiniu dažniu: a) pilnutinės vibracijos X ir Y ašių kryptimi, b) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta..... 72
42 pav. Suklio keliamų vibracijų matavimų rezultatai sukliui sukantis 23 000 aps./min. kampiniu dažniu: a) pilnutinės vibracijos X ir Y ašių kryptimi, b) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta..... 73
43 pav. Suklio keliamų vibracijų matavimų rezultatai sukliui sukantis 24 000 aps./min. kampiniu dažniu: a) pilnutinės vibracijos X ir Y kryptimi, b) vibracijų X ir Y kryptimi dažnių juosta. 74
44 pav. Spausdintinės plokštės frezavimo pjūvių eskizas (brėžinį parengė darbo autorius) ... 77
45 pav. Elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminio tikslumo grafikas 78

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Frezos matavimo rezultatai 37
2 lentelė. 1,6 mm skersmens frezos modalinės analizės rezultatai 39
3 lentelė. 1,8 mm skersmens frezos modalinės analizės rezultatai 40
4 lentelė. 2 mm skersmens frezos modalinės analizės rezultatai 41
5 lentelė. Suklio GDZ80X73-2.2 parametrai 42
6 lentelė. Veleno mušimo jėgos rezultatai 45
7 lentelė. Staklių modalinės analizės rezultatai 50
8 lentelė. Y sijoje kylančios suklio korpuso vibracijos 53
9 lentelė. Y sijoje kylančios frezos vibracijos 53
10 lentelė. X sijoje kylančios suklio korpuso vibracijos 55
11 lentelė. X sijoje kylančios frezos vibracijos 56
12 lentelė. Suklio keliamos suklio korpuso vibracijos 57
13 lentelė. Suklio keliamos frezos vibracijos 58
14 lentelė. Virpesių šaltinių parametrai 75
15 lentelė. Apskaičiuoti staklių rezonansiniai dažniai 75
16 lentelė. Teoriniai ir praktiniai tyrimo rezultatai 76
17 lentelė. Elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminis tikslumas 78

ĮVADAS

Jungtinių Tautų pramonės plėtros organizacijos (angl. *United Nations Industrial Development Organization*) (2022) duomenimis paskutinį 2021 metų ketvirtį Lietuvoje gamybos kiekiai paaugo 20 %. Atrastos naujos arba fundamentaliai pakeistos senos ideologijos, kuriomis vadovaujantis projektuojami gaminiai, kuriami procesai ar organizuojamas darbas. Nors šiandieninės technologijos yra pažangios, naujų sprendimų ir procesų tobulinimo būdų paieška nesustoja. Kasdien atrandama naujų technologijų, įdiegiamos inovacijos, kurios ir toliau gerina gamybos našumą ir kokybę.

Vienas iš didžiausią įtaką našumui padariusių veiksnių – automatizacija. Technologijos pasiekė tokį lygmenį, kai automatizavimo kaina pateisino jos efektyvumą. Tai reiškė, kad automatizuotos linijos pagaminta produkcija buvo pigesnė negu rankomis pagaminta produkcija. Šiuo atveju automatizaciją galima apibrėžti kaip rankinio žmogaus darbo pakeitimą į skaitmeninį, kompiuteriu valdomą procesą. Rankinis darbas gali būti pakeistas į darbą robotiniais manipuliatoriais, griebtuvais, varikliais ar specialia įranga, kuri procesus vykdo autonomiškai ir nereikalauja pastovaus žmogaus įsiterpimo. Automatizavimas gali būti pritaikomas vienai operacijai, operacijų kompleksui ar net visai gamybos linijai perdaryti.

Kiekviena metodika turi trūkumų ir problemų, kurios trukdo toliau ją tobulinti. Pavyzdžiui, didinant gamybos kiekius, atsiranda logistikos, sandėliavimo, darbo apimčių kontroliavimo problemų. Tam, kad būtų geriau kontroliuojami dideli informacijos ar gamybos srautai, įdiegiamos stebėjimo sistemos. Norint iki galo išnaudoti šiuolaikinių technologijų galimybes, yra labai svarbu tiksliai sekti naudojamus procesus ir jų eigą. Ypatingą dėmesį mechaninių sistemų veikimui ir tobulinimui skiria mechaninės inžinerijos srities mokslų šaka. Sistemų projektavimas, detalių gamyba, eksperimentiniai tyrimai ir skaičiavimai sudaro bazinių inžinerinių procesų rinkinį, kurie naudojami kuriant ir tobulinant kiekvieną gaminį, mechanizmą ar sistemą. Tam, kad būtų sėkmingai atliekami tobulinimo darbai, šiame darbe pasirinkta atlikti frezavimo staklių tyrimus. Šie tyrimai leidžia išaiškinti esminius staklių trūkumus ir atskleidžia elementus kuriuos reikia keisti arba taisyti.

Šiame darbe pasirinkta tirti spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo staklių dinamiką. Norint iki galo išnaudoti sistemos galimybes ar atlikti atnaujinimus, privaloma susipažinti su šia kompleksine sistema – atlikti tyrimus, kad būtų išaiškinta dabartinė situacija. Didinant apdirbimo greitį, susiduriama su vibracijomis, paklaidomis ir gamybiniu broku. Susidaro savotiška grandininė reakcija, kai norint pagerinti vieną procesą, atsiranda poreikis pirmiau pagerinti kitus procesus ar jų kokybę. Tam tikslui yra būtina išnagrinėti problemą, atlikti nuodugnius tyrimus, apdoroti gautą informaciją ir sudaryti metodiką, kuri padėtų problemą pašalinti. Tik susipažinus su kilusiomis

problemomis ir jas išsprendus, bus galima atlikti tolimesnius patobulinimus, kurie ir toliau gerins sistemos darbą.

Šiame darbe tiriamos spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo staklės. Tyrimų metodika sudaryta remiantis nagrinėta literatūra, kurioje rašoma apie staklių tyrimus bei elektronikos plokščių pažeidimus kuriuos sukelia apdirbimo metu atsirandantys virpesiai ir mechaninės jėgos.

Staklių konstrukcija leidžia sukliui slinkti X, Y ir Z ašių kryptimis. Lyginant su tradiciniais CNC metalo apdirbimo centrais, šios staklės yra lengvesnės ir pigesnės. Staklėse naudojamas oru aušinamas greitaeigis suklys, kurį slenka sraigtinės pavaros su guoliais. Suklys privalo suktis dideliu kampiniu dažniu, kadangi apdirbimui naudojamos mažo skersmens frezos. Ruošiniams laikyti naudojamas standžiai įtvirtintas lizdas, kuris talpina gaminiams pritaikytus laikiklius. Sijų ir suklio konstrukcija sudaryta iš aliuminio detalių ir plieninių mašinų elementų, kad konstrukcijos svoris būtų kuo mažesnis ir išlaikytų standumą.

Darbo mokslinis naujumas. Darbe atliekamų tyrimų metodika yra specialiai sukurta šioms, pagal įmonės poreikį sukurtoms staklėms. Metodika sudaryta remiantis staklių paskirtimi – greitu gaminio išpjovimu iš technologinės paletės ir literatūros analizėje įgytomis žiniomis. Tradiciniai, statinių tyrimų metodai skirti analizuoti stakles, kurios generuoja dideles apdirbimo jėgas. Šios staklės naudoja greitaeigius elementus ir patiria palyginti mažas apkrovas, todėl svarbiausius rezultatus atskleidžia dinaminiai tyrimai.

Tyrimo objektas. Spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo staklių „Supra M“ (1 pav.). dinaminis tikslumas.



1 pav. Spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo staklės „Supra M“ (darbo autoriaus nuotrauka)

Darbo tikslas. Atlikti elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminius tyrimus – išmatuoti ir apskaičiuoti pilnutinę staklių paklaidą (tikslumą) X ir Y ašių kryptimis. Palyginus išmatuotus ir apskaičiuotus duomenis rasti, kurie staklių elementai sukelia paklaidas.

Norint įvykdyti iškeltus tikslus privaloma atlikti šiuos uždavinius:

- Išanalizuoti literatūrą susijusią su elektroninių plokščių frezavimo problematika.
- Sudaryti spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminių tyrimų metodiką.
- Apskaičiuoti staklių dinaminį tikslumą.
- Pamatuoti staklių dinaminį tikslumą.
- Nustatyti staklių dinaminiam tikslumui įtaką darančius veiksnius.
- Suformuluoti išvadas.

Darbo tematika parašytas mokslinis straipsnis "Elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminiai tyrimai", kuris buvo pristatytas ir aprobuotas 25-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“.

1. FREZAVIMO STAKLIŲ PROBLEMATIKOS APŽVALGA

Elektronikos gamyba yra sparčiai besivystanti ir platų panaudojimą pasaulyje turinti sritis. Beveik kiekviename šiuolaikiniame prietaise galima rasti bent vieną elektros grandinę. Šias grandines sudarančių elementų kiekis, priklausomai nuo prietaiso, gali sudaryti nuo kelių vienetų iki tūkstančių komponentų. Kasdien naudojami prietaisai: telefonai, kompiuteriai ir t. t. turi kelių lygmenų komponentų struktūras, kurios reikalauja atitinkamo montavimo galimybių ir stipruminių charakteristikų. Šiandien labiausiai paplitęs tokių komponentų montavimo pagrindas – spausdintinė elektronikos plokštė. Kaip nurodo (Schuerink, Slomp, Wits, Legtenberg ir Kappel, 2013) ir standartas (IPC, 1991) plokštė dažniausiai yra gaminama iš stiklo pluošto ir fenolio dervos. Plokštės sluoksniai sujungiami vario takeliais, kurie sudaro elektrai laidžias jungtis signalo perdavimui tarp komponentų ir izoliatoriaus sluoksnių. Į stiklo pluošto ir fenolio dervos junginį dedamas bromas, kuris padidina medžiagos atsparumą ugniai. Toks junginys įgauna atsparumo ugniai klasifikaciją. Priklausomai nuo atsparumo lygio medžiaga skirstoma į kategorijas. Dažniausiai pramonėje naudojama medžiaga – „FR4“ (2 priedas). Ši medžiaga leidžia sukurti mechaniškai atsparius pagrindus, kurių spalva, matmenys ir sluoksnių kiekis gali būti patikimai išgaunami moderniais gamybos metodais.

Elektriniai komponentai prie plokštės yra tvirtinami litavimo būdu. Lydmetalis yra liejamas tarp ant plokštės esančios varinės kontakto aikštelės ir komponento kontaktinio paviršiaus. Sustingęs metalas sudaro patikimą, elektrai laidžią jungtį. Didesniam litavimo proceso našumui pasiekti, plokštės lituojamos technologinėse paletėse. Šios paletės yra sudarytos iš dviejų ar daugiau gaminio plokščių kurios yra sujungtos tarpusavyje (priklausomai nuo paskirties ir technologijos gali būti pridedamas ir technologinis kontūras paletės standumui padidinti). Kadangi keli gaminiai sujungiami į vieną elementą supaprastėja transportavimas ir pagerėja proceso atkartojamumas. Tačiau gaminius gaminant paletėmis, po litavimo reikalingas papildomas procesas – gaminių atskyrimas, kadangi gaminiai tolimesniuose etapuose apdorojami vienetais. Atskyrimo metu sujungimo taškai tarp gaminių yra panaikinami ir paletė yra vėl išskaidoma į atskirus gaminius. Svarbu, kad atskiriant gaminius būtų išvengta plokštės pažeidimų ir pjūvių nuokrypių, kadangi tai yra pagrindiniai gaminio kokybės ir geometrijos parametrai.

Didėjant elektronikos gamybos kiekiams buvo kuriami specialūs FR4 medžiagos pjovimo metodai. Stiklo pluoštas yra medžiaga, kuri kelia tam tikrus sunkumus gamybos procesuose. Vienas iš šių sunkumų yra medžiagos abrazyvinės savybės, nes stiklas yra panašaus kietumo kaip ir dažnai įrankiuose naudojamas greitapjūvis plienas. Pjovimo įrankiai sparčiai dyla nuo kontakto su tokio kietumo medžiaga. Dėl stiklo pluošto trapumo, plokštės viduje esantis stiklas atveria naujas kietas ir aštrias briaunas po kiekvieno kontakto su įrankiu. Šiai problemai spręsti buvo pradėti naudoti kirpimo

įrankiai, kurie leido plokštes atskirti naudojant peilių gniuždymo jėgą. Tokio tipo įrenginiuose kerpančioji briauna neprivalo būti itin aštri, todėl darbas tarp briaunų atnaujinimo atliekamas ilgiau. Sudėtingiems gaminiams toks metodas nebuvo optimalus dėl paliekamo grubaus apdirbto paviršiaus. Nuo kirpimo jėgos sukeliamų įtempių plokštės sluoksniai suardomi ir arti esančios elektrinės jungtys nutraukiamos. Tikslesnis metodas, kuris leido išvengti anksčiau minėtų trūkumų yra frezavimas. Aukštu kampiniu dažniu besisukančia freza medžiaga yra pašalinama iš pjaunamų vietų. Įrankio dilimas šiame procese egzistuoja, tačiau freza dažniausiai turi daugiau nei vieną pjaunančią briauną ir pjaunant skirtingus pjūvius įrankio pozicija yra keičiama, kad būtų naudojamas visas pjaunantysis paviršius. Tokiu būdu išgaunamas didžiausias įrankio naudojimo laikas. Frezavimo tikslumas yra didesnis ir tikimybė pažeisti gaminį yra kur kas mažesnė.

Elektronikos plokščių frezavimas šiuo metu yra vienas iš dažniausiai pasaulyje naudojamų plokščių atskyrimo būdų. Pagrindiniai šio metodo privalumai yra našumas, tikslumas bei paprastas įdiegimas. Staklių našumą užtikrina didelis suklio kampinis greitis. Tikslumą pasiekti leidžia lyginamai mažos pjovimo jėgos. Sistema paprastai įdiegiama, kadangi standartinės elektronikos plokščių frezavimo staklės užima mažai vietos ir viduje talpina visas mechanines, elektromechanines, valdymo ir vartotojo sąsajos dalis. Šie privalumai gali būti palyginami su lazeriniu plokščių atskyrimo metodu, tačiau lazerinis procesas dažniau naudojamas plokštėms, kurių storis yra mažesnis nei 0,43 milimetrų (PCB Universe, 2020), kadangi pjovimo lazeriu greitis lėtėja eksponentiškai, kai medžiagos storis didėja.

Kompiuterizuotos CNC frezavimo staklės gali pjauti judant kintančia erdvine trajektorija, todėl proceso galimybės yra labai plačios. Šį procesą galima naudoti, tiek netikslių buitinės technikos elektronikos plokščių frezavimui, tiek ypatingus tikslumo reikalavimus turinčių medicinos, karo ar kosmoso elektrinės technikos plokščių gamybai. Plokštės yra plokšti kūnai, kurių formą apibrėžia dvimatis kontūras. Skaitmeninės trijų ašių frezavimo staklės turi mažus galimybių apribojimus pjaunant dvimatį kontūrą, todėl proceso pritaikomumas yra platus. Platus pritaikomumas leidžia gaminti įvairaus sudėtingumo ir dydžio plokštes, tačiau tai atneša ir specifinių sunkumų.

Elektronikos gaminių bei komponentų pramonės vystymasis yra spartus, nauji komponentai tampa vis mažesni, tikslesni ir dažnai reikalauja pažeidimų patikros po kiekvieno gamybos etapo. Elektronikos komponentų raidos sparta iliustruojama (Franco, Kaczer ir Groeseneken, 2014) leidinyje. Šaltinyje minima, kad 2007 metais mikroprocesoriuose buvo naudojami 45 nano metrų dydžio tranzistoriai, po dvejų metų, 2009-aisiais, naujosios technologijos leido gaminti ir naudoti jau 32 nano metrų dydžio tranzistorius. Per dvejus metus mikroprocesoriuose naudojamų tranzistorių dydis sumažėjo 28,9 %. Tokia technologijų vystymosi sparta priverčia tobulinti gretutinius gamybos procesus, kad šie gebėtų atitikti naujos technologijos reikalavimus. Plokščių frezavimas gali sukelti

nepageidaujamas vibracijas, mechanines jėgas ir įtempius, kurie potencialiai gali pažeisti tokius mažus ir jautrius komponentus. Pereinant prie naujų mikro komponentų technologijų galima susidurti su reikalaujamo tikslumo šuoliu. Jei pjūvis nebus pakankamai tikslus, smulkūs komponentai gali būti pažeisti arba visiškai sunaikinti. Induktyviosios ritės, keraminiai ir puslaidininkiniai komponentai neretu atveju yra trapūs ir itin jautrūs koncentruotiems įtempiams, kuriuos gali sukelti grubus frezavimo procesas. Minėtų elementų dydžio mažinimas ir technologijų vystymas komponentus daro tik jautresnius pažeidimams. Galima teigti, kad elektronikos plokščių frezavimas yra tiesiogiai susijęs su frezuojamo gaminio komponentų naujumu (sudėtingumu) ir tai padaro šį procesą vis atsinaujinantį.

Šiame darbe tiriamos staklės surinktos naudojant paviršinio litavimo mašinos korpusą kaip staklių pagrindą, kurio standumas buvo pakankamas frezavimui. Iš minėtos mašinos taip pat naudojamos X ir Y sijų kreipiančiosios bei pavaros, dėl kurių juda staklių sijos. Staklėse buvo naudojamas greitaeigis suklys, kuris geba pasiekti 35 000 aps./min kampinį greitį. Laikui bėgant, staklių pajėgumo ir tikslumo poreikiai buvo padidinti. Dėl staklėmis apdirbamos medžiagos abrazyvumo išsidėvėję judėjimo elementai buvo pakeisti. Kaip rašoma straipsnyje apie geometrines kompiuterizuotų staklių paklaidas (Guo, Zhang ir Xi, 2016), „Yra du būdai pašalinti geometrines paklaidas – paklaidų vengimas ir paklaidų kompensavimas“. Pasirinkta geometrinių paklaidų vengti – sumažinti paklaidas arba jas eliminuoti pakeičiant paklaidas keliantį elementą kokybiškesniu ar modernesniu elementu. Po mazgų pakeitimų staklių tikslumas ir apdirbimo greitis padidėjo. Tačiau pastebėta, kad apkrova sukliui tapo per didelė ir srovės viršijimo apsauga neleido tęsti darbo. Suklys pakeistas į 2,2 kW galios, 24 000 aps./min. pasiekti galintį suklį. Tokiu principu, matant aiškius trūkumus ar atsiradusius gedimus, staklės buvo atnaujinamos ir taisomos. Iki šiol atlikti darbai staklių tikslumą padidino iki ± 0,1 mm lygio. Pasiekus tokį tikslumą, prieš kitus tobulinimo darbus pasirinkta atlikti matavimus, kadangi paklaidų šaltiniai nėra žinomi.

Staklių paklaidoms ir paklaidų šaltiniams rasti pasirinkta atlikti dinaminius tyrimus, kad būtų išaiškinta dabartinė staklių būklė ir numatyti tolimesni tobulinimo darbai. Nuspręsta pirmiausia išaiškinti staklių pjūvių tikslumą, kad būtų žinomas iki šiol padarytas progresas. Antra, siekiama nustatyti kurie elementai kelia paklaidas, kad būtų išaiškinta jų būklė. Pastebėta, jog naudojant didelį apdirbimo greitį dominuoja dinaminės paklaidos. Įjungus stakles juntamos vibracijos ir apdirbti gaminių paviršiai tapo „banguoti“. Tai byloja apie ciklinių vibracijų sužadinimą veikiant staklėms. Todėl pasirinkta atlikti dinaminius tyrimus. Siekiant susipažinti su dinaminiais veiksniais ir jų tyrimais analizuojama literatūra, kuri yra susijusi su frezavimo staklių paklaidų tyrimu. Nagrinėjama literatūra, kuri aprašo pjovimo jėgų poveikį staklių mazgams ir gaminiams. Kaip rašoma (Raksiri ir Parnichkun, 2004) straipsnyje, „Daugiausia padėties nuokrypių atsiranda dėl geometrinių, pjovimo jėgos, dinaminės apkrovos ir kitų paklaidų“. Keliama hipotezė, kad nuokrypių išaugimą galima

paaiškinti tuo, kad didesni greičiai išryškina staklių mazgų inerciją. Didinamas greitis didina sistemos kinetinę energiją eksponentiškai. Esant didelei kinetinei energijai pasireiškia stiprūs mazgų impulsai juos stabdant. Atraminiai elementai veikiami didesnių jėgų daugiau išlinksta ir greičiau dyla. Toks poveikis yra kompleksinis ir ištyrus stakles būtų galima nustatyti mazgus ar elementus, kurie kelia pagrindines problemas.

Frezuojant virpesiai dažniausiai daro žalingą poveikį – aukšto dažnio cikliniai poslinkiai dėvi staklių dalis, didina klibėjimą, kelia rezonansą ir prastina paviršiaus apdirbimo kokybę. Gaminant spausdintines elektronikos plokštes vibracijos gali suardyti plokštės viduje esančius stiklo pluošto sluoksnius, tokia žala gaminiui yra nepataisoma.

2. LITERATŪROS APŽVALGA

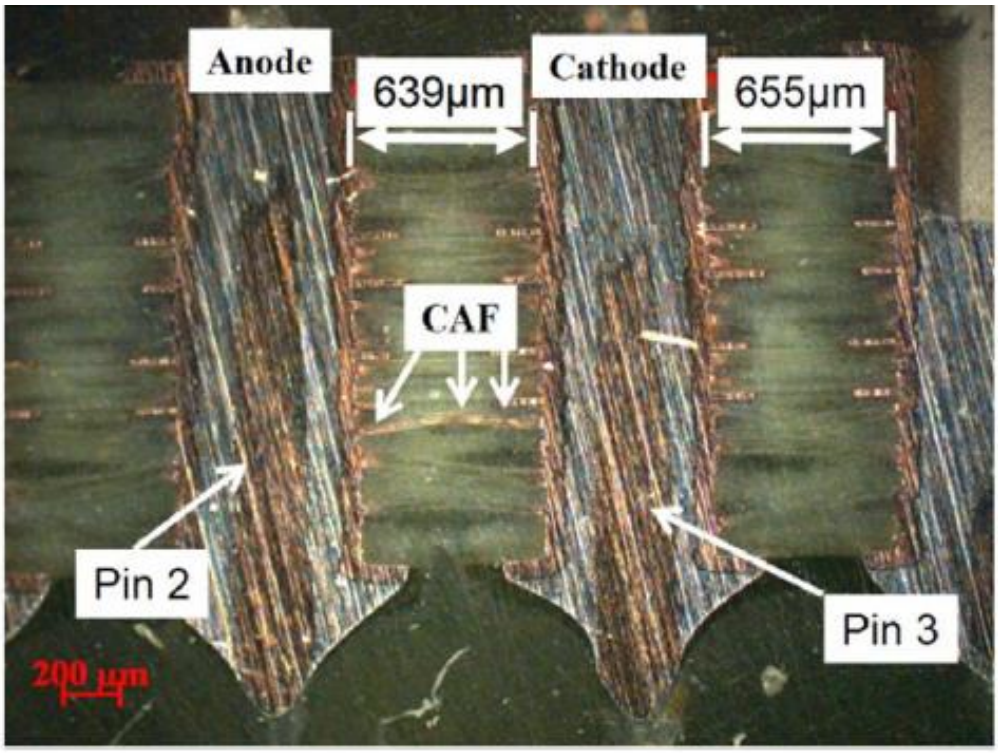
Prieš pradedant tyrimus analizuojama literatūra, susijusi su spausdintinių plokščių gedimais ir frezavimo staklių tyrimais. Analizės tikslas – susipažinti su frezavimo problematika bei įgyti bendrųjų žinių tyrimui atlikti.

2.1. Elektronikos plokščių gedimai

Nagrinėjant spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo stakles pirmiausia susipažinta su frezuojamu objektu – spausdintine elektronikos plokšte. Pažinus objektą geriau suprantami galimi gedimo modeliai, staklių dinamikos ir pjūvio tikslumo svarba.

Laidžiojo anodinio užpildo susidarymas nagrinėjamas (Sood ir Pecht, 2018) tyrime. Plokščių frezavimo staklių virpesiai gaminiui kelia du pagrindinius pavojus – frezuojamų ertmių geometrines paklaidas ir pašalinių jėgų bei vibracijų poveikį plokštei. Frezuojamos ertmės dėl netikslaus staklių darbo gali nepasiekti reikalaujamo tikslumo arba persislinkti į neapibrėžtą poziciją. Tokie reiškiniai gali pažeisti viduje esančius laidžius takelius, pažeisti ant plokštės montuotus komponentus. Dėl pjūvio paklaidos gali būti išpjaunamas netinkamo matmens kaklelis, kuris yra lengvai pažeidžiamas. Pašalinės jėgos ir vibracijos neigiamai veikia tokias jautrias ir silpnas vietas, jose nuo apkrovų gali susidaryti nuovargio įtrūkių. Anot minėto straipsnio autorių, „Vienas iš gedimų yra laidžių anodinių užpildų (CAF) susidarymas, kuris paprastai vyksta dviem etapais: dervos ir stiklo pluošto sankiba suardoma, po to prasideda elektrocheminė reakcija. Taip suirime sudaromas takas, kuriuo vyksta vario dalelių pernešimas dėl elektrocheminių reakcijų. Takas gali atsirasti dėl netinkamos stiklo apdorojimo technologijos, dėl stiklo pluošto hidrolizės arba dėl atsiradusių mechaninių įtempių.“. Šiame straipsnyje aprašomas anodinių užpildų susidarymas spausdintinės plokštės viduje. Užpildas, anot autorių, susidaro nuo staklių sukeliamų vibracijų ir pašalinių jėgų – poveikio zonose plokštės medžiaga yra suirusi. Elektroninės plokštės sudarytos iš stiklo pluošto, kuris yra trapus ir yra linkęs sutrūkinėti. Aplinkoje esanti drėgmė geba kauptis šiuose įtrūkiuose. Laikui bėgant drėgmės sankaupa susidaro pakankamo dydžio, kad galėtų perduoti elektros srovę. Jei ši sukauptos drėgmės zona atsiranda tarp dviejų skirtingą potencialą turinčių kontaktinių aikštelių, yra didelė tikimybė, kad prasidės elektrinė depozicija. Depozicijos metu drėgmės linija pradeda keliauti vario jonai, kurie išsiskiria iš plokštėje esančių vario jungčių ir litavimo aikštelių. Šie jonai nusėda įtrūkyje ir taip sudaro elektrai laidų tinklelį, kuris geba praleisti elektros srovę (2 pav.). Po kurio laiko šis tinklelis gali perduoti pakankamai srovės, kad gaminys išsiderintų ar net kiltų trumpasis jungimas. Pagrindinė tokių gedimų susiformavimo priežastis yra gamybos metu atsirandančios fizinės apkrovos arba naudojimo metu plokštę veikiančios jėgos. Tokio tinklelio susidarymas galimas įvairiose gaminio

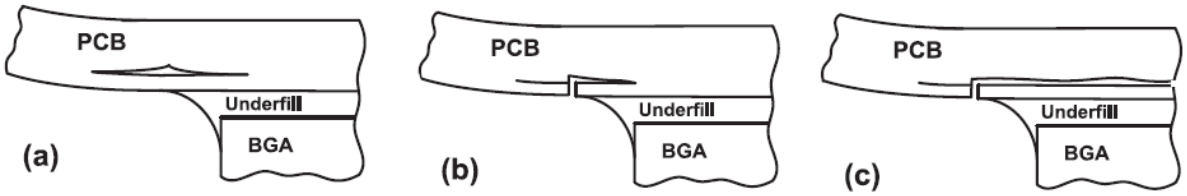
vietose ir susidarymo laikas priklauso nuo aplinkos drėgmės, temperatūros ir atstumo tarp skirtingo potencialo zonų. Sumažinus staklių vibracijas. sumažinama ir rizika, kad spausdintinėje plokštėje atsiras įtrūkiai ir prasidės anodinių užpildų susidarymas.



2 pav. Anodinis užpildas plokštės skerspjūvyje (Sood ir Pecht, 2018)

Elektronikos plokščių išsisluoksniavimas analizuojamas (Akbari, Nourani ir Spelt, 2017) tyrime. Išsisluoksniavimas įvyksta, kadangi spausdintinė elektronikos plokštė yra sluoksninės sandaros. Plokštę sudaro horizontalūs vario folijos segmentai, kurie vienas nuo kito yra atskiriami dielektriko – stiklo pluošto ir fenolio dervos. Gaminant gaminius ant šių plokščių lituojami komponentai naudojant litavimo pastą, kuri tepama ant aikštelių. Pakaitinus plokštę pasta pavirsta skystu metalu ir taip sudaromas elektrinis kontaktas. Litavimo pastoje įmaišyta antioksidacinė medžiaga ėsdina aikštelių oksidaciją ir palieka švarų paviršių, kad lydmetalis gerai sukibtų su aikštele. Lituojant mažas aikšteles naudojamas itin mažas pastos kiekis, todėl dėl kapiliarumo tarp komponento ir aikštelės susiformuoja lydmetalio kaklelis. Kuo pastos kiekis mažesnis, tuo kaklelis yra mažesnis. Ši vieta veikia kaip įtempių koncentratorius, todėl išauga tikimybė atsirasti lenkimo įtrūkiui. Paveikus plokštę jėga ar virpesiais šioje zonoje sukeliamas plokštės pažeidimas. Pažeidimo tipas priklauso nuo litavimo pastos kiekio. Esant dideliam pastos kiekiui įvyksta išsisluoksniavimas, esant mažam kiekiui – litavimo aikštelės atplyšimas (3 pav.). Šių gedimų formavimasis šaltinyje nagrinėjamas jėga veikiant realius bandinius ir simuliuojant poveikį baigtiniais elementais. Po tyrimų

rezultatai palyginami. Pagrindinė tokio gedimo priežastis yra išorinės apkrovos, vibracijos ir netikslūs pjūviai, kurie įvyksta per arti komponentų. Rezultatai rodo, kad plokštės atsparumas lūžimui gali padidėti iki 1,7 karto lyginant mažo ir didelio kaklelio efektus, tą patį rezultatą patvirtino ir baigtinių elementų tyrimas. Tiriant stakles, neįvertinus staklių pjūvių paklaidų ir sukeliamos mechaninės apkrovos, elektronikos plokštėse gali susidaryti toki sluoksnių lūžiai.



3 pav. Elektronikos plokštės išsisluoksniavimo etapai (Akbari, Nourani ir Spelt, 2017)

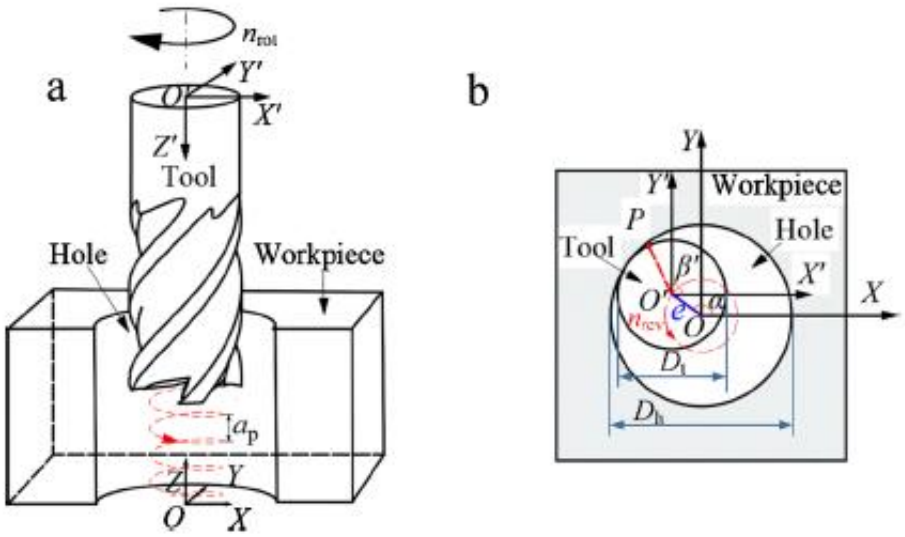
2.2.Frezavimo staklių ir gaminių tyrimo būdai

Spausdintinių plokščių kiaurymių matavimas su trimate matavimo mašina aprašomas (Wenbin, Ying, Hao, Chengyong, ir Lijuan, 2020) straipsnyje. Mašina naudoja rentgeno spindulius kiaurymės vidinio paviršiaus matavimui, todėl technologijos privalumas yra bekontaktis matavimas. Matmenų fiksavimo tikslumas siekia pusę mikrometro. Tradiciniai matavimai atliekami kontaktiniu būdu – žinomo matmens sfera priliečia gaminio paviršių ir piezokristaliniu jutikliu perduoda signalą į sistemą apie atsiradusį kontaktą su paviršiumi. Kontaktinio matavimo trūkumai:

- Matuojant kiaurymes liestuko sferos skersmuo turi būti mažesnis už mažiausią ertmės matmenį, kitu atveju – matavimo įrankis netilps.
- Matuojant turi būti atliktas mechaninis piezoelektrinio jutiklio sužadinimas. Atliekant prisilietimą matuojamas paviršius bus veikiamas tam tikros jėgos. Jėgos paveiktas paviršius deformuojamas – keičiamos charakteristikos.
- Klaidos galimybė. Matavimas atliekamas prisiliečiant prie paviršiaus taškų. Taškų skaičius nustatomas pagal parinktą metodiką. Parinkus per mažą matavimo zonų kiekį matmens neatitinkanti zona bus praleista ir neišmatuota. Parinkus didelį taškų skaičių matavimo procesas užtruks ilgai – procedūra brangsta.

Matuojant detalę erdviniu skanavimu su rentgeno spinduliais vertinama visos detalės geometrija ir paviršių šiurkštumas. Viena rentgeno matavimo mašina geba atlikti matavimus, kuriems reikia kelių tradicinių mašinų. Darbe buvo išmatuotos kiaurymės, kurių skersmuo 0,3 mm, gylis 1,7 mm ir skersmens tolerancija 20 mikronų. Išgręžtos kelios kiaurymės, kurių pozicija išdėstyta tinkleliu. Tyrimo imtis – 9 kiaurymės. Gauti rezultatai vertina kiaurymės skersmens, cilindriškumo,

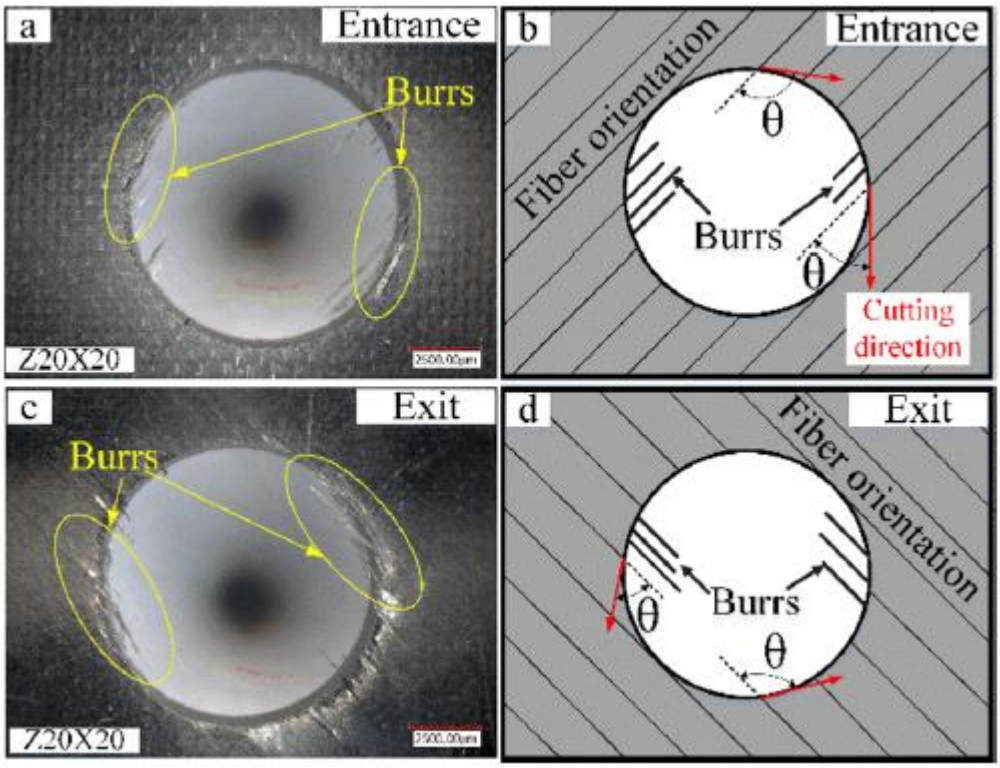
ašies pozicijos ir statmenumo nuokrypius 0,5 mikrometrų tikslumu. Šaltinyje naudojama metodika pritaikoma spausdintinių elektroninių plokščių frezavimo staklių pjūvio kokybei tikrinti.



4 pav. „Paprastojo frezavimo judesiai ir jėgos (a) trimatėje erdvėje (b) dvimatėje erdvėje“ (Liu et al., 2020)

Pluoštu sustiprintų kompozitinių medžiagų frezavimas taikant ultragarsą aprašomas (Liu et al., 2020) darbe. Kompozitinės medžiagos, minimos straipsnyje, panašios į magistro darbe tiriamose staklėse frezuojamas elektronikos plokštes. Kompozitinėms medžiagoms frezuoti pasitelktas ultragarsas, kuris sukelia frezavimo įrankio vibracijas ir taip padeda suardyti pluošto jungtis medžiagoje. Naudojant ultragarsą gaunamas lygesnis paviršius ir medžiaga mažiau išsisluoksniuoja lyginant su paprastuoju frezavimu (4 pav.). Norint pasiekti aukštą detalės tikslumą ultragarsinio generavimo parametrai griežtai kontroliuojami. Priklausomai nuo įrankio formos ir masės, įrankio vibracijų amplitudė keičiasi, tuo pačiu keisdama ir kiaurymių matmenis. Siekiant gauti virpesių neiškraipytus matmenims staklių judesiams įvedamos korekcijos, kurios kompensuoja virpesių pasekmes, taip gaunami norimo matmens pjūviai. Darbe akcentuojama, kad frezuojant pluoštu sustiprintas medžiagas neišvengiamas pluošto ištraukimas iš medžiagos. Pluošto ištraukimas yra vizualinis ir geometrinis apdirbto paviršiaus defektas kai medžiagą sudarantys plaušai yra ištraukiami į detalės išorę. Pluošto ištraukimas priklauso nuo audinio klojimo krypties medžiagoje, kadangi tai sąlygoja kokiu kampu audinio plaušas kontaktuos su frezos pjaunančiąja briauna. Gauti rezultatai rodo, kad pluošto ištraukimas vyksta tada, kai pluošto kryptis yra pasisukusi 45 laipsnių kampu nuo pjovimo krypties (5 pav.) tokiu atveju sukeliama didžiausia trinties jėga tarp plaušo ir frezos. Naudojant ultragarsinių virpesių generatorių staklėse ašinė pjovimo jėga sumažėja nuo 9 iki 35 procentų. Naudojant ultragarsinį virpesių sužadinimą apdirbtas paviršius tapo lygesnis ir pluošto

ištraukimas sumažintas. Šis šaltinis parodo, kad egzistuoja alternatyvus būdas suvaldyti virpesių keliamas paklaidas – keliami poslinkiai gali būti kompensuojami staklių valdiklio signalu.



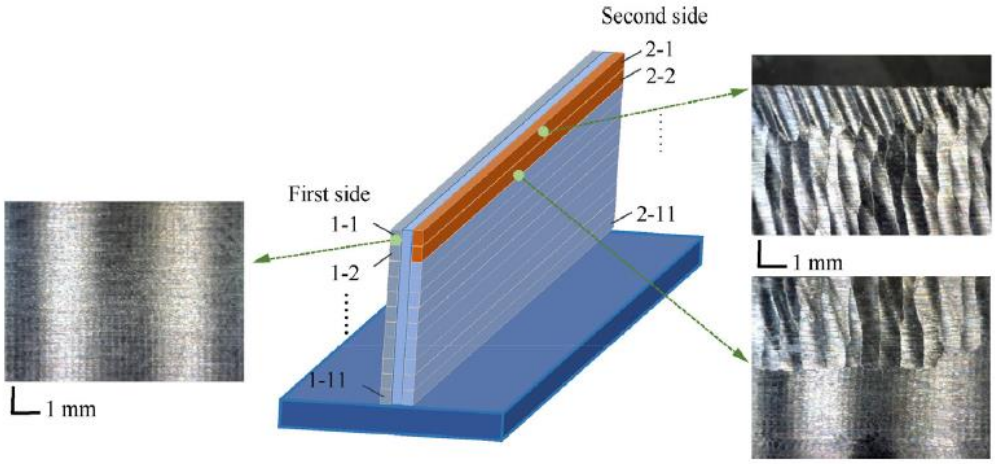
5 pav. Pluošto ištraukimas frezuojant (Liu et al., 2020)

VMD-ED (angl. *variational mode decomposition – energy distribution*, vertimas: variacinės modos išskaidymas – energijos pasiskirstymas) apdirbimo keliamų vibracijų aptikimo ir prognozavimo metodika analizuojama (Mou, Zhu, Jiang, ir Song, 2020), (Rubio-Mateos, Casuso, Rivero, Ukar ir Lamikiz, 2020) darbuose. Metodika lyginama su plačiai naudojama TCM (angl. *tool condition monitoring*, vertimas: įrankio būklės stebėjimas), MARMS-MV (angl. *moving average root mean square – mean value*, vertimas: judantis vidutinis kvadratinis vidurkis – vidutinės vertės), VMD-EE (angl. *variational mode decomposition – energy entropy*, vertimas: variacinio režimo skaidymas – energijos entropija) vibracijų prognozavimo metodika. Frezuojant plonasienius ir mažo standumo ruošinius įrankių vibracijos buvo fiksuojamos jutikliais. Jutikliai virpesių keliamus poslinkius paverčia į elektrinį signalą kurį priima kompiuterinė įranga, taip tyrimuose fiksuojami rodmenys.

Virpesių nuspėjimo sistemos tyrimas atliekamas (Mou, Zhu, Jiang ir Song, 2020) darbe. Tyrime faktiniai virpesių duomenys lyginami su prognozuotais duomenimis. Vertinamas nuspėjimo metodų tikslumas ir signalo apdorojimo greitis. Straipsnyje įrankio vibracijos aprašomas kaip neigiamą įtaką detalės kokybei darantis veiksnys, kadangi vibracijos energija yra perduodama į ruošinį, kuris taip

pat ima virpėti. Plonasienių ruošinių rezonansiniai dažniai yra artimi apdirbimo metu keliamų virpesių dažniui. Kad būtų išvengta rezonanso, apdirbimo parametrai keičiami dinamiškai, kad būtų pakeistas virpesių šaltinio dažnis į tokį, kuris nesutampa su ruošinio savuoju dažniu. Apdirbimo metu ruošinio forma keičiama, todėl keičiasi ir ruošinio savieji dažniai. Norint nenutraukiamai vengti rezonanso atsiradimo reikia aktyviai aptikti virpesių pasireiškimą ir automatiškai pakeisti parametrus, kurie nekeltų rezonanso. Straipsnyje teigiama: „Stabilaus frezavimo metu, daugiausia energijos sunaudojama siekiant išlaikyti suklio sukimosi greitį ir pasiekus suklio savuosius dažnius ši energija nuvedama į ruošinį“. Daroma išvada, jog didžiausi virpesių keliami poslinkiai kai ruošinio rezonansiniai dažniai sutampa su suklio arba frezavimo įrankio keliamų virpesių dažniais. Šių parametrų radimui pateiktos kelios skirtingos sistemos. Tyrimo rezultatai pateikiami grafikuose lyginant visų metodų skaičiavimų tikslumą ir greitį. Gauti rezultatai byloja, kad ištirtas VMDED metodas yra jautresnis, stabilesnis, užima mažiau laiko skaičiuojant nei kiti tirti metodai. VMDED metodas leidžia montuoti daviklius ant ruošinio tvirtinimo stalo – ruošinio vibracijų matavimo atžvilgiu tai yra tikslingiau, kadangi turima daugiau vietos daviklių montavimui ir laidų tvirtinimui. Šaltinyje matoma, kad didžiausią įtaką virpesių žadinimui turi didelę kinetinę energiją turintys elementai (greitaeigiai velenai, suklys, freza).

Skirtingo standumo vakuuminiai ruošinio tvirtinimo prietaisai analizuojami (Rubio-Mateos, Casuso, Rivero, Ukar ir Lamikiz, 2020) darbe. Straipsnyje iškelta problema – mažas apdirbimo našumas frezuojant plonasienes detales, todėl matuojamos prietaisuose sužadinamos vibracijos. Aeronautikos srityje dažnai tenka frezuoti detales iš lengvų aviacinių medžiagų. Dažnu atveju detalės yra didelės, tačiau jų sienelės plonos, kad būtų sumažinta masė. Frezavimo metu stengiamasi palaipsniui apdirbti ruošinį, kad jo standumas išliktų didelis. Plonėjant detalės sienelei jos savaiminių virpesių dažnis mažėja iki tokio lygmens, kad nuo apdirbimo įrankio kontakto sužadinamas rezonansas. Kad rezonavimas būtų sustabdytas, privaloma lėtinti apdirbimo greičius ir pastūmas, kitu atveju pasireiškia detalės poslinkiai, kurie mažina detalės tikslumą ir apdirbimo kokybę (6 pav.). Šaltinyje keliamas tikslas – minimizuoti vibracijas keičiant detalės laikiklio vibracijų slopinimo savybes. Šiame tyrime rasta, kad minkšto polimero NBR65 laikikliai gerai absorbuoja virpesius, kai pjovimo gylis yra 0,1 mm per pjaunančią briauną. Tačiau esant didelėms apkrovoms NBR65 leidžia detalei prarasti geometrinį tikslumą. Didesnis laikiklių standumas sudaro priešingą efektą ir standesnė NBR90 fikstūra įgauna pranašumą kai pjūvio gylis viršija 4 mm. Darbe pastebėta, kad plonėjant detalės sienelėms vibracijų žadinimas tampa vis mažiau priklausomas nuo detalės rezonansinių dažnių ir vis labiau priklausomas nuo įrankio rezonansinių dažnių bei pjaunančiųjų briaunų skaičiaus.

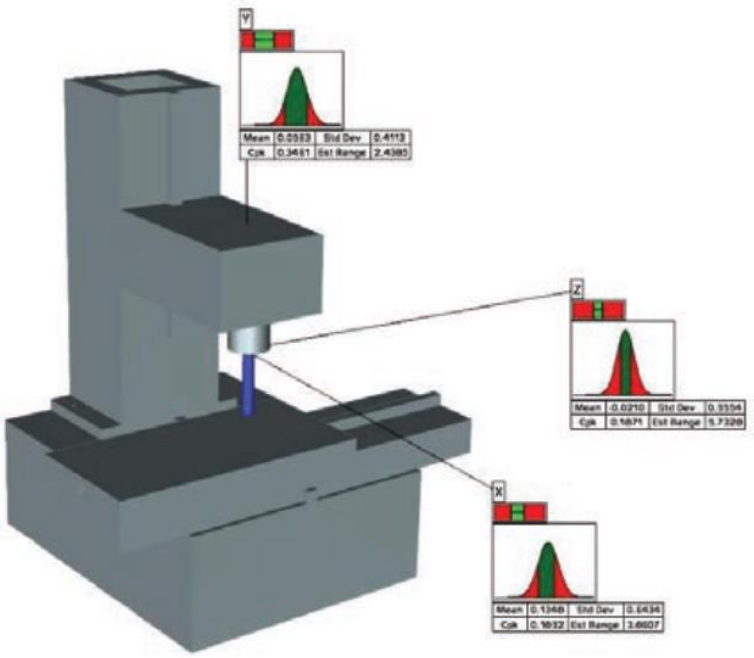


6 pav. Paviršiaus šiurkštumas frezuojant mažo standumo detalę (Mou, Zhu, Jiang ir Song, 2020)

Įrankių ir pjovimo režimų įtaka detalei iš stiklo pluošto nagrinėjama (Prashanth, Shankar, Hussain ir Reddy, 2017) darbe. Pjūvio gylis ir pastūma daroma įtaką pjūvio tikslumui ir medžiagos sluoksnių suardymui. Klaidingai parinkti parametrai sukelia detalės vibracijas ir ardo viduje esančio pluošto sluoksnius, kurie mažina detalės atsparumą ir geometrinį tikslumą. Tyrimai buvo atlikti naudojant greitapjūvio plieno, volframo karbido ir prilituoto kietmetalio plokštelių įrankiais. Eksperimente kaičiami parametrai: suklio kampinis greitis, pastūma ir pjūvio gylis, parinkimas buvo sudaromas pagal Taguchi metodiką. Naudojantis metodika išreikštas didžiausią įtaką darantis parametras, ištirta, kad didžiausią reikšmę pjūvio kokybei turi pjūvio gylis. Kuo mažesnis pjūvio gylis, tuo mažesnė įrankio virpesių amplitudė. Pastebėta, kad naudojant volframo karbido įrankį medžiagai padaryta mažiausia žala (vertinant išsisluoksniavimą). Su šiuo įrankiu gautas paviršiaus Ra šiurkštumas svyravo nuo 2 iki 5 mikronų. Verta pastebėti, kad darbe nėra akcentuojama, jog greitapjūvio plieno ir karbido įrankis turi keturias pjovimo briaunas, o įrankis su kietmetalio plokštelėmis turi dvi. Vadovaujantis prieš tai aptartų darbų įžvalgomis, mažo standumo sistemų vibracijos priklauso nuo įrankio ir suklio savaiminių dažnių, todėl verta atsižvelgti į pjovimo briaunų kiekį. Briaunų kiekis nurodo kiek vibracinių impulsų sistema patirs per vieną suklio apsisukimą, kitais žodžiais tariant – pjaunančiųjų briaunų kiekis ir suklio kampinis dažnis nurodo vibracijų žadinimo dažnį. Didžiausią įtaką frezavimo kokybei daro veiksniai, kurie eksponentiškai didina mechaninę sistemos energiją (didina greitį arba pasipriešinimo jėgą).

Procesas, kuris padėtų greičiau ir pigiau atlikti frezavimo staklių projektavimą ir gamybą aprašomas (Afkhamifar, Antonelli, ir Chiabert, 2016) straipsnyje. Procesas pagrįstas baigtinių elementų skaičiavimu. Sudarinėjama staklių projektavimo sistema, kuri atliktų baigtinių elementų bei sistemos geometrinių tolerancijų tyrimą. Sistema gebėtų iš anksto numatyti staklių tikslumą bei gebėtų nustatyti kokios turi būti staklių dalių geometrinės tolerancijos. Rašoma, kad kompleksinės tolerancijų grandinės skaičiavimas yra ilgas ir brangus procesas. Teoriškai apskaičiuotos tolerancijos

tikrinamos eksperimentiškai, todėl sudaromi dideli tyrimų kaštai. Šį procesą norima pakeisti automatizuotu skaičiavimu, kur programinė įranga gebėtų atrinkti optimalius detalių tikslumo parametrus, nes kiekvieno komponento tikslumas daro įtaką staklių darbui ir jų pagaminimo kainai. Geometrinių tolerancijų įtaka vertinama kinematinio tyrimo metu (7 pav.), taip numatomos mazgų sukeliamos paklaidos. Tuomet, gauti kinematiniai nuokrypiai gretinami su statinėmis paklaidomis – įlinkiais, kuriuos sukelia apkrovos ir terminis poveikis. Rašoma, kad projektuojant stakles tolerancijos parenkamos pagal apdirbimo galimybes, tuomet gaminami mazgų prototipai ir atliekami eksperimentiniai tyrimai kiekvieno mazgo parametrams išaiškinti. Ištirti mazgai sudedami į bandomąsias stakles. Atliekami staklių eksperimentiniai tyrimai ir stebimas staklių atsakas į apkrovas, vibracijas ir terminį poveikį. Jei bandomosios staklės pasiekia nustatytus parametrus, tuomet traktuojama, kad pirminis projektavimo etapas baigtas. Tokia darbo tėkmė, anot autoriaus, neefektyvi laiko ir kaštų atžvilgiu. Darbo apibendrinime pateikiamos pagrindinės staklių paklaidų sferos: matmenų ir geometrijos paklaidos, kinematinių elementų paklaidos, terminis poveikis, statinės ir dinaminės apkrovos.



7 pav. Staklių geometrinių tolerancijų analizė (Afkhamifar, Antonelli ir Chiabert, 2016)

Elektronikos plokštės vibracinio atsako analizė atliekama (Somashekar, Harikrishnan, Ahmed ir Kamesh, 2016) straipsnyje. Tyrimo tikslas yra sumažinti virpesių poveikį plokštei, kad veikiama įvairių jėgų kosminiame laive ji nesuirtų. Tiriami du plokščių dizaino pakeitimai: pirmasis pakeitimas – montavimo kiaurymių kiekis keičiamas iš 8 į 9. Antrasis pakeitimas – plokštės storis keičiamas iš

2,1 mm į 1,6 mm. Analizė atlikta naudojant baigtinių elementų metodą. Rezultatai verifikuoti sužadinant virpesius vibraciniu stendu ir išmatuojant virpesius su akcelerometrais. Straipsnyje rašoma, kad dažniausia plokščių gedimo priežastis yra blogas plokščių atsparumas smūgiams ir ciklinėms apkrovoms. Taip pat minima, kad didžiausias iššūkis apskaičiuojant plokštę yra jos modeliavimas, nes norint tiksliai sumodeliuoti plokštę, reikia tiksliai atkartoti kiekvieno komponento poziciją ir jo mechaninius parametrus. Detalus plokštės modeliavimas ir mechaninių parametrų pritaikymas užima daug laiko, todėl plokščių modeliai dažnu atveju yra paprastinami iki plokštės bazės. Komponentų įtaka atsparumui atspindima keičiant plokštės jungo modulį. Taip supaprastinus plokštę kompiuterinis modelis tampa netikslus ir reikia nuodugnių tyrimų, kurie patvirtintų supaprastinto modelio atitikimą realybei. Tyrimuose pateikiama, kad plokščių kompiuterinė simuliacija yra sudėtingas ir daug kruopštumo reikalaujantis procesas, nedidelės klaidos ir nesutapimai smarkiai keičia gaunamus rezultatus. Rezultatai rodo, kad pridėjus centrinį plokštės tvirtinimo tašką pirmasis plokštės rezonansinis dažnis padidėja 1,75 karto. Pamažinus plokštės storį vibracijos sukeliamos jėgos sumažėja apie šešis procentus. Baigtinių elementų skaičiavimų rezultatai palyginti su praktinių matavimų rezultatais – gautas dešimties procentų nukrypimas. Virpesių tyrimų rezultatams didelę įtaką daro objekto standumo parametrai, tvirtinimo paviršių parinkimas ir paviršių kontakto standumas.

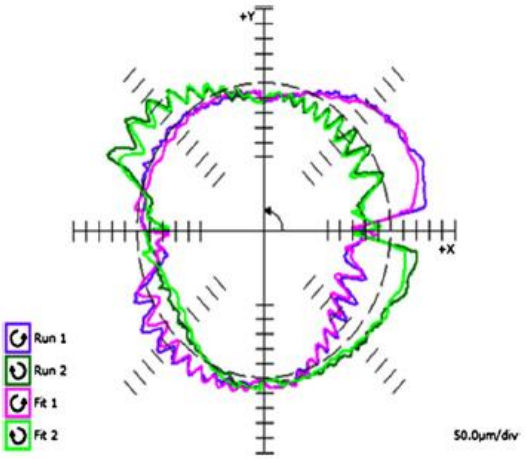
Frezavimo staklių įrankio vibracijų tyrimas atliekamas (Tatar ir Gren, 2008) darbe. Įrankio vibracijų nagrinėjimas atliekamas lazerinės vibrometrijos būdu. Matavimai atliekami tuo momentu, kai frezuojama medžiaga. Matuojant gaunami duomenys yra įrankio poslinkis lazerio spindulio kryptimi ir suklio veleno pasisukimo kampas. Naudojant šiuos rezultatus apskaičiuojamos pjovimo jėgos, įrankio virpesių sukelto poslinkio greitis ir vibracijų dažniai. Pasirinktas matavimo būdas yra pranašus tuo, kad rezultatai fiksuojami matuojant įrankio paviršių labai arti pjaunančių briaunų, nes kuo atskaitos vieta arčiau tiriamo poveikio zonos, tuo gaunami rezultatai yra tikslesni. Pagrindinis šaltinyje tiriamo metodo trūkumas yra toks, kad fiksuojamas atskaitos paviršius turi būti optiškai švarus, kitu atveju gaunami duomenys iškraipomi. Tyrime ši problema sprendžiama gaminant specialų žiedą su optiškai švariu ir kiek įmanoma geometriškai tikslesniu paviršiumi. Žiedas ant frezos užmaunamas naudojant terminį plėtimąsi. Įrankį sukant lėtai gauti netolygumo duomenys, kurie išfiltruojami iš tolimesnių tyrimo rezultatų. Pasak autoriaus: „Pjovimo įrankio vibracinis atsakas dažniausiai nustatomas suklio sukimosi greičio ir pjaunančiųjų briaunų kiekio funkcija“. Didžiausi įrankio įlinkiai atsiranda kai pjaunančioji briauna kontaktuoja su ruošiniu, kontakto zonoje atsirandanti pasipriešinimo ir trinties jėga deformuoja įrankį ir perduoda energiją į tolimesnius staklių mazgus. Vibracijos kelia didžiausią pavojų, kai vibracijų šaltinio dažnis sutampa su sistemos ar elemento savaisiais dažniais. Tokiu atveju vibracijų amplitudė smarkiai padidėja ir vibracijos

perduodamos per visą sistemą. Naudojant tokią matavimo metodiką galima surasti įrankio savuosius dažnius. Taip gali būti nustatomi darbiniai režimai, kurių derėtų vengti, kad žalingas vibracijų poveikis būtų sumažintas. Vibracijas taip pat sukelia cikliniai sukamieji judesiai. Pagrindinės šių virpesių priežastys – radialinis suklio arba frezos mušimas, disbalansas. Didėjant suklio kampiniam greičiui vibracijų žadinimo jėga didėja, tad didinant apdirbimo spartą gali būti padidinamos ir apdirbimo paklaidos. Kitos vibracijos kyla dėl neciklinių, atsitiktinių ar tam tikroje zonoje atsirandančių pasipriešinimo jėgų. Gauti duomenys parodė, kad vibracijos dažnis tiesiogiai priklauso nuo įrankio kampinio greičio ir pjaunančiųjų briaunų kiekio, o amplitudė nuo pjovimo pastūmų. Matavimo metodas lazeriu reikalauja ypatingai lygaus ir taisyklingos cilindro formos matavimo paviršiaus, kad būtų sumažinta gaunamo signalo tarša. Gaunamas optinis signalas buvo filtruojamas, kadangi matuojamo paviršiaus nelygumai, šiurkštumas ir radialinis mušimas iškraipo rezultatus. Šaltinyje minimi virpesių šaltiniai (įrankio briaunų pjovimo jėgos apdirbimo metu, suklio disbalansas, suklio veleno ir įrankio radialinis mušimas) ne tik sužadina įrankio vibracijas, bet daro įtaką ir dinaminiam staklių tikslumui.

Frezavimo parametrai tiriami (Zahaf ir Benghersallah, 2021) straipsnyje. Siekiama rasti kurie parametrai daro didžiausią įtaką detalės paviršiaus šiurkštumui. Tyrime frezuojamos detalės iš AISI 52100 plieno – pirmoji detalė gaminama iš grūdinto, antroji – atleisto, trečioji – atkaitinto plieno. Ruošinio vibracijos atsirandančios apdirbimo metu fiksuojamos naudojant pjezoelektrinius akcelerometrus. Anot autoriaus: „Paviršiaus šiurkštumo kitimas yra tiesiogiai proporcingas radialinės įrankio vibracijos dydžiui“. Įrankio vibracija sužadinama, kai frezos mechaninė kinetinė energija perduodama į ruošinį. Frezos pjaunančiosios briaunos išnaudoja šią energiją pjaunamos medžiagos suardymui. Kadangi pjaunančiosios briaunos ant frezos cilindrinio paviršiaus išdėstytos tolygiai – jos sukelia ciklinius impulsus. Cikliniai impulsai sukuria vibracijas, kurios kenkia paviršiaus šiurkštumui. Remiantis šaltiniu, vibracijos stipris priklauso nuo to kiek energijos sugeriama vienai briaunai pjaunant ruošinį. Tyrime rasta kurie parametrai daro didžiausią įtaką energijos sugėrimui, kai sugėrimas didelis – gaunamos didelės radialinės frezos vibracijos (šiurkštumas). Rezultatai – frezuojant minkštą plieną pjovimo gylis yra svarbiausias šiurkštumą lemiantis faktorius. Frezuojant kietas medžiagas – pastūmos dydis. Mažinant pjovimo gylį arba pastūmą apdirbtas paviršius tampa lygesnis. Daromos išvados, kad grūdintas plienas yra kietesnis ir standesnis, dėl to jis turi mažą slopinimo koeficientą ir gerai perduoda frezavimo įrankio pjaunančiųjų briaunų impulsus. Atkaitinto plieno atveju minkštesnė medžiaga sugeba slopinti impulsus, todėl didinant sąlyčio plotą geriau sugeriama pjovimo įrankio energija (sąlyčio plotas didėja, kai didėja pjūvio gylis). Apdirbto paviršiaus šiurkštumui didžiausią įtaką daro radialiniai įrankio poslinkiai.

Patobulintų portalinių staklių tikslumas tiriamas (Jalaludin et al., 2017) darbe. Autoriaus teigimu: „Apdirbimo klaidos lemia gaunamas matmenų paklaidas, kurios daro įtaką galutinio produkto kokybei“. Darbe matuojama staklių pozicionavimo paklaida (pozicijos atkartojamumas) X ašies kryptimi bei detalės paviršiaus kokybė prieš ir po pakeitimų. Šio tyrimo objektas yra portalinės frezavimo staklės. Staklių sijų judėjimas X ašies kryptimi buvo perdarytas perdarytas į kombinuotą suklio sijos ir staklių stalo judėjimą. Pagrindinė darbe iškelta hipotezė – pozicionavimo paklaidos didėja, kai didėja atstumas kurį turi nukeliauti staklių sijos. Daroma prielaida, kad pozicionavimo paklaida bus mažesnė, jei staklių judesys bus išskaidytas per du judančius mazgus (sijas), taip kiekvienas iš jų turės keliauti mažesnį atstumą. Darbe matuojami bei lyginami rezultatai prieš ir po pakeitimų. Pozicijos atkartojamumo matavimams buvo naudojami du pagrindiniai įrankiai: galinės padėties indikatorius ir teleskopinis linijinės padėties jutiklis. Šiurkštumo palyginimas daromas naudojant mikroskopą, kad būtų įvertinta ar papildomos sijos judėjimas nesukelia paviršiaus defektų. Indikatorius tvirtinamas ant suklio sijos ir ant ruošinio stalo prie nejudančio elemento. Matuojama judančio elemento galinė padėtis judant paskirtus atstumus. Matavimo atstumai parinkti nuo vieno iki aštuonių milimetrų žingsniu kas vieną milimetrą abejomis kryptimis. Iš viso gauta 16 rezultatų. Skirtumas tarp užprogramuoto ir faktinio judesio atstumo traktuojamas kaip pozicionavimo paklaida. Gauti rezultatai parodė, kad paklaidos dydis yra tiesiogiai priklausomas nuo judamo atstumo. Po pakeitimų Teleskopiniu linijinės padėties jutikliu buvo matuojamas staklių judesio trajektorijos atitikimas, klibėjimas ir variklių kalibracija. Staklės yra suprogramuojamos taip, kad judėtų apskritimine trajektorija erdvėje. Idealiu atveju judant apskritimine trajektorija aplink teleskopo galo sferą matavimo teleskopo pailgėjimas turėtų nevykti. Realioje situacijoje dėl paklaidų, staklių mazgų klibėjimo ir kalibracijos spragų poslinkis atsiranda. Gautas matavimo rezultatų grafikas (8 pav.), kuris nurodo judesio nuokrypį tam tikrose judesio vietose.

Backlash (µm)		
X	▶95.8	◀-90.4
Y	▲15.2	▼10.6
Reversal spikes (µm)		
X	▶-146.2	◀-74.8
Y	▲-5.6	▼-10.2
Lateral play (µm)		
X	▶-25.0	◀0.4
Y	▲-74.0	▼74.8
Cyclic error (µm)		
X	↑101.1	↓15.3
Y	↑12.8	↓11.5
Other features (µm)		
Servo mismatch	7.78ms	
Squareness	-13.4µm	
Straightness X	149.9µm	
Straightness Y	-51.4µm	
Scalling	-12.1µm	
Circularity	345.2µm	

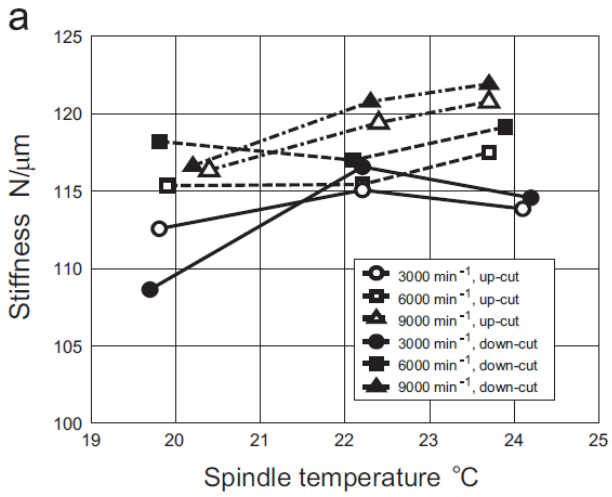


8 pav. Matavimų teleskopiniu linijinės padėties jutikliu rezultatai (Jalaludin et al., 2017)

Iš šių duomenų gaunami staklių paklaidų rezultatai ir atliekamas staklių tikslumo vertinimas. Šiomis staklėmis buvo apdirbtas ruošinys naudojant fiksuotus parametrus, viena siena naudojant tik Y sijos judesį, kita siena kombinuotos X sijos judėjimą. Ruošinio sienų šiurkštumas tada buvo tikrinamos žiūrint per mikroskopą, naudojant tą patį didinimo lygmenį. Šiame tyrime skirtumų tarp sienų paviršiaus šiurkštumų nebuvo pastebėta, tad teigiama, kad papildomos paklaidos ir klibėjimas neatsirado. Atlikus pakeitimą skersiniai poslinkiai judesio krypčiai sumažinti per 61,7 mikronus, tačiau apskritiminio judesio trajektorijos paklaida padidėjo 328,3 mikronais. Statinis staklių tikslumas (pozicijos atkartojamumas) padidėjo nuo dvigubo judesio sistemos įdiegimo. Tačiau dinaminis staklių tikslumas (trajektorijos tikslumas) nuo sistemos dvigubinimo stipriai sumažėjo. Dinaminės paklaidos pasireiškė nukrypus nuo X ašies linijos, todėl kritiškai svarbu dinaminius tyrimus atlikti visomis ašių kryptimis.

Frezavimo staklių suklio tyrimas aprašomas (Sarhan ir Matsubara, 2015) darbe. Siekiama ištirti suklio dinaminį standumą kintant suklio kampiniam greičiui bei suklio temperatūrai. Matavimams į suklį įmontuoti atstumo jutikliai, termoporos bei dinamometras apkrovai stebėti. Suklio temperatūros įtakai įvertinti pirmas suklio matavimas atliekamas nepjaunant medžiagos. Rezultatai matuoti sukliui sukantis 3 000, 6 000 ir 9 000 apsisukimų per minutę kampiniu greičiu. Naudojant tuos pačius režimus atlikti tolesni matavimai pjaunant medžiagą. Gauti rezultatai rodo, kad suklio standumas išlieka linijinis ir kinta nuo apkrovos. Temperatūros kitimas (19–25 laipsnių Celsijaus ruože) daro nykstamai mažą įtaką suklio standumui (9 pav.). Darbe dinaminis suklio standumo matavimas lyginamas su statiniu. Rašoma, jog dinaminis ir statinis metodai yra skirtingi bei matuoja skirtingus dalykus.

Statinis matavimas susietas su veleno įlinkiu ir suklio elementų persislinkimu. Dinaminis matavimas labiau susietas su suklio guoliuose naudojamos alyvos klampumu – klampi alyva sustandina judančią sistemą. Gauti rezultatai parodė, kad išmatuoti mažą standumą turintį mazgą galima tiriant abiem metodais. Priimta išvada, kad suklio temperatūros kitimas darbiniuose temperatūros rėžiuose daro nykstamai mažą įtaką suklio statiniam ir dinaminiam standumui.



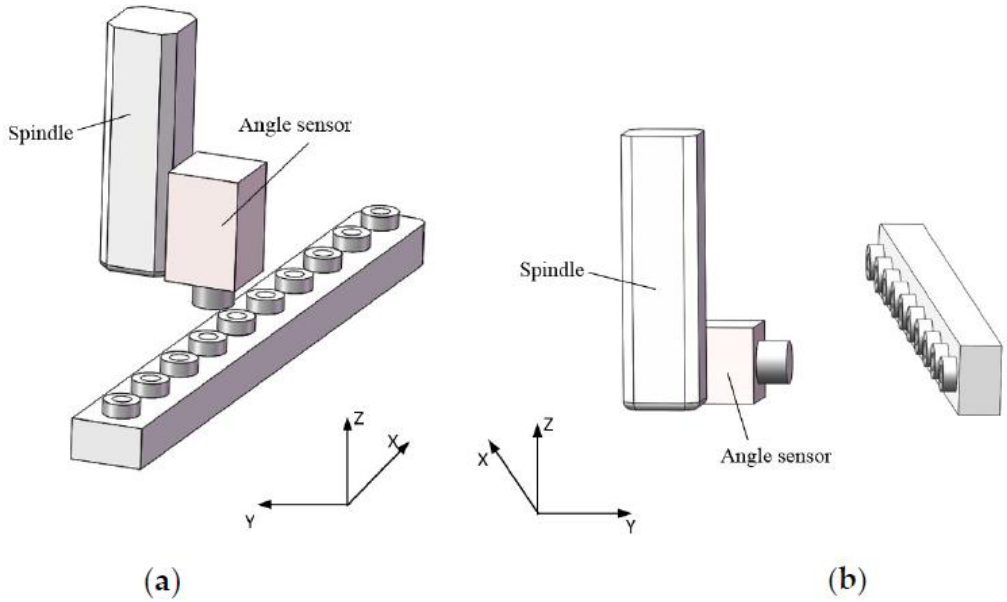
9 pav. Suklio standumo matavimų rezultatai naudojant skirtingus pjovimo parametrus (Sarhan ir Matsubara, 2015)

Staklių statinio standumo tyrimas atliekamas (Stejskal, Svetlík, Dovica, Demeč, ir Král, 2018) straipsnyje. Frezuojant medžiagas dėl pjovimo vietoje atsirandančių pasipriešinimo jėgų įlinksta ne tik įrankis, pjovimo jėga taip pat perduodama į kitus staklių mazgus: kreipiančiųjų bėgelius, pavaras, guolius, rėmą ir t. t. Kaip rašoma darbe „Dažniausiai daroma prielaida, kad staklių tikslumas ir našumas priklauso nuo jų statinio standumo“. Staklių standumas daro tiesioginę įtaką frezuojamų detalės paviršių matmenims, šis dydis parodo staklių mazgų poslinkius nuo juos veikiančios jėgos dydžio. Standumas tiriamas dviem būdais. Pirmasis būdas – statinis, kai prie ruošinio tvirtinimo stalo pritvirtinama virvė. Ji horizontaliai išvedama į staklių išorę ir permetama per standžiai įtvirtintą skriemulį, kad įgautų vertikalią poziciją. Ant šios virvės kabinami svarmenys, kurie simuliuoja apdirbimo metu atsirandančią apkrovą. Darbe tiriamose staklėse X ir Y ašių kryptimis juda ruošinio tvirtinimo stalas, Z ašies kryptimi juda suklys. Tirti standumą pasirinkta X ašies kryptimi, todėl apkraunamas staklių stalas. Apkrova (virvė) tvirtinama toje vietoje kur tvirtinamas ruošinys – ant spaustuvų, kurie prisukti prie stalo. Stalo poslinkio matavimai atliekami su lazeriniu interferometru. Iš viso naudotos 9 skirtingos apkrovimo jėgos nuo 15,01 N iki 173,70 N, apkrovimo ciklus kartojant po du kartus. Tokią metodiką galima naudoti su bet kuria kita sija, kurios standumą norima ištirti. Šiame tyrime klasikinis statinio standumo tyrimas lyginamas su modifikuotu standumo tyrimu (antras būdas). Pagrindinis modifikuoto tyrimo skirtumas lyginant su pirmuoju – standumas matuojamas

staigiai sustabdžius stalo judėjimą. Stalas judinamas X ašies kryptimi, tuomet staigiai sustabdomas. Tuo metu pamatuojama stalo pozicija. Tada nuo stalo nuimama apkrova ir atliekamas dar vienas pozicijos matavimas. Pozicijų matmenų skirtumas parodo stalo poslinkį sukeltą apkrovos. Gauti rezultatai iš abiejų testų buvo palyginti. Pastebėta, kad standumas gautas modifikuoto tyrimo metu (100 N / μm) yra tris kartus mažesnis negu klasikinio (300 N / μm). Rezultatai taip pat skyrėsi keičiant sijos judėjimo kryptį. Autorių manymu, kryptinis skirtumas atsiranda dėl guolių išdėstymo. Darbe atspindima, kaip smarkiai skiriasi statiniai ir dinaminiai staklių parametrai (3 kartus). Tyrimai turi būti kruopščiai parenkami pagal staklių paskirtį ir tyrimo tikslus, kadangi yra didelė rizika gauti netikslingus duomenis.

Naujas frezavimo staklių paklaidų matavimo sprendimas analizuojamas (Wei et al., 2019) darbe. Atliekami frezavimo staklių matavimai naudojant autoriaus sukurtą kalibravimo liniuotę (10 pav.). Gauti rezultatai lyginami su lazerinio interferometro matavimo rezultatais pagal ISO 10791 standartą, taip atliekamas įrankio validavimas. Standartas apibrėžia trijų ir penkių ašių frezavimo staklių tikslumo matavimo metodus. Liniuotė sudaryta iš kas 50 mm išdėstytų paraboloido formos veidrodžių. Matavimams atlikti papildomai reikalingas spindulio jutiklis ir šviesos šaltinis (dažniausiu atveju lazeris). Liniuotė yra tvirtinama ant staklių stalo, šviesos šaltinis ir jutiklis – ant suklio. Prietaisas geba nustatyti matuojamų staklių suklio pozicijos ir kampo pokytį jam judant liniuotės išilgine kryptimi. Prietaiso veikimo principas – šviesos spindulys nukreipiamas į liniuotės veidrodį, atsimušęs nuo jo sklinda atgal į spindulio jutiklį, šis procesas grindžiamas auto-kolimacijos principu. Dėl staklių geometrinių paklaidų judančio šaltinio spindulys krenta į veidrodį kintančiu kampu, todėl šaltinio atspindys jutiklyje fiksuojamas vis kitoje vietoje. Spindulio projekcijos poslinkis jutiklio plote yra tiesiogiai proporcingas staklių pokrypio paklaidoms. Kintant šviesos šaltinio atstumui iki artefakto, fiksuojamas šviesos sklidimo laiko pokytis, taip išaiškinama staklių linijinių judesių paklaida. Šie matavimo metodai yra tinkami matavimams pagal ISO 10791 standartą. Standarte rašoma, jog poslinkiams ir kampų kitimui matuoti naudojamos dvi atskiros procedūros, tačiau matavimas naudojant šią liniuotę leidžia kombinuoti šiuos du matavimus, prieš kiekvieną matavimą liniuotė turi būti sukalibruojama lazeriniu interferometru. Rašoma, kad šio prietaiso galimybės gali būti praplėstos sukombinavus dvi kalibravimo liniuotes. Anot autorius: „L formos kalibravimo įrankį būtų galima pagaminti liniuotes sujungus statmenai, taip būtų įvertinta dviejų krypčių informacija, kuri leistų išreikšti staklių ašių statmenumą“. Atlikus matavimus liniuotės ir interferometro rezultatai palyginti. Gauta, jog skirtumai yra nykstamai maži, todėl priimama prielaida, kad matavimai naudojant kalibravimo liniuotę yra teisingi. Pakeitus požiūrį į rezultatų gavimą, atrastas naujas matavimo metodas, kuris yra našesnis nei anksčiau naudotasis. Šis atradimas

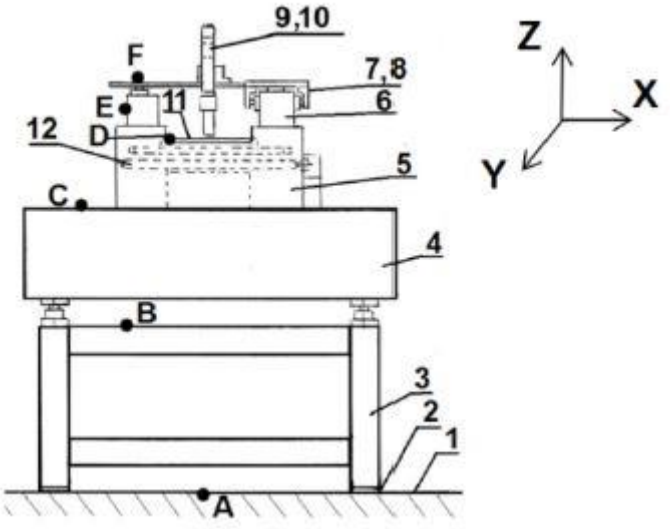
pabrėžia, kad svarbu pirmiausia suvokti darbo tikslą, tik supratus tikslą gali būti sukurtas našus metodas jam pasiekti.



10 pav. Matavimas naudojant vienmatį artefaktą (Wei et al., 2019)

Kampo matavimo komparatoriaus dinaminės charakteristikos tiriamos (Kasparaitis, Kilikevičius, Barakauskas, ir Mokšin, 2012) bei (Kilikevičius, Prokopovič ir Makarskas, 2013) darbuose. Šiuose tyrimuose matavimai atliekami naudojant „Brüel & Kjær“ LAN-XI Type 3660-D virpesių tyrimo įrangą. Matuojami komparatoriaus savųjų virpesių dažniai ir staklių vibracinis atsakas į technologinės įrangos sukeltas vibracijas rėme. Pirmame šaltinyje atliekamas rezonansinių dažnių tyrimas. Tiriama montuojant akcelerometrus ant reikšmingų vibracijų matavimo taškų – rėmo, stalo ir komparatoriaus sijų (11 pav.). Savaiminių virpesių analizė atlikta žadinant vibracijas staklių rėme ir stebint jų perdavimą į reikšmingus matavimo taškus. Gauti rezultatai apibūdinami autorių: „Rezultatai rodo, kad vertikaliąja kryptimi dominuoja 292–296, 361–365 ir 426 Hz ruožuose esančios amplitudės, o skersine kryptimi dominuoja 456–461 Hz ruože esančios amplitudės.“. Antrame šaltinyje atliekami virpesių matavimai, kuriuos sukelia tame pačiame pastate esanti technologinė įrangą. Matavimai atliekami tuose pačiuose reikšminguose vibracijų matavimo taškuose. Gauti rezultatai parodė, kad vibracijos, kurias technologinė įranga sukelia komparatoriaus rėme yra sunkiai perduodamos į granitinį stalą. Pastebėta, jog mažesnių nei 110 Hz virpesių amplitudė yra 1,66–8,23 karto didesnė nei aukštesnio dažnio. Įvertinus gautus rezultatus darbe buvo padaryta išvada, kad apčiuopiamą įtaką sistemos darbui daro tik vibracijos, kurių dažnių juosta yra 0–0,5 Hz. Taip pat padaryta gretutinė išvada, kad žemo dažnio vibracijoms įtakos nedaro vibracijų izoliavimas tarp rėmo

ir granitinio pagrindo. Darbe aprašoma detali metodika kaip atliekami dinaminiai tyrimai, naudojami veiksmai pagrindžiami. Informacija gali būti naudojama kaip dinaminių tyrimų vedlys.



11 pav. Reikšmingi vibracijų matavimo taškai (Kilikevičius, Prokopovič, ir Makarskas, 2013)

Šiame skyriuje išanalizuoti šaltiniai, kurie koncentruojasi į staklių paklaidas, dinaminius ir statinius staklių tyrimus, spausdintinių plokščių pažeidimus, bei įvairių apkrovų poveikį. Remiantis nagrinėtų šaltinių turiniu bei problematika grindžiama ir magistro baigiamojo darbo tyrimo metodika.

3. FREZAVIMO STAKLIŲ TEORINIAI TYRIMAI

Šiame skyriuje atliekami teoriniai elektronikos plokščių frezavimo staklių tyrimai. Gauti rezultatai parodo teorinius staklių suklio korpuso poslinkius, kuriuos sukelia skaičiavimuose aprašomi staklių virpesių šaltiniai.

3.1.Frezų savųjų virpesių teorinis tyrimas

Šiame poskyryje atliekamas frezų savųjų virpesių tyrimas, kad būtų įsitinkinta, jog frezos nesukelia papildomų frezavimo paklaidų. Tyrime apskaičiuojami frezų rezonansiniai dažniai, kuriuos pasiekus būtų sukeliamos papildomo frezų deformacijos – pjovimo briaunų poslinkiai. Tyrimo rezultatai leidžia sužinoti ar staklėse sukeliamas frezos rezonansas, jei sukeliamas, tuomet reikalingas virpesių poslinkio dydžio tyrimas, kad būtų išaiškintos papildomos paklaidos

Tyrimui parenkamos trys pagrindinės frezos naudojamos gamyboje: 1,6; 1,8 ir 2 mm skersmens (12 pav.). Tai yra pirštinės frezos pagamintos iš volframo karbido, jos skirtos kompozitinių medžiagų frezavimui. Pagrindiniai skirtumai tarp tiriamų frezų yra pjaunančiosios dalies skersmuo ir ilgis.



12 pav. "Kukurūzo" formos freza (nuotrauka iš „CNC rebuild“)

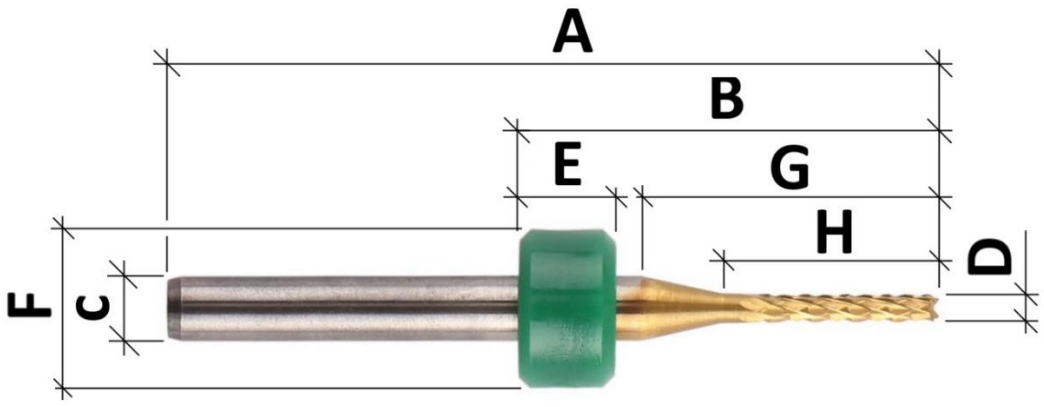
Norint atlikti modalinę frezų analizę pirmiausia reikia sudaryti jos kompiuterinį modelį. Modelio sudarymą vykdyti pasirinkta naudojant „Solidworks“ programinę įrangą, kadangi frezos geometrija yra sudėtinga ir jai atkurti turi būti naudojamos specialios modeliavimo funkcijos („Helix“, „Swept cut“, „Sketch driven pattern“) su kuriomis susipažinta tik šioje programinėje įrangoje. Skaičiavimas atliekamas „Ansys“ programine įranga, kadangi ji turi išplėstines baigtinių

elementų tinklo sudarymo parinktis bei leidžia sistemingai sudėlioti tyrimo eigą ir greitai atnaujinti rezultatus po pakeitimų.

Sudarant frezų modelius atliekami frezų matavimai. Matavimams naudojamas skaitmeninis mikrometras „Limit 23263-620“(padalos vertė 1 µm, tikslumas ± 6 µm (Limit, 2022)), kadangi mikrometru pasiekiamas didelis tikslumas, kai geometrija leidžia pasiekti matuojamus paviršius. Matavimams, kai paviršius pasiekti yra sudėtingiau naudojamas slankmatis „Holex 412751 150“(padalos vertė 10 µm, tikslumas ± 15 µm (6 priedas)). Matavimų rezultatai pateikiami 1 lentelėje pagal schemą, pavaizduotą 13 pav. C matmuo pateikiamas kaip skersmens vidurkis su minimaliu ir maksimaliu išmatuotu nuokrypiu nuo vidurkio. D matmens atveju matuotas skersmuo tarp pjaunančiųjų briaunų viršūnių.

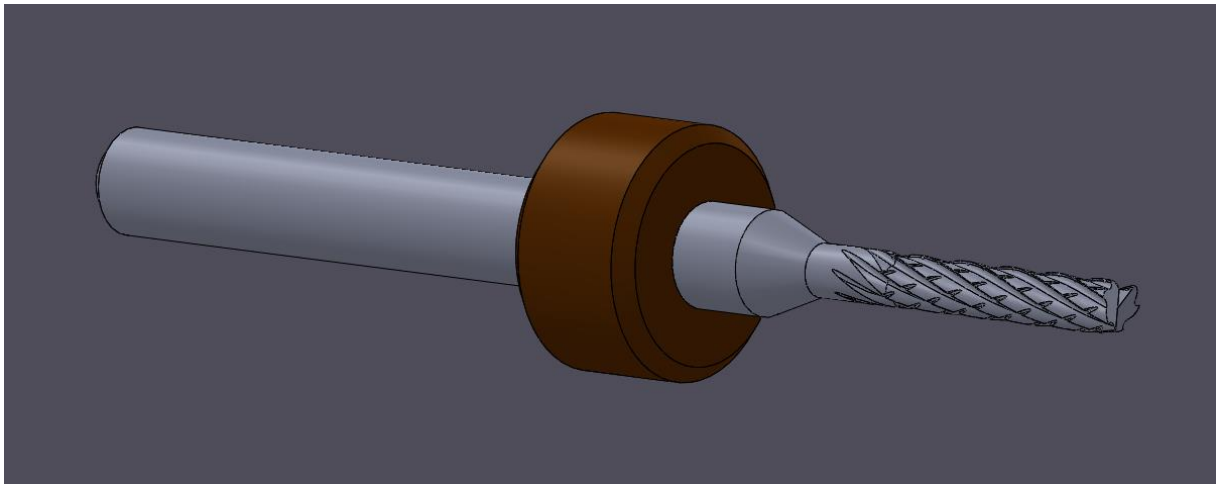
1 lentelė. Frezos matavimo rezultatai

Frezos skersmuo, mm	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm	E, mm	F, mm	G, mm	H, mm
⌀1,6	38,148	20,40	$\varnothing 3{,}169^{+0{,}000}_{-0{,}001}$	⌀1,600	4,525	⌀7,570	13,94	11,49
⌀1,8	38,137	20,38	$\varnothing 3{,}170^{+0{,}000}_{-0{,}000}$	⌀1,799	4,482	⌀7,536	13,48	11,39
⌀2,0	38,144	20,53	$\varnothing 3{,}172^{+0{,}000}_{-0{,}000}$	⌀1,995	4,506	⌀7,550	15,8	13,3



13 pav. Frezos matmenų schema. (modifikuota nuotrauka iš „Amazon“)

Naudojant „Solidworks“ programinę įrangą buvo sudaryti frezų modeliai (14 pav.). Modeliai buvo sudaromi naudojantis 2 lentelėje nurodytais matmenimis ir mikroskopu padidinto pjaunančiosios briaunos vaizdo nuotrauka, kadangi kitokios profilio matavimo priemonės nėra prieinamos. Iš viso sudaryti 3 modeliai, kurie atvaizduoja kiekvieną iš matuotų frezų.



14 pav. ⌀1,6 mm frezos modelis (modelį parengė darbo autorius)

Naudojant „Ansys“ programinę įrangą skaičiuojami frezų rezonansiniai dažniai. Šie dažniai skaičiuojami programoje nustačius, kad freza nuolat sukasi, jog būtų atspindėtos kuo artimesnės realybei sąlygos. Gamyboje naudojamas suklio kampinis greitis yra 24 000 apsisukimų per minutę. Šis greitis yra didžiausias leistinas staklių suklio greitis, jį naudojant gaunamas didžiausias staklių našumas, todėl tyrime jis naudojamas kaip pagrindinis parametras. Tyrimui parenkami trys papildomi kampiniai suklio greičiai, kad būtų įvertintas rezultatų kitimas nuo pagrindinio parametro. Parinkti 3 papildomi dažniai: 23 000, 22 000 ir 21 000 apsisukimų per minutę, kadangi tik tokiu žingsniu galima keisti šį parametrą staklėse ir dažniai žemesni nei 21 000 per daug sumažina proceso našumą.

Freza sudaryta iš dviejų detalių – plastikinio karoliuko, kuris skirtas nustatyti frezos ašiniam išsikišimui, ir frezos, kuri atlieka pjovimą. Plastikiniam karoliukui iš „Ansys“ medžiagų bibliotekos parenkama nailono (PA66) medžiaga, o frezai kaip nauja medžiaga aprašomas volframo karbidas pagal (AZoNetwork, 2022) pateikiamus duomenis (medžiagos tankis – 15880 kg/m^3; Jungo modulis – 600 GPa; Puasono koeficientas – 0,2).

Toliau sudaromas skaičiavimo tinklas. Tinklas sudaromas automatiniu būdų pagal standartinius programinės įrangos parametrus. Gauti visų modelių tinklai, kurie turi apie 20 tūkst. taškų ir 10 tūkst. elementų. Kiekviename iš modelių aprašoma, kad kotelio cilindrinis paviršius esantis priešingoje pusėje nei pjaunantysis paviršius yra standžiai įtvirtintas. Prie pradinių sąlygų pridedama minėta sukimosi greičio sąlyga, kurioje aprašomas kiekvienas iš minėtų kampinių suklio dažnių. Analizės kriterijuose parenkama, kad programa surastų 20 rezonansinių dažnių, kadangi tokiame skaičiuje rezultatų apskaičiuojamos bent 3 frezos linkimo, išilgines ir radialines rezonanso modos – matomas pilnas rezonansų spektras.

Atlikus skaičiavimus „Ansys“ programine įranga gaunami frezų vibracijų modų dydžiai. Rezultatai pateikiami 2–4 lentelėse. Pajuodintu tekstu pažymėti savaiminiai dažniai, kurie sukelia

frezos linkimo modas, kadangi linkimo modos sukelia didžiausius frezos poslinkius X ir Y ašių kryptimis.

2 lentelė. 1,6 mm skersmens frezos modalinės analizės rezultatai

	Rezonansinis dažnis ,Hz			
Rezonansinio dažnio eilės numeris	Sukliui sukantis 21 000 aps./min.	Sukliui sukantis 22 000 aps./min.	Sukliui sukantis 23 000 aps./min.	Sukliui sukantis 24 000 aps./min.
1	**8644,7**	**8644,7**	**8644,7**	**8644,6**
2	**8665,8**	**8665,8**	**8665,8**	**8665,8**
3	**29199**	**29199**	**29199**	**29199**
4	**29541**	**29541**	**29541**	**29541**
5	42208	42208	42208	42208
6	**56425**	**56415**	**56404**	**56394**
7	**56856**	**56866**	**56876**	**56886**
8	59841	59841	59841	59840
9	**62702**	**62700**	**62697**	**62695**
10	**62872**	**62875**	**62877**	**62879**
11	**67868**	**67868**	**67867**	**67867**
12	**67966**	**67967**	**67968**	**67968**
13	70592	70577	70562	70547
14	71227	71243	71258	71273
15	83559	83559	83559	83559
16	91401	91402	91402	91403
17	95871	95857	95843	95828
18	96476	96491	96505	96519
19	99957	99957	99956	99956
20	100010	100010	100010	100010

3 lentelė. 1,8 mm skersmens frezos modalinės analizės rezultatai

	Rezonansinis dažnis ,Hz			
Rezonansinio dažnio eilės numeris	Sukliui sukantis 21 000 aps./min.	Sukliui sukantis 22 000 aps./min.	Sukliui sukantis 23 000 aps./min.	Sukliui sukantis 24 000 aps./min.
1	**8996,9**	**8996,9**	**8996,9**	**8996,9**
2	**9041,6**	**9041,6**	**9041,6**	**9041,6**
3	**29273**	**29273**	**29273**	**29273**
4	**29617**	**29617**	**29617**	**29617**
5	42742	42742	42742	42742
6	**57674**	**57662**	**57650**	**57638**
7	**58186**	**58198**	**58210**	**58222**
8	60430	60430	60429	60429
9	**64321**	**64321**	**64321**	**64320**
10	**64479**	**64480**	**64480**	**64480**
11	**71192**	**71177**	**71163**	**71148**
12	**71376**	**71376**	**71376**	**71375**
13	71621	71621	71622	71622
14	71858	71873	71887	71902
15	80594	80594	80594	80594
16	92370	92371	92371	92372
17	96558	96544	96530	96517
18	97191	97205	97219	97233
19	100780	100780	100780	100770
20	101270	101270	101270	101270

4 lentelė. 2 mm skersmens frezos modalinės analizės rezultatai

	Rezonansinis dažnis ,Hz			
Rezonansinio dažnio eilės numeris	Sukliui sukantis 21 000 aps./min.	Sukliui sukantis 22 000 aps./min.	Sukliui sukantis 23 000 aps./min.	Sukliui sukantis 24 000 aps./min.
1	**7519,6**	**7519,6**	**7519,6**	**7519,6**
2	**7539,9**	**7539,9**	**7539,9**	**7539,9**
3	**31631**	**31631**	**31631**	**31631**
4	**31866**	**31867**	**31867**	**31867**
5	42618	42618	42618	42618
6	**56693**	**56682**	**56671**	**56660**
7	**57160**	**57171**	**57182**	**57193**
8	60264	60264	60263	60263
9	**63937**	**63936**	**63934**	**63933**
10	**64044**	**64045**	**64047**	**64048**
11	**69423**	**69423**	**69423**	**69423**
12	**71054**	**71039**	**71025**	**71010**
13	71714	71728	71743	71758
14	72256	72256	72255	72255
15	72456	72457	72457	72458
16	91873	91874	91874	91875
17	96398	96384	96370	96356
18	97029	97042	97056	97070
19	99145	99145	99145	99145
20	100500	100500	100500	100500

Iš gautų rezultatų matoma, kad frezos kampinių dažnių kitimo įtaka rezonansiniams dažniams yra nykstamai maža. Taip pat matoma, kad savieji dažniai yra dešimtimis kartų didesni negu suklio darbinis dažnis (400 Hz). Frezos rezonansą sužadinti galėtų tik 19-oji ir tolimesnė suklio virpesių harmonika, tokios sužadintos vibracijos būtų nykstamai mažos todėl priimama, kad frezų rezonansas neįvyks.

3.2. Suklio veleno mušimo jėgos tyrimas

Šiame poskyryje aprašomas suklio mušimo jėgos tyrimas. Tyrimu nustatomas pagrindinis virpesių žadinimo parametras – virpesių žadinimo jėga. Čia gauti rezultatai toliau naudojami kaip pradiniai parametrai skaičiuojant staklių vibracijas „Ansys“ programinėje įrangoje.

Šiame etape tiriamas frezavimo staklių suklio „GDZ80X73-2.2“ (15 pav.) velenas.



15 pav. Suklys GDZ80X73-2.2 (darbo autoriaus nuotrauka)

Suklio parametrų lentelė pateikta ant suklio korpuso. Parametrų sąrašas pateikiamas 5 lentelėje.

5 lentelė. Suklio GDZ80X73-2.2 parametrai

Nr.	Parametras	Vertė
1	Įtampa	220 V
2	Kampinis dažnis	400 Hz
3	Kampinis dažnis	24 000 aps./min.
4	Galia	2,2 kW
5	Srovės stipris	6 A
6	Polių skaičius	2
7	Aušinimas	Oru (savaiminis)
8	Darbo režimas	S1 (pastovus)

Mušimo jėga skaičiuojama, kai suklys sukasi skirtingais kampiniais greičiais: 21 000, 22 000, 23 000, ir 24 000 apsisukimų per minutę. Eksperimentiniu būdu frezuojant gaminius nustatyta, kad didžiausias našumas ir pjūvio tikslumas gaunamas, kai naudojamas 24 000 apsisukimų per minutę

kampinis greitis, todėl nuspręsta tyrimą atlikti naudojant šį kampinį greitį. Papildomi greičiai parinkti tam, kad būtų matoma, kokią įtaką virpesiams daro suklio greičio kitimas.

Pirmiausia nustatomas veleno disbalansas, kadangi šis dydis turi būti įvedamas į „Ansys“ programinę įrangą mušimo jėgai apskaičiuoti. Mušimo jėga toliau naudojama staklių vibracijų teoriniame tyrime aprašant virpesių šaltinius.

Veleno disbalansui matuoti naudojama „EBS“ gamintojo horizontali rotorių balansavimo mašina „R10B-VS“ (16 pav.), matavimo tikslumas 0,2 g*mm (EBS Balancing Machine, 2022).



16 pav. EBS R10B-VS horizontali rotorių balansavimo mašina (nuotrauka iš: „EBS rotor balancing machine“)

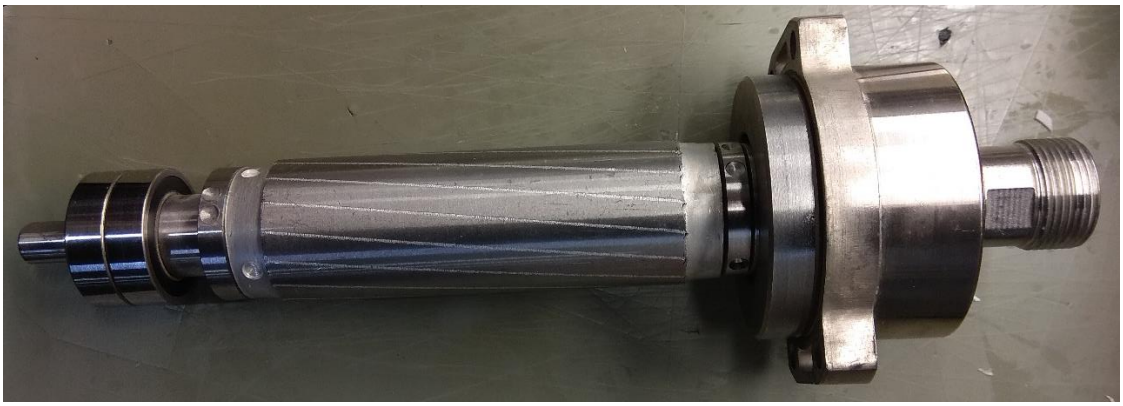
Matavimas atliktas veleną tvirtinant staklėse ant jo cilindrinių paviršių guolių montavimo vietose. Išmatuotas disbalansas 99,4 g*mm.

Veleno masė 1,78 kg (gauta naudojant „Solidworks“ programinę įrangą). Vadovaujantis ISO 21940 standartu (Geneva, Switzerland Patento Nr. ISO 21940-12:2016, 2016) staklių suklio veleno balansavimo klasė turėtų būti G 2,5 (0,70–1,77 g*mm). Tačiau išmatuotas veleno mušimas yra

priskiriamas G 250 balanso klasei (G 250 klasės disbalanso diapazonas 70,8–177,0 g*mm 1,78 kg masės velenui).

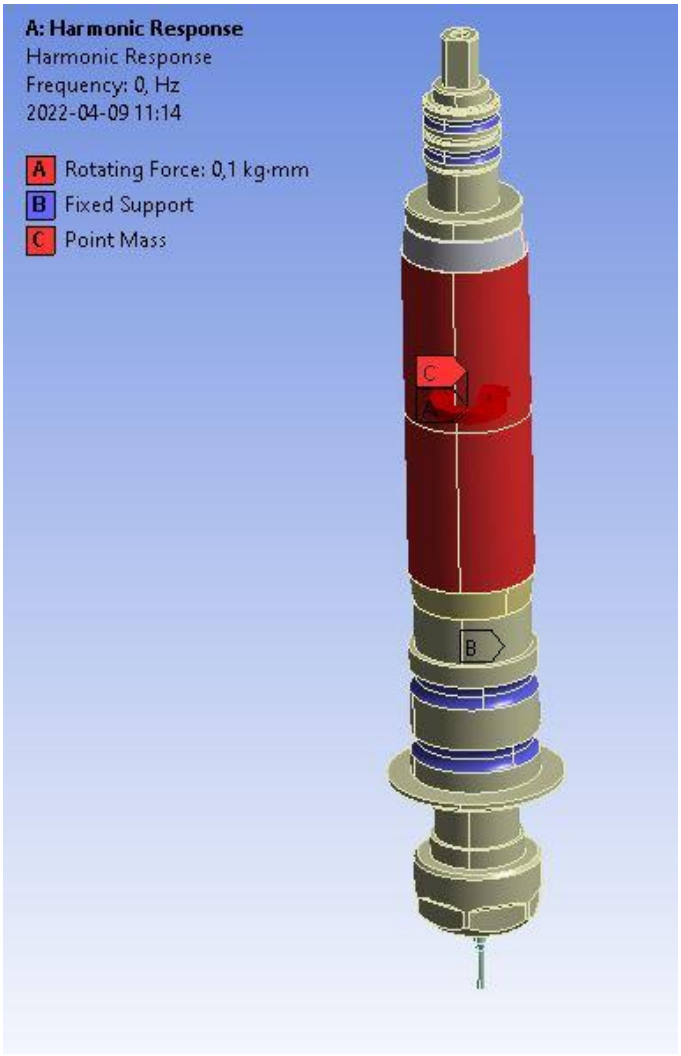
Skaičiavimams skirtas veleno modelis, kurio nuotrauka pateikiama 17 pav., sudarytas naudojant „Solidworks“ programinę įrangą.

Ant veleno guolių rasti žymenys „SKF 6002“ ir „SKF 62205“, naudojantis šia informacija 4.3 poskyryje skaičiuojamas guolio išdilimo ciklinis dažnis.



17 pav. Suklio velenas (darbo autoriaus nuotrauka)

Toliau modelis keliamas į „Ansys“ programinę įrangą, kur atliekami skaičiavimai. Tiriamas tik velenas, suklio dalys, kurios nėra standžiai sutvirtintos su velenu atmetamos, kadangi jos nedaro įtakos veleno radialinio mušimo jėgai. Veleno radialinio mušimo jėgos skaičiavimas atliekamas nurodžius išmatuotą mušimo dydį (99,4 g*mm) ir tyrimui parinktus kampinius sukimosi dažnius: 21 000, 22 000, 23 000 ir 24 000 apsisukimų per minutę (18 pav.).



18 pav. Veleno modelis su jėgų vektoriais (modelį parengė darbo autorius)

Gauti mušimo jėgos rezultatai pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Veleno mušimo jėgos rezultatai

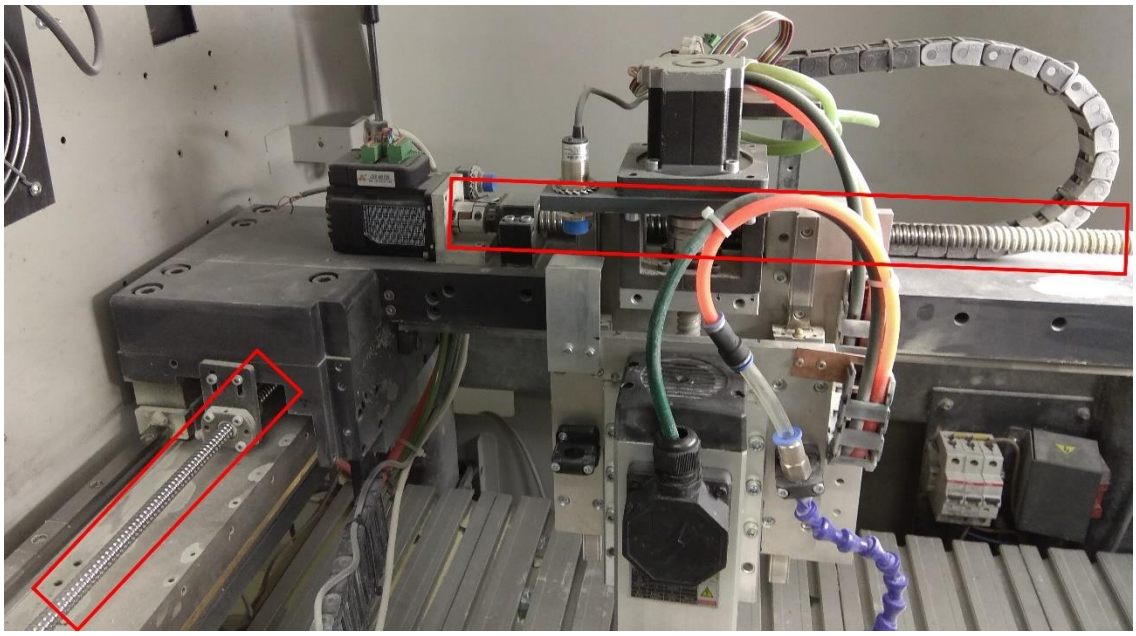
Nr.	Veleno kampinis sukimosi dažnis, Hz	Radialinio mušimo jėga, N
1	21 000	487,38
2	22 000	535,3
3	23 000	585,54
4	24 000	638,09

Šiame poskyryje teoriškai apskaičiuota veleno mušimo jėga, kurią sukelia veleno disbalansas. Gauti jėgos dydžiai naudojami 3.4 poskyryje staklių vibracijų šaltiniams aprašyti.

3.3. Varančiųjų sraigtų mušimo jėgos tyrimo metodologija

Šiame poskyryje aprašomas sijas varančių sraigtų mušimo jėgos tyrimas. Tiriant nustatomas pagrindinis virpesių žadinimo parametras – virpesių žadinimo jėga. Gauti duomenys naudojami kaip pradiniai parametrai 3.4 poskyryje skaičiuojant staklių vibracijas „Ansys“ programine įranga.

Tiriami X ir Y sijas varantys sraigtai, kurie yra pažymėti raudonais keturkampiais 19 pav. Jų mušimas sudaro ciklines jėgas, kurios žadina staklių virpesius.



19 pav. X ir Y sijas varantys sraigtai (darbo autoriaus nuotrauka)

Staklėse naudojami „Hiwin“ RBS-R12 (ø12 mm) ir RBS-R16 (ø16 mm) varantieji sraigtai, kurių tikslumo klasė „C5“. Gamintojas deklaruoja, kad šių sraigtų radialinis išorinio cilindrinio paviršiaus mušimas negali viršyti 16 µm (4 priedas). Kad būtų žinoma dabartinė sraigtų būklė, atliekamas mušimo matavimas. Varančiųjų sraigtų mušimo dydžiai matuojami „Mitutoyo 2046S“ indikatoriumi (20 pav.), matavimo tikslumas ± 0,013 mm (Mitutoyo America Corporation, 2022). X sijos sraigto ilgis tarp guolių – 700 mm, Y sijos – 640 mm. Matuojama penkiose vienodo ilgio atkarpose sraigtus sukant ranka, kai indikatoriaus liestukas yra atremtas į sraigto cilindrinį paviršių, kad būtų sužinota kiek ir kuriose vietose esančių įlinkių žadina virpesius.



20 pav. Indikatorius „Mitutoyo 2046S“ (darbo autoriaus nuotrauka)

Atlikus matavimus gauti sraigtų radialinio mušimo dydžiai:

- Išmatuotas X sijos sraigto (RBS-R16) radialinio mušimo dydis 0,79 mm.
- Išmatuotas Y sijos sraigto (RBS-R12) radialinio mušimo dydis 2,01 mm.

Didžiausia sraigtų radialinio mušimo vertė pasiekiama vidurinėje dalyje, vienodu atstumu nuo sraigtų galų. Daroma išvada, kad sraigtai yra išlinkę ties viduriniaja dalimi, todėl sraigtų radialinio mušimo ekstremumai pasiekiami vieną kartą per apsisukimą. Priimama sąlyga, kad virpesių cikliškumai lygūs sraigtų apsisukimų dažniams.

Sraigtų keliamų vibracijų cikliškumas skaičiuojamas pagal formulę:

$$\nu = \frac{f}{p \times 60}; \quad (1)$$

Čia: ν – ciklinis dažnis, Hz; f – pastūma, mm/min; p – sraigto žingsnis, mm.

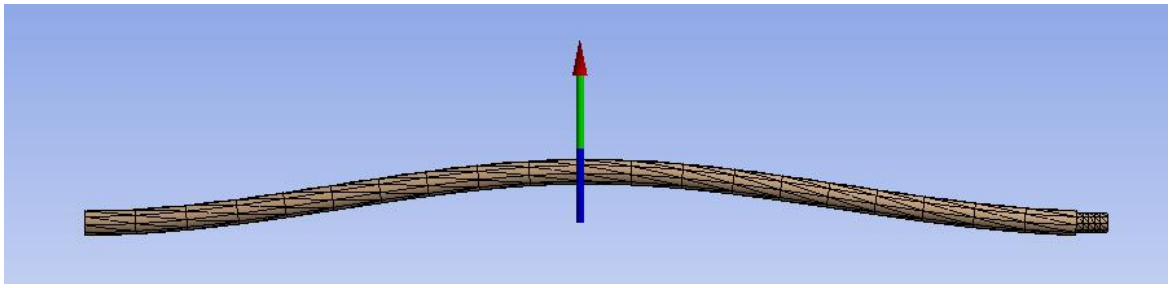
Iš staklių konstrukcijos žinoma, jog abiejų sraigtų žingsniai „p“ yra 5 mm.

$$\frac{400}{5 \times 60} = 1{,}333\ Hz; \quad (2)$$

$$\frac{500}{5 \times 60} = 1{,}667\ Hz; \quad (3)$$

$$\frac{400}{5 \times 60} = 2\ Hz; \quad (4)$$

Sraigtų modeliai sudaromi naudojant „Ansys“ programinę įrangą, kadangi geometrija yra pakankamai nesudėtinga ir jai sudaryti nereikalingos sudėtingos funkcijos. Mušimo jėga gaunama „Ansys“ programinėje įrangoje apskaičiuojant susidarančią reakcijos jėgą kai sraigtas išlenkiamas per išmatuotą mušimo dydį ir sukamas apskaičiuotais kampiniais dažniais (21 pav.).



21 pav. Sraigto reakcijos jėgos skaičiavimas (modelį parengė darbo autorius)

Apskaičiuota, kad deformuojant X sijos sraigtą 0,79 mm gaunama deformacijos jėga lygi 372,19 N. Deformuojant Y sijos sraigtą 2,01 mm – 231,24 N. Pastebėta, kad sraigtų sukimosi greičio pokytis daro nykstamai mažą įtaką jėgoms, todėl tokia pati jėga gauta visoms pastūmoms. Rezultatai naudojami 3.4 poskyryje staklių ciklinių vibracijų šaltiniams aprašyti.

3.4. Staklių virpesių teorinis tyrimas

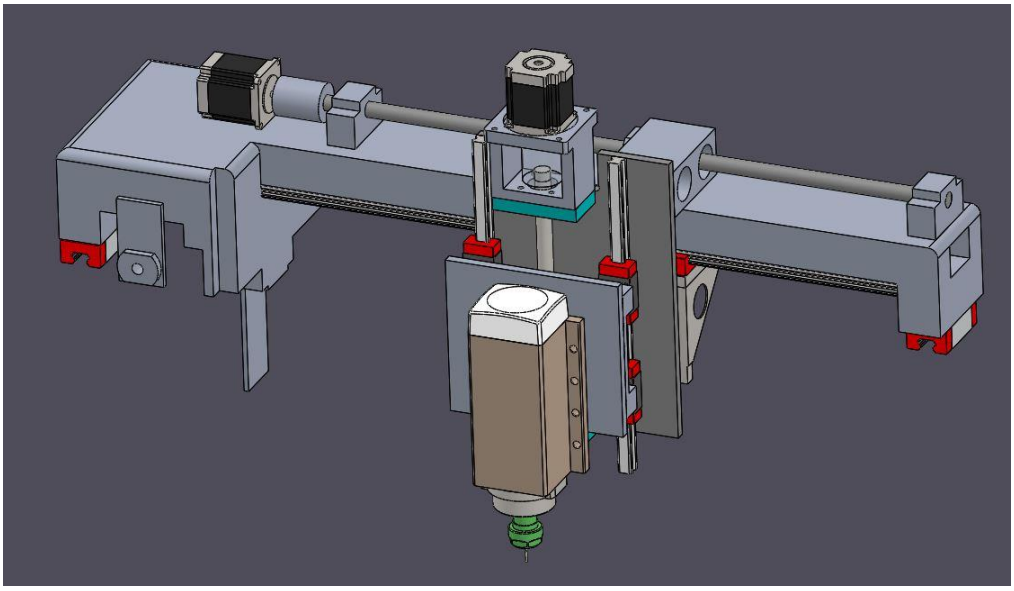
Šiame poskyryje aprašomas staklių virpesių skaičiavimas. Gauti rezultatai parodo kokio dydžio poslinkius sukelia X, Y sijų ir suklio vibracijos. Rezultatai yra teoriniai – sąlygojami kaip tiksliai kraštinės sąlygos aprašo tiriamą situaciją. Gauti duomenys naudojami praktiniams rezultatams palyginti.

Šiame tyrime atliekamas teorinis vibracijų sukeliamų poslinkių skaičiavimas naudojant „Ansys“ programinę įrangą. Gaunami rezultatai parodo kokia amplitude vibruoja frezos galiukas ir suklio korpusas kai:

1) X sija juda 400, 500, 600 milimetrų per minutę pastūma.
2) Y sija juda 400, 500, 600 milimetrų per minutę pastūma.
3) Suklys sukasi 21 000, 22 000, 23 000, 24 000 apsisukimų per minutę kampiniais dažniais.

Gamybos metu eksperimentiškai nustatyta, kad naudojant 500 mm / min. pastūmą pasiekiamas didžiausias staklių našumas ir frezos naudojimo laikas. Papildomai parinktos dvi pastūmos, kurios parodys kokią įtaką virpesiams turi pastūmos kitimas.

Skaičiavimams sudaromas teorinis staklių modelis (22 pav.) naudojant „Solidworks“ programinę įrangą.



22 pav. Teorinis staklių „Supra M“ modelis (darbo autoriaus nuotrauka)

Skaičiavimai atliekami naudojant „Ansys“ programinę įrangą. Staklių dalių medžiagų atitikmenys parenkami standartinėje programos medžiagų bibliotekoje. Skaičiavimuose anksčiau aprašyti judesio parametrai vertinami kaip atskiri atvejai, kad būtų žinomi kiekvieno virpesių šaltinio atskirai sukelti poslinkiai.

Pirmiausia atliekama modalinė analizė, šie rezultatai leidžia išaiškinti poslinkių atsiradimo priežastis, kadangi tuomet matoma ar virpesių šaltinio dažniai sutampa su staklių rezonansiniais dažniais. Analizė atliekama 0–1500 Hz diapazone, kad būtų galima įvertinti, ar atsiranda virpesių harmonikų poveikis. Jei virpesių šaltinių harmonikos sutampa su staklių rezonansiniais dažniais, tuomet bus daroma išvada jog atitinkamo parametro reikia vengti. Pasirinktas diapazonas leidžia matyti tris harmonikas kurias gali sukelti suklys besisukdamas 24 000 aps. / min. (400 Hz) dažniu, priimama, kad tolimesnių harmonikų keliami poslinkiai bus nykstamai maži lyginant su vibracijų šaltinių keliamais poslinkiais ir didesnio diapazono imti nėra prasmės. Gauti rezonansinių virpesių rezultatai pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. Staklių modalinės analizės rezultatai

Rezonansinio dažnio Nr.	Dažnis, Hz	Rezonansinio dažnio Nr.	Dažnis, Hz
1	41,72	16	716,78
2	75	17	746,24
3	133,67	18	818,05
4	159,06	19	846,07
5	192,28	20	895,44
6	248,27	21	930,09
7	287,18	22	961,95
8	317,18	23	967,61
9	330,38	24	976,26
10	414,57	25	1075,7
11	450,81	26	1091,1
12	550,28	27	1160,1
13	581,57	28	1213,1
14	629,89	29	1316,9
15	663,44		

Gauti dažniai parodo, kokie virpesių dažniai kelia staklių rezonansą (virpesių poslinkių sustiprėjimą).

Toliau atliekamas harmoninio atsako skaičiavimas, kuris parodys vibracijų šaltinių sukeltus staklių mazgų poslinkius.

Staklių sijose naudojamos linijinės kreipiančiosios – Y sijai HG-20C , X sijai – HG-15C. Pagal (HIWIN, 2022) kataloge pateikiamus duomenis kreipiančiųjų HG-20C standumas 250 N/mm, HG-15C – 200 N/mm. Šie duomenys naudojami „Ansys“ programinėje įrangoje aprašant kreipiančiųjų standumą.

„Ansys“ programinėje įrangoje vibracijų šaltiniams aprašyti naudojami dydžiai gauti 3.2 ir 3.3 poskyriuose:

X sijos sraigto mušimo jėga 372,19 N, kai pastūma 400, 500 ir 600 milimetrų per minutę.

Y sijos sraigto mušimo jėga 231,24 N, kai pastūma 400, 500 ir 600 milimetrų per minutę.

Suklio veleno mušimo jėga:

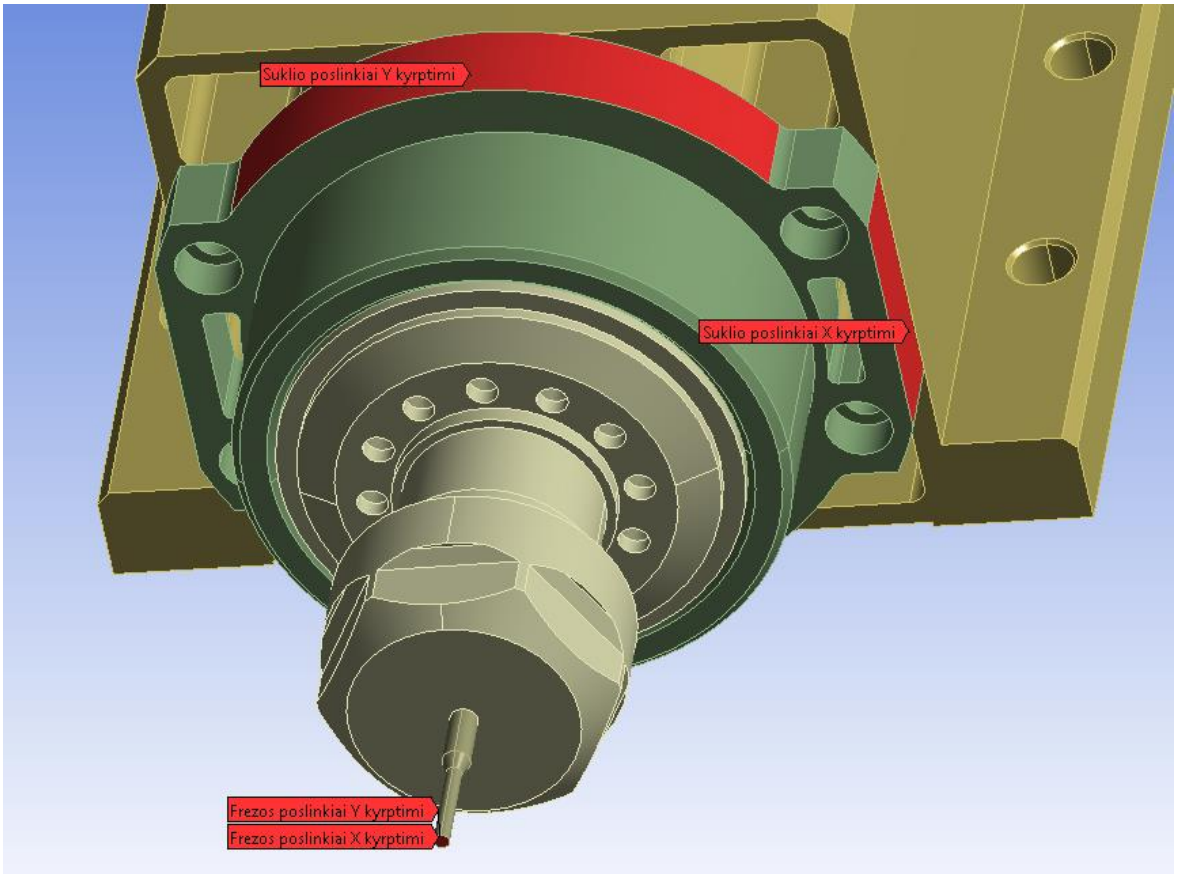
- 487,38 N, kai veleno kampinis greitis 21 000 apsisukimų per minutę;
- 535,3 N, kai kampinis greitis 22 000 apsisukimų per minutę;
- 585,54 N, kai kampinis greitis 23 000 apsisukimų per minutę;
- 638,09 N, kai kampinis greitis 24 000 apsisukimų per minutę.

Suklio keliamų vibracijų cikliškumas yra suklio sukimosi dažnis paverstas hercais. Šiuo atveju:

- 21 000 aps./min = 350 Hz;

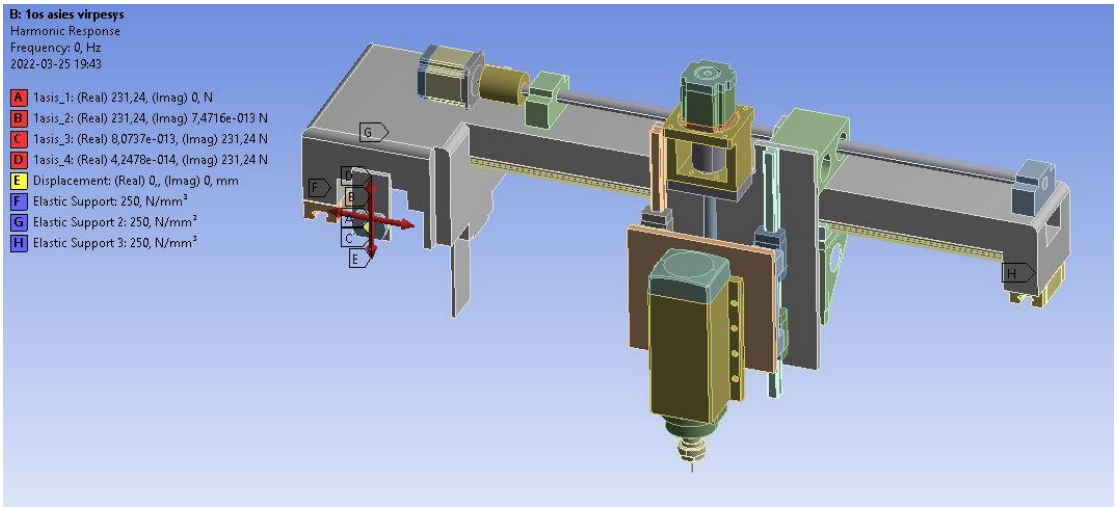
- 22 000 aps./min = 366,667 Hz;
- 23 000 aps./min = 383,333 Hz;
- 24 000 aps./min = 400 Hz.

Aprašius sąlygas ir vibracijų šaltinius atliekami trys skaičiavimai naudojant „Ansys“ programinę įrangą. Rezultatai kiekvienam atvejui atvaizduojami sudarant frezos galiuko ir suklio korpuso poslinkių Bode diagramas. Frezos galiuko poslinkiai parodo tiesioginę paklaidą, kuri atsiranda pjovimo zonoje. Korpuso poslinkiai parodo virpesių amplitudę akcelerometrų montavimo vietoje. Korpuso ir frezos galiuko atskaitos paviršiai pavaizduoti 23 pav.



23 pav. Paviršiai, kurių atžvilgiu pateikiami rezultatai (modelį parengė darbo autorius)

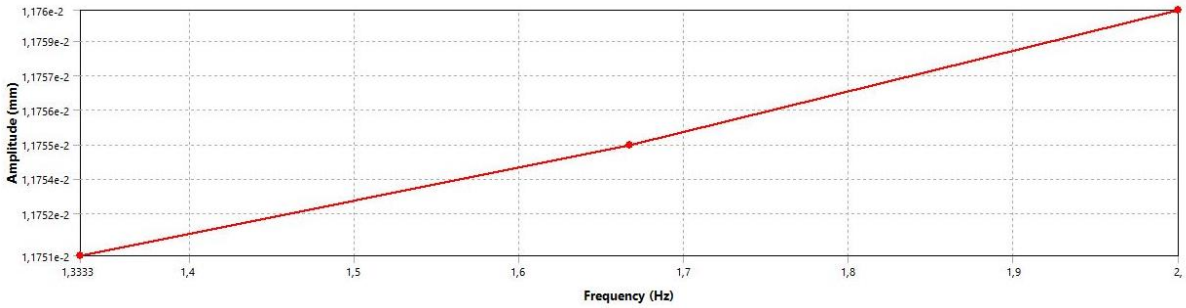
Naudojant apskaičiuotas kraštines sąlygas atliekami Y sijoje keliamų vibracijų skaičiavimai naudojant „Ansys“ programinę įrangą (24 pav.).



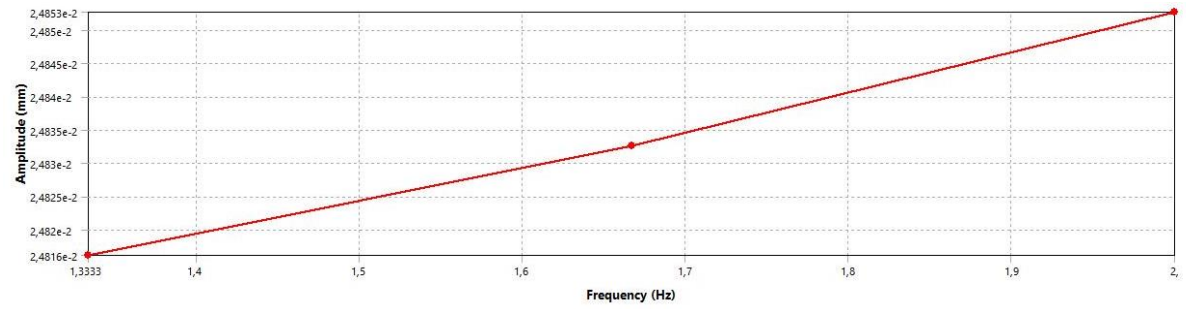
24 pav. Y sijos virpesius sukeliančių jėgų vektorių vaizdas „Ansys“ programinėje įrangoje (modelį parengė darbo autorius)

Y sijos vibracijų skaičiavimų rezultatai pateikiami Bode diagramose (25 pav.). Matoma, kad skirtumai tarp frezos ir suklio korpuso amplitudžių yra nykstamai maži (<5%).

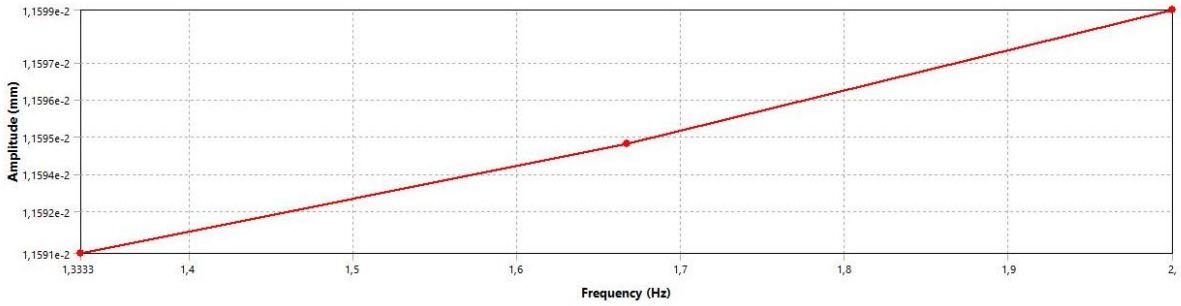
a)



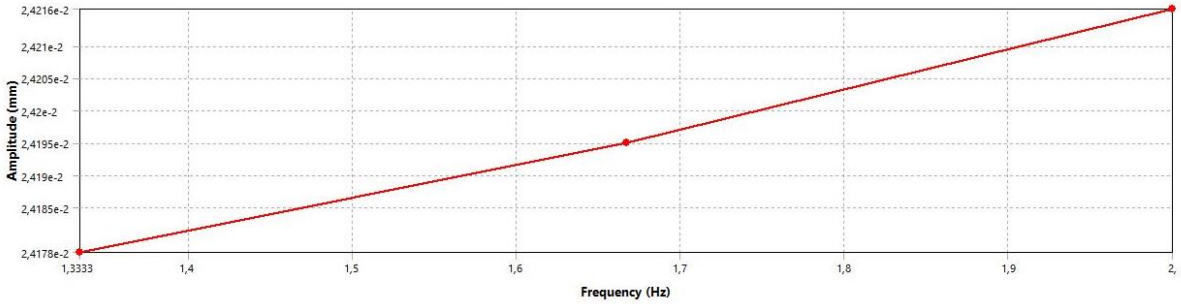
b)



c)



d)



25 pav. Y sijos vibracijų Bode diagramos: a) X ašies kryptimi matuojant suklį, b) Y ašies kryptimi matuojant suklį, c) X ašies kryptimi matuojant frezą, d) Y ašies kryptimi matuojant frezą

Tikslios apskaičiuotų poslinkių vertės pateikiamos 8 ir 9 lentelėje (gamyboje naudojami parametrai paryškinti).

8 lentelė. Y sijoje kylančios suklio korpuso vibracijos

Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus poslinkis X ašies kryptimi, mm	Maksimalus poslinkis Y ašies kryptimi, mm
1	1,3333	0,012	0,025
2	**1,6667**	**0,012**	**0,025**
3	2	0,012	0,025

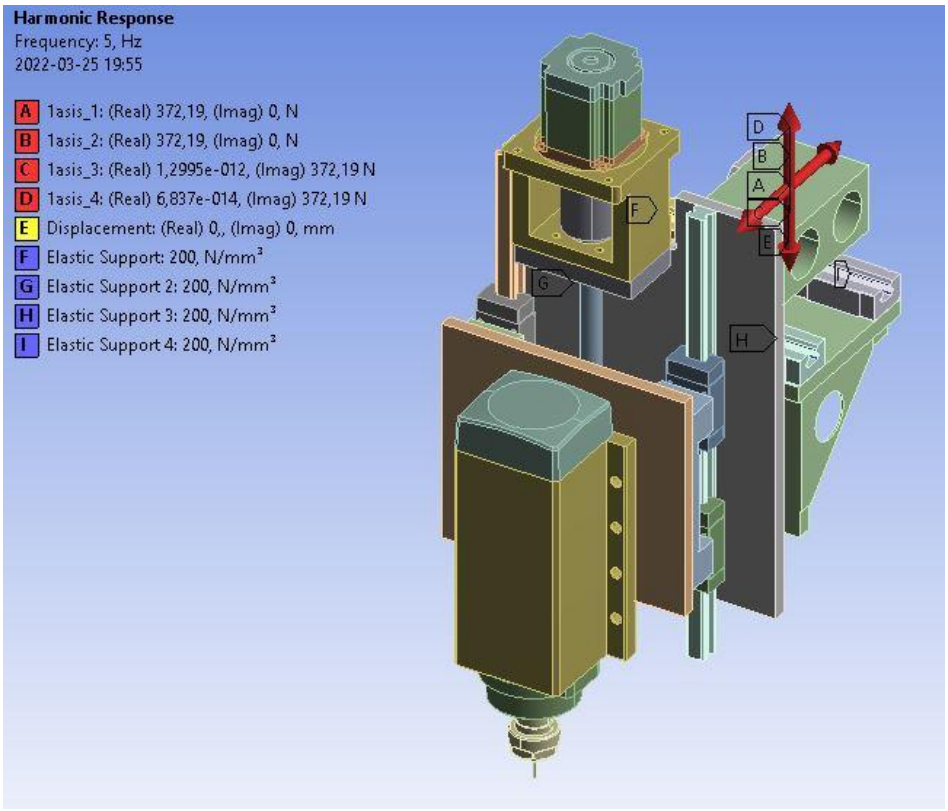
9 lentelė. Y sijoje kylančios frezos vibracijos

Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus poslinkis X ašies kryptimi, mm	Maksimalus poslinkis Y ašies kryptimi, mm
1	1,3333	0,012	0,024
2	**1,6667**	**0,012**	**0,024**
3	2	0,012	0,024

Iš lentelės duomenų matoma, kad skirtingi virpesių šaltinių dažniai nedaro įtakos virpesių sukeliamiems poslinkiams. Dažnis nedaro įtakos todėl, kad esant tokiam žemam sraigto kampiniam greičiui sugeneruojama maža išcentrinė jėga, kuri daro nykstamai mažą įtaką jėgos pokyčiui. Skirtumas tarp korpuso ir frezos vibracijų sukeltų poslinkių yra nykstamai mažas, nes šioje sijoje

matuojami paviršiai yra arti jėgos poveikio zonos, tai reiškia, kad poveikio petis maža ir nesukelia didelių poslinkių.

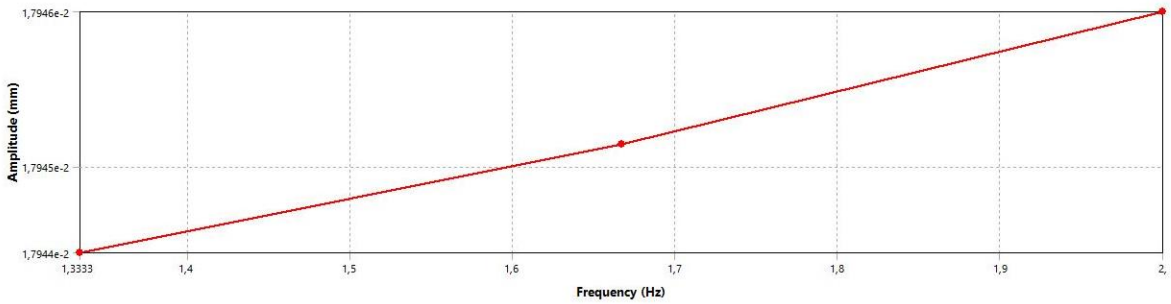
Atliekami X sijoje keliamų vibracijų skaičiavimai naudojant „Ansys“ programinę įrangą (26 pav.)



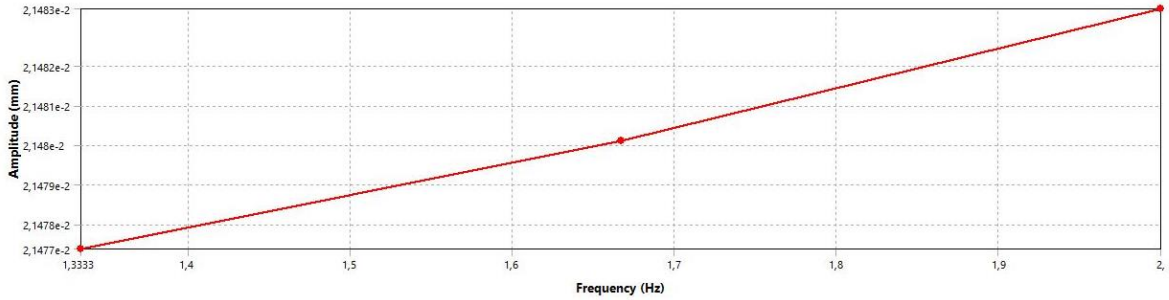
26 pav. X sijos virpesius sukeliančių jėgų vektorių vaizdas „Ansys“ programinėje įrangoje (modelį parengė darbo autorius)

Atlikus skaičiavimus sudarytos X sijos vibracijų Bode diagramos (27 pav.). Diagramose matoma, kad skirtumai tarp amplitudžių taip pat yra nykstamai maži (< 5 %).

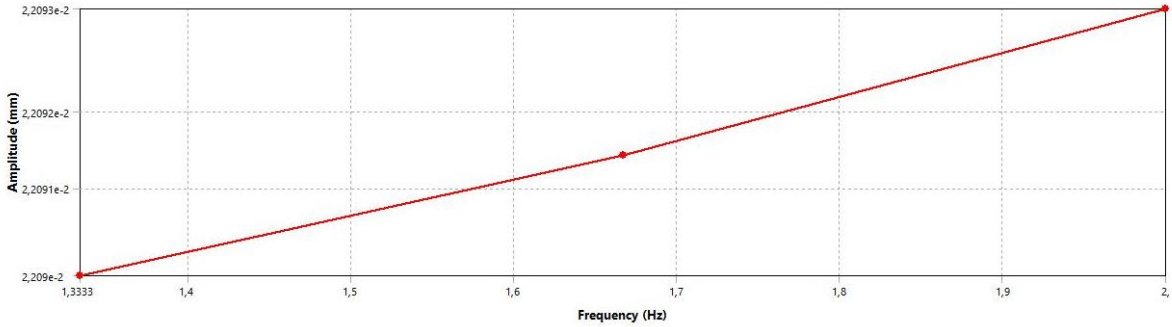
a)



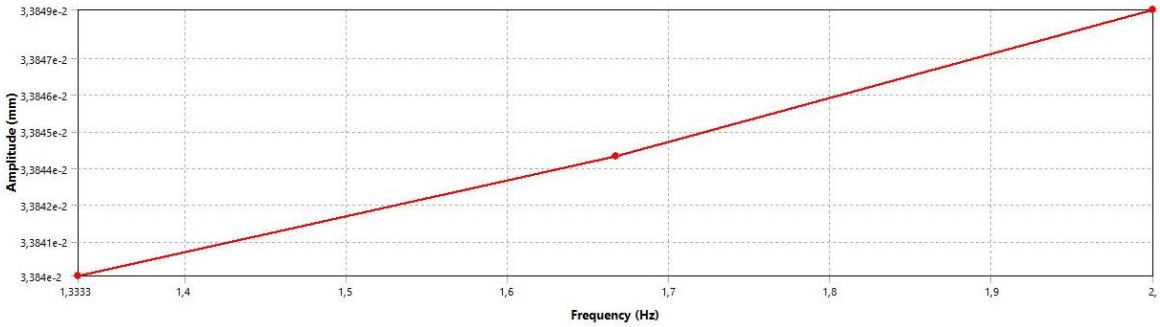
b)



c)



d)



27 pav. X sijos vibracijų Bode diagramos: a) X ašies kryptimi matuojant suklį, b) Y ašies kryptimi matuojant suklį, c) X ašies kryptimi matuojant frezą, d) Y ašies kryptimi matuojant frezą

Tikslios apskaičiuotų poslinkių vertės pateikiamos 10 ir 11 lentelėje (darbiniai parametrai paryškinti).

10 lentelė. X sijoje kylančios suklio korpuso vibracijos

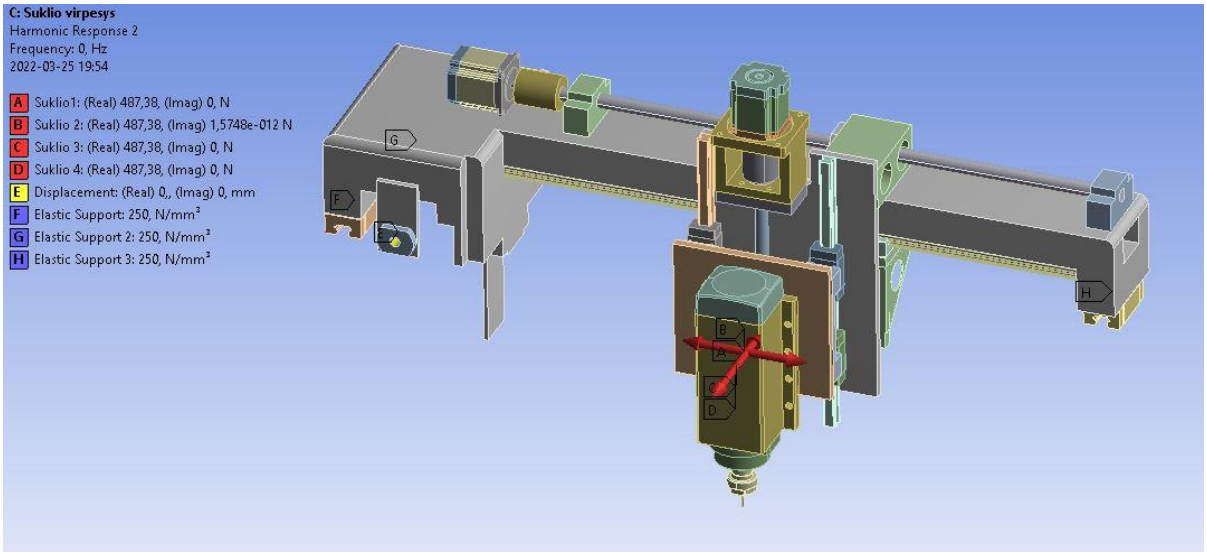
Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus poslinkis X ašies kryptimi, mm	Maksimalus poslinkis Y ašies kryptimi, mm
1	1,3333	0,018	0,021
2	**1,6667**	**0,018**	**0,021**
3	2	0,018	0,021

11 lentelė. X sijoje kylančios frezos vibracijos

Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus poslinkis X ašies kryptimi, mm	Maksimalus poslinkis Y ašies kryptimi, mm
1	1,3333	0,022	0,034
2	**1,6667**	**0,022**	**0,034**
3	2	0,022	0,034

Iš gautų rezultatų matoma, kad skirtingi virpesių šaltinių dažniai nekeičia sukeliamų poslinkių. Korpuso ir frezos vibracijų poslinkiai skiriasi 4 µm X kryptimi ir 13 µm Y kryptimi. Tarp matuojamo sijos paviršiaus ir jėgos poveikio zonos yra didelis atstumas, todėl tarp nagrinėjamų paviršių atsiranda poslinkio kitimas.

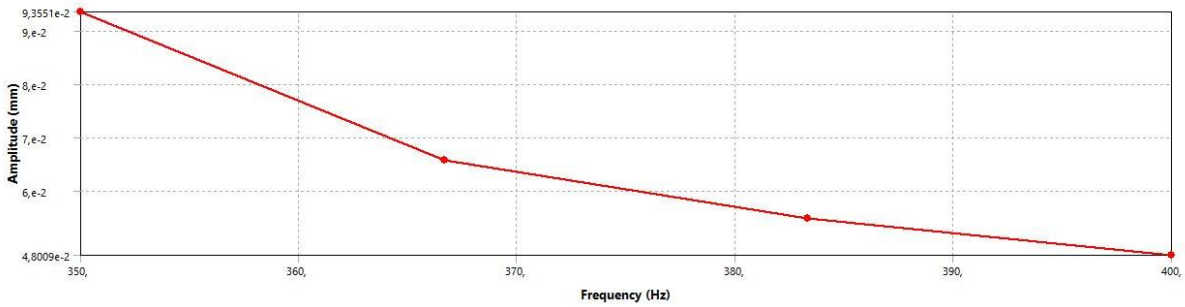
Toliau atliekami suklio keliamų vibracijų skaičiavimai naudojant „Ansys“ programinę įrangą (28 pav.).



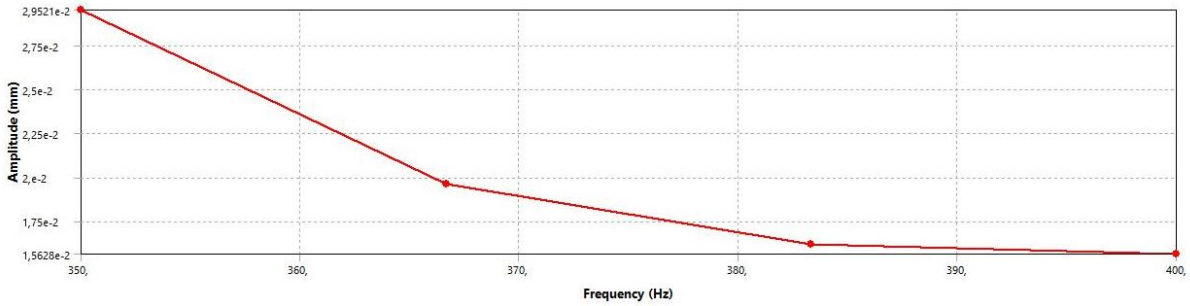
28 pav. Suklio virpesius sukeliančių jėgų vektorių vaizdas „Ansys“ programinėje įrangoje (modelį parengė darbo autorius)

Atlikus skaičiavimus sudarytos suklio sukeliamų virpesių Bode diagramos (29 pav.):

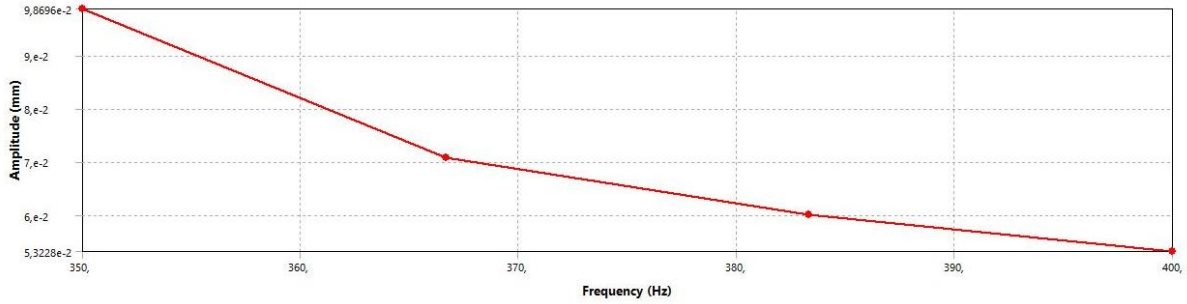
a)



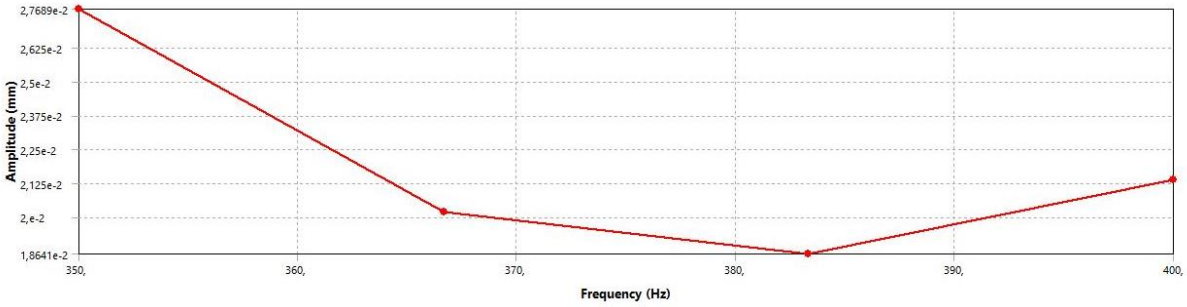
b)



c)



d)



29 pav. Suklio sukeliamų vibracijų Bode diagramos: a) X ašies kryptimi matuojant suklį, b) Y ašies kryptimi matuojant suklį, c) X ašies kryptimi matuojant frezą, d) Y ašies kryptimi matuojant frezą

Tikslios apskaičiuotų poslinkių vertės pateikiamos 12 ir 13 lentelėje (darbiniai parametrai paryškinti):

12 lentelė. Suklio keliamos suklio korpuso vibracijos

Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus poslinkis X ašies kryptimi, mm	Maksimalus poslinkis Y ašies kryptimi, mm
1	350	0,094	0,030
2	366,67	0,066	0,020
2	383,33	0,055	0,016
3	**400 (Didžiausias suklio kampinis dažnis)**	**0,048**	**0,016**

13 lentelė. Suklio keliamos frezos vibracijos

Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus poslinkis X ašies kryptimi, mm	Maksimalus poslinkis Y ašies kryptimi, mm
1	350	0,099	0,028
2	366,67	0,071	0,020
3	383,33	0,060	0,019
4	**400 (Didžiausias suklio kampinis dažnis)**	**0,053**	**0,021**

Iš rezultatų matoma, kad didžiausi poslinkiai gaunami sukliui sukantis 350 Hz dažniu. Tai atsitinka todėl, kad šis dažnis ir jo harmonikos yra artimiausios staklių rezonansiniams dažniams. Didinant suklio greitį harmonikos tolsta nuo staklių rezonansinių dažnių, todėl mažėja ir poslinkiai.

Atlikus teorinius frezavimo staklių vibracijų skaičiavimus gauta, kad:

- Y sijos sraigto keliamos vibracijos sukelia korpuso poslinkius, kurių dydis yra 12 µm X ašies ir 24 µm Y ašies kryptimi.
- X sijos sraigto keliamos vibracijos sukelia korpuso poslinkius, kurių dydis yra 22 µm X ašies ir 34 µm Y ašies kryptimi.
- Suklio keliamos vibracijos sukelia korpuso poslinkius, kurių dydis yra 48–94 µm X ašies ir 19–28 µm Y ašies kryptimi.

4. FREZAVIMO STAKLIŲ VIRPESIŲ PRAKTINIS MATAVIMAS

Šiame skyriuje atliekamas staklių virpesių matavimas. Gauti rezultatai parodo staklių suklio korpuso poslinkius, kuriuos sukelia X ir Y sijų sraigtų bei suklio veleno vibracijos.

Matavimai atliekami naudojant „National Instruments NI USB-4431“ signalo imtuvą (

30 pav.) su dviem vienetais „IMI Sensors 603C01“ akcelerometrų (31 pav.). Akcelerometru matuojamų dažnių juosta 0,5–10 000 Hz, matavimo ribos ± 50 g, masė 51 gramas (PCB Piezotronics, Inc., 2022).



30 pav. Signalo imtuvas NI USB-4431 (nuotrauka iš „Artisan technology group“)

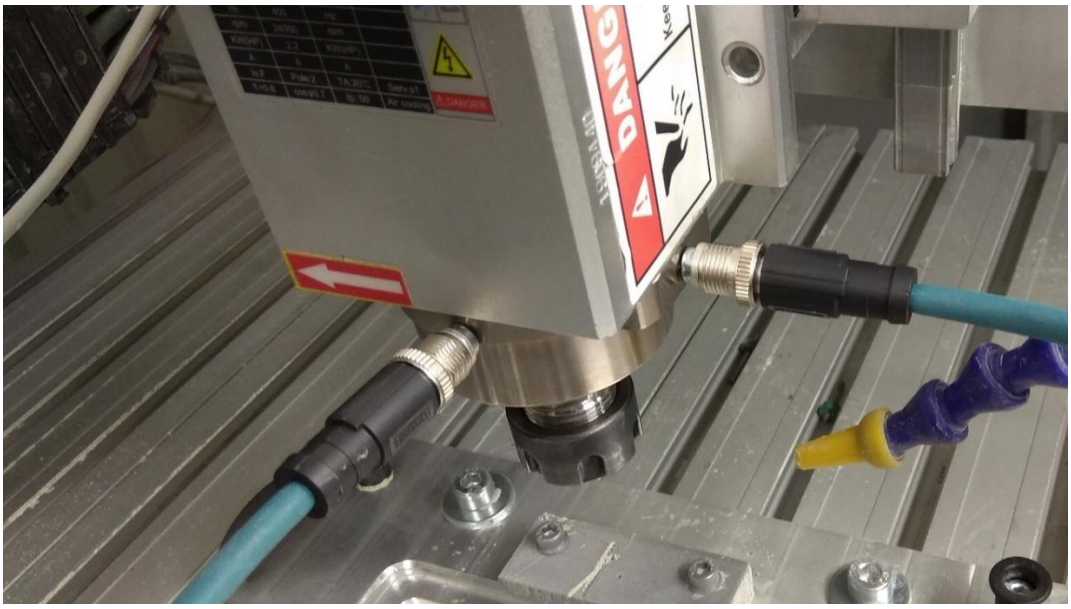


31 pav. Akcelerometras "603C01" (nuotrauka iš „PCB piezotronics“)

Tyrimas atliekamas remiantis (Kilikevičius, Prokopovič ir Makarskas, 2013) bei (Kasparaitis, Kilikevičius, Barakauskas ir Mokšin, 2012) darbais, kadangi juose atliekamų tyrimų seka ir naudojama metodika yra artima šių staklių tyrimui.

Akcelerometrai montuojami ant suklio korpuso, kuo arčiau frezavimo zonos (32 pav.), kad virpesių slopinimas korpuse turėtų kuo mažesnę įtaką rezultatui. Vienas akcelerometras montuojamas X ašies kryptimi, kitas – Y ašies kryptimi, kad vienu metu būtų įrašomos abi virpesių dedamosios.

Vibracijos matuojamos tik X ir Y ašių kryptimis, nes tik šių krypčių poslinkiai daro įtaką staklių pjūvio tikslumui.



32 pav. Akcelerometrų montavimas ant suklio korpuso (darbo autoriaus nuotrauka)

Virpesiai matuojami naudojant šiuos parametrus:

1) X ir Y sijoms judant 400, 500, 600 milimetrų per minutę pastūma.
2) Sukliui besisukant 21 000, 22 000, 23 000, 24 000 apsisukimų per minutę kampiniais dažniais.

500 mm/min. pastūma ir 24 000 aps./min. suklio kampinis greitis yra gamyboje naudojami parametrai, kuriuos naudojant pasiekiamas didžiausias apdirbimo našumas. Šie parametrai buvo rasti gamybos darbuotojų atliekant praktinius eksperimentus. Tyrimui parinktos papildomos pastūmos ir suklio greičiai, kad būtų išaiškinta poslinkių kitimo tendencija kintant apdirbimo parametrams.

Duomenys įrašomi kiekvieną mazgą matuojant atskirai:

- X sijai judant aprašytomis pastūmomis.
- Y sijai judant aprašytomis pastūmomis.
- Sukant suklį aprašytais kampiniais dažniais.

Tirti kiekvieną mazgą atskirai pasirinkta tam, kad būtų galima atskirai matuoti kiekvieno mazgo judesio žadinamus poslinkius.

Tyrimo metu atliekant kiekvieną matavimą pagal aprašytus scenarijus įrašomi duomenys:

- Virpesių amplitudė.
- Virpesių dažnis X ir Y sijų kryptimis.

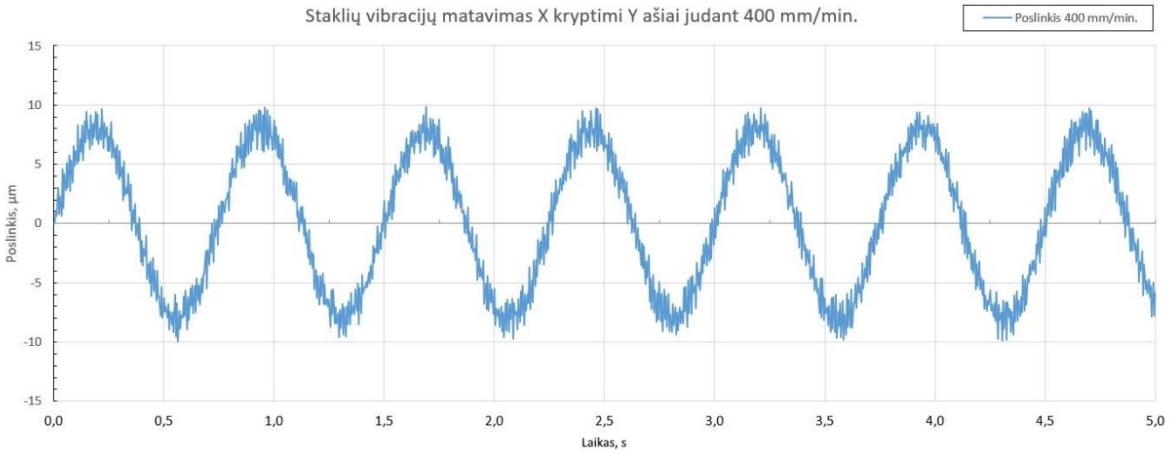
Gauti duomenys pateikiami grafikuose ir vibracijų tyrimo lentelėje.

4.1. Y sijos sukeliamų virpesių matavimas

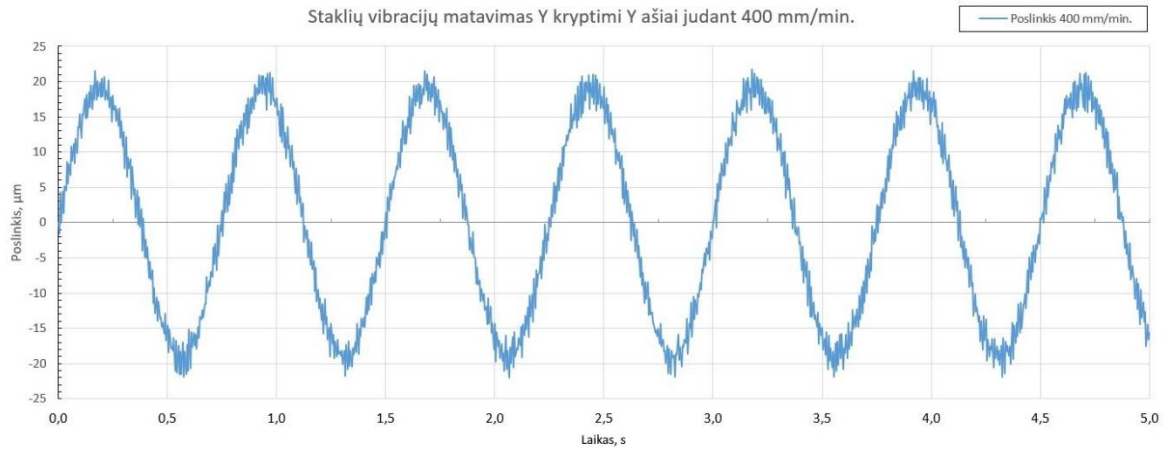
Šiame poskyryje atliekamas Y siją varančio sraigto sukeliamų virpesių matavimas pagal 4 skyriuje aprašytus parametrus. Rezultatai pateikiami trijuose grafikuose, kiekvienai pastūmai. a) grafikas nurodo pilnutinį matuojamo paviršiaus poslinkį per 5 sekundes X ašies kryptimi, b) nurodo pilnutinį matuojamo paviršiaus poslinkį per 5 sekundes Y ašies kryptimi, c) grafikas nurodo vibracijų sukeltus poslinkius dažnių juostoje.

33 pav. pateikiami Y sijos vibracijų matavimo rezultatai kai pastūma 400 mm/min.

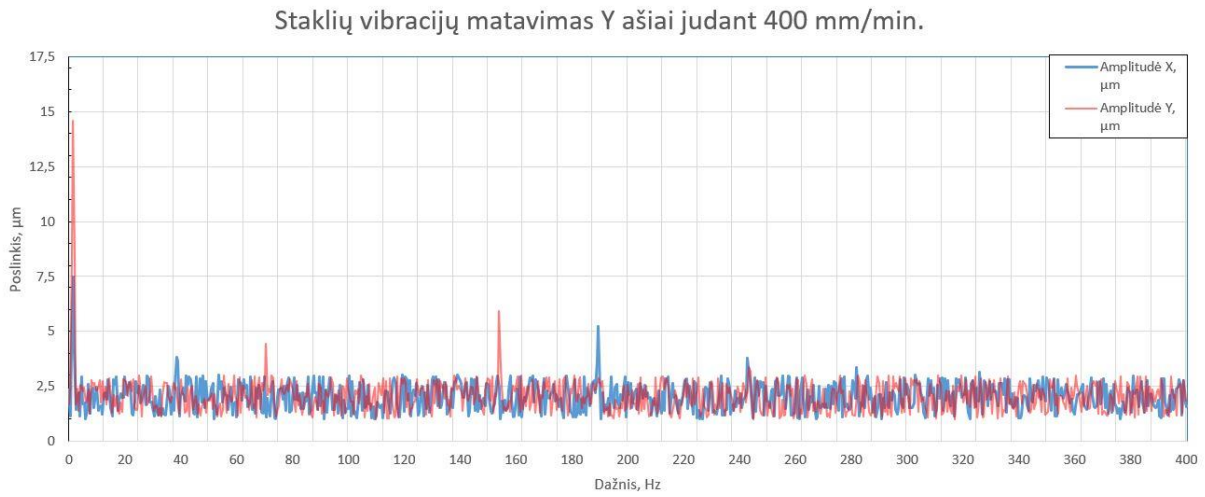
a)



b)



c)



33 pav. Vibracijų matavimų rezultatai Y sijai judant 400 mm/min. Pastūma: a)pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta

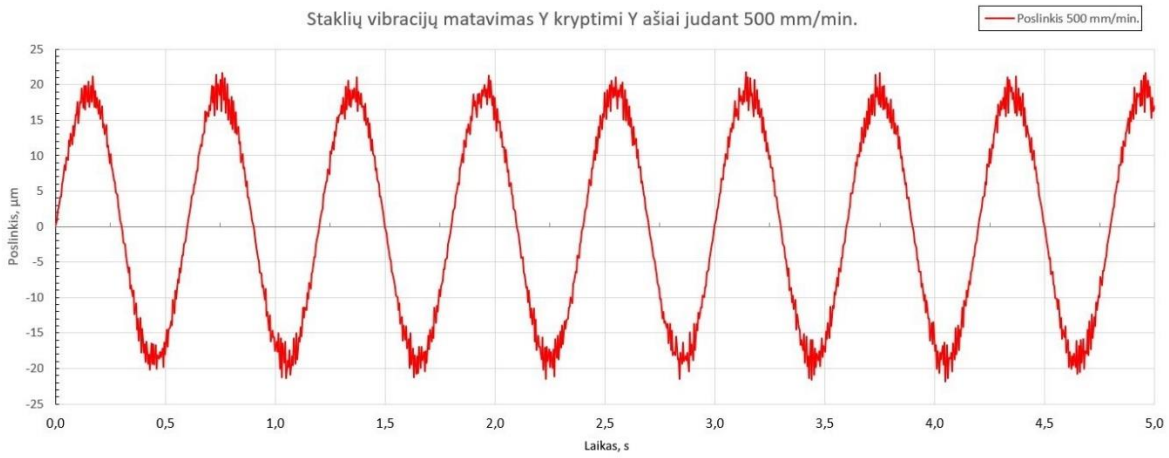
Pagal 33 pav gautus rezultatus matoma, jog X ašies kryptimi vibracijų keliami poslinkiai siekia 9 µm, o Y ašies kryptimi poslinkiai siekia 20 µm. Išmatuotas judesys vyksta sklandžia sinusoide, todėl galima teigti, jog pagrindinis vibracijų šaltinis yra veleno mušimas. Šią išvadą pagrindžia ir vibracijų dažnių spektro grafikas, didžiausias vibracijų poslinkis matomas 2 Hz zonoje. Kiti vibracijų poslinkių pikai matomi ties 40, 70, 150 ir 190 Hz vietose, tai yra staklių konstrukcijos rezonansiniai dažniai, jų virpesius sužadina šaltinio vibracijų harmonikos.

34 pav. pateikiami Y sijos vibracijų matavimo rezultatai kai pastūma 500 mm/min.

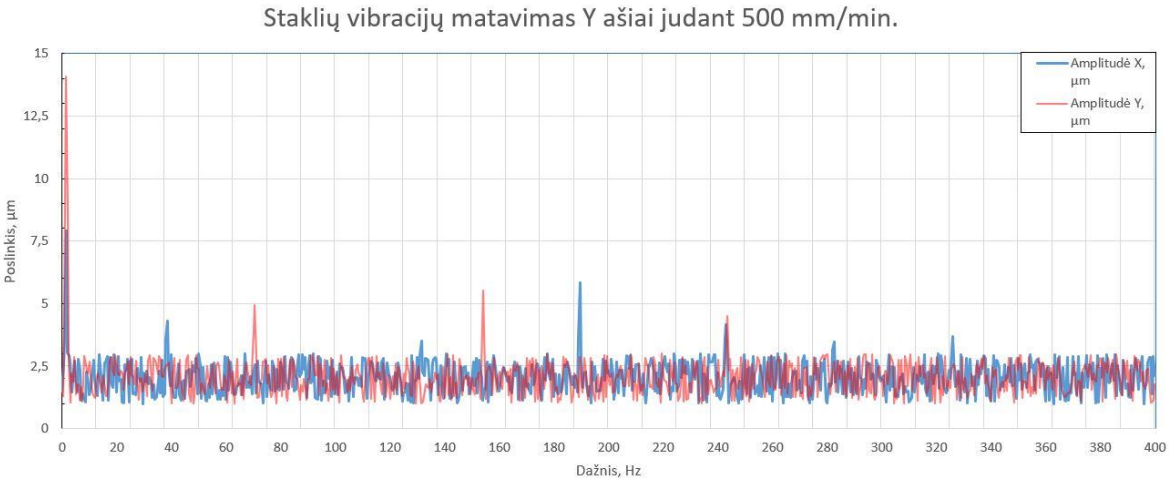
a)



b)



c)

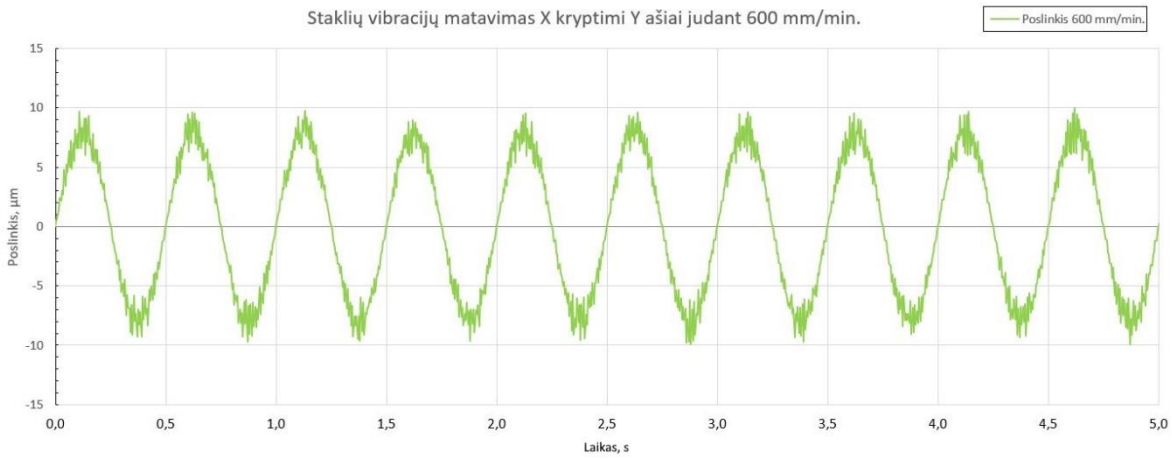


34 pav. Vibracijų matavimų rezultatai Y sijai judant 500 mm/min. Pastūma: a) pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta

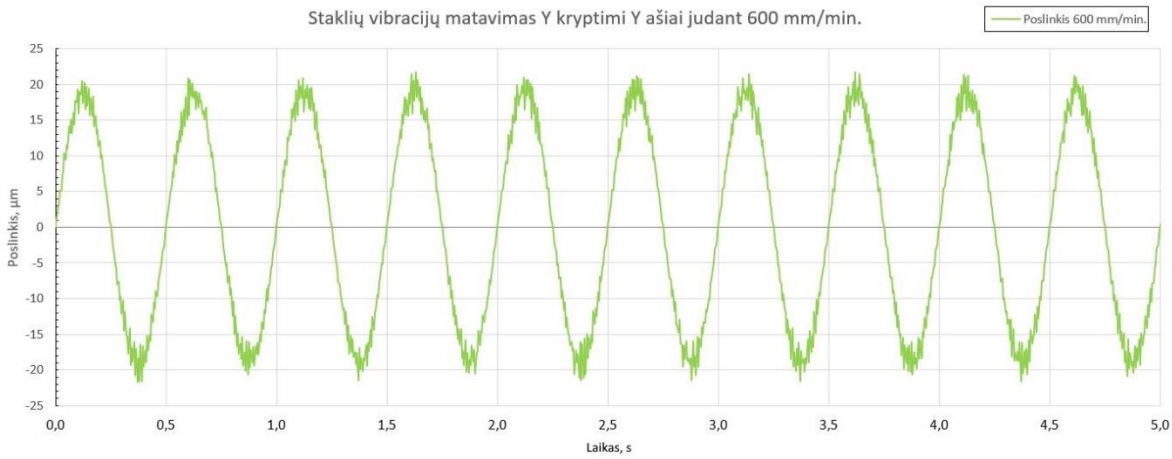
34 pav. gauti rezultatai rodo, kad vibracijų sukelti poslinkiai X ašies kryptimi siekia 9 µm, o Y ašies kryptimi – 20 µm. Grafiko forma sinusoidinė, todėl priimama, kad pagrindinis vibracijų šaltinis yra veleno mušimas. Didžiausius poslinkius kelia 2 Hz virpesiai, todėl priimta išvada yra patvirtinama. Kiti poslinkių ekstremumai matomi ties rezonansiniais staklių dažniais, priimama, kad juos sukelia virpesių šaltinių sukeliamos dažnių harmonikos.

35 pav. pateikiami Y sijos vibracijų matavimo rezultatai, kai pastūma 600 mm/min.

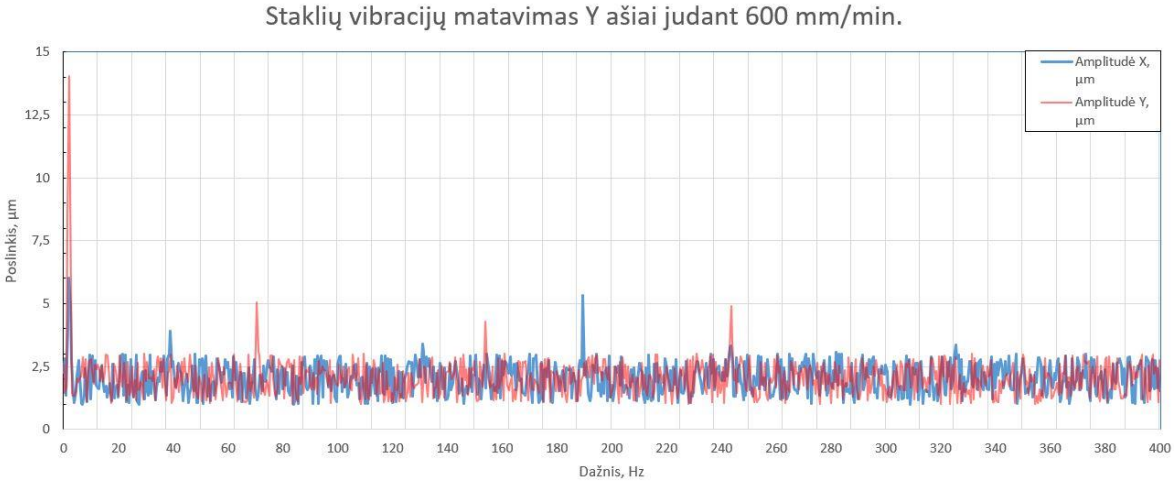
a)



b)



c)



35 pav. Vibracijų matavimų rezultatai Y sijai judant 600 mm/min. Pastūma: a) pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta

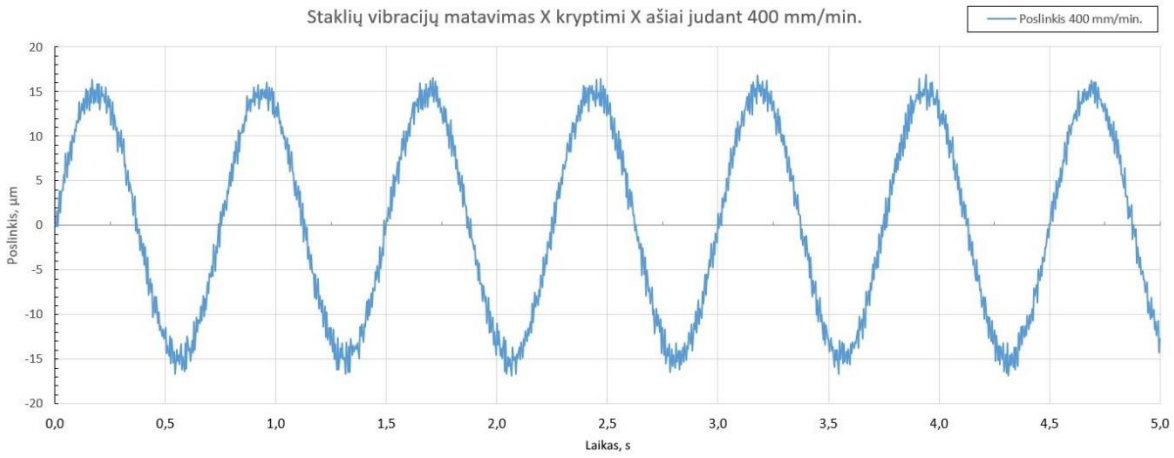
Pagal 35 pav. gautus rezultatus matoma, jog X ašies kryptimi vibracijų keliami poslinkiai siekia 9 µm, o Y ašies kryptimi poslinkiai siekia 20 µm. Išmatuotas judesys vyksta sklandžia sinusoide, todėl galima teigti, jog pagrindinis vibracijų šaltinis yra veleno mušimas. Šią išvadą pagrindžia ir vibracijų dažnių spektro grafikas, didžiausias vibracijų poslinkis matomas 2 Hz zonoje. Kiti poslinkių pikai pasireiškia dėl staklių konstrukcijos rezonanso kurį sukelia šaltinio virpesių harmonikos.

4.2.X sijos sukeliamų vibracijų matavimas

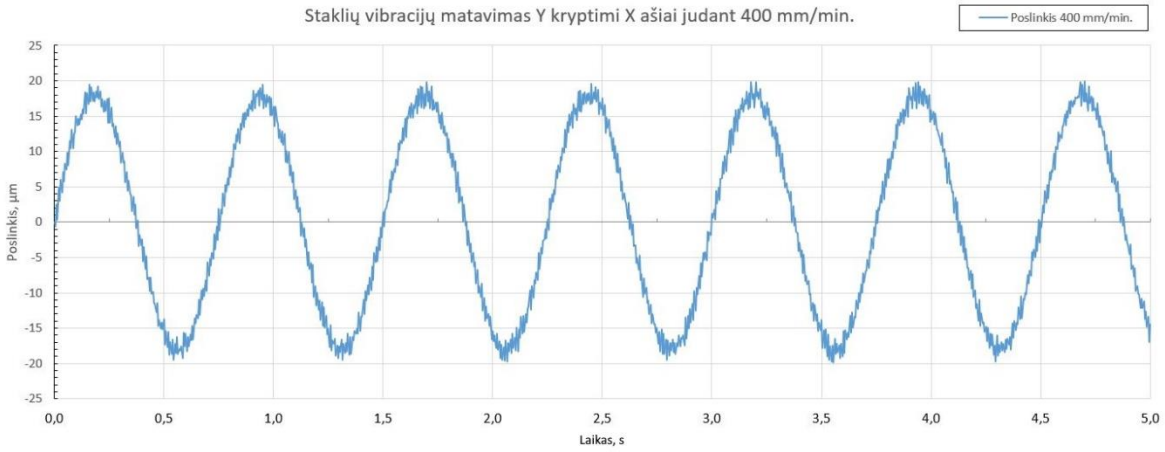
Šiame poskyryje atliekamas X siją varančio sraigto sukeliamų virpesių matavimas pagal 4 skyriuje aprašytus parametrus. Rezultatai pateikiami tokiu pačiu būdu, kaip ir 4.1 poskyryje.

36 pav. pateikiami X sijos vibracijų matavimo rezultatai kai pastūma 400 mm/min.

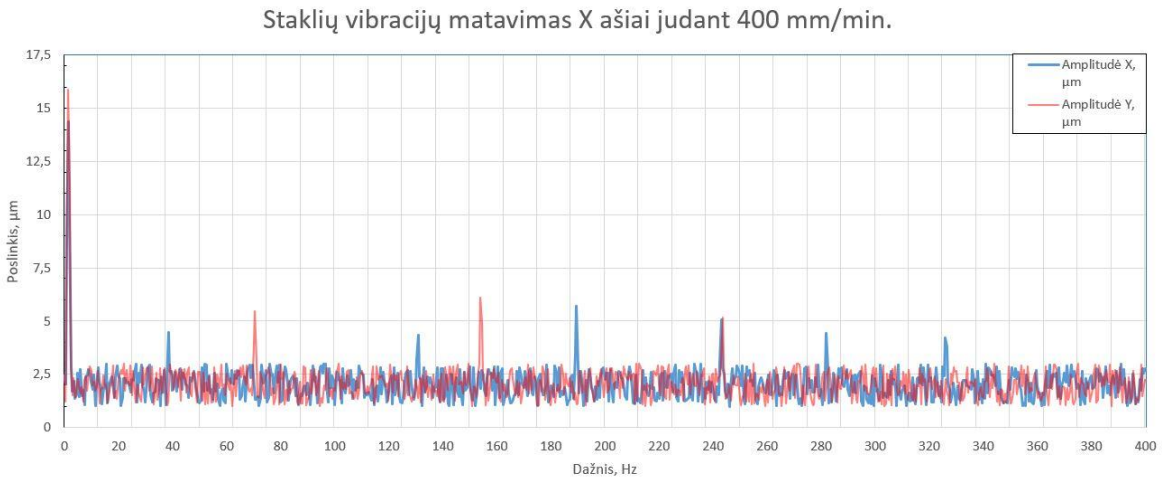
a)



b)



c)

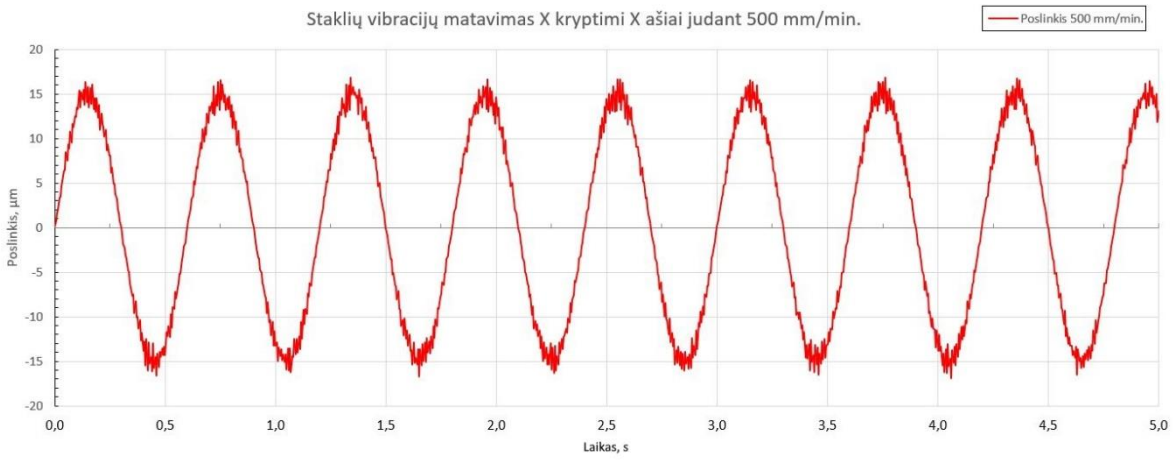


36 pav. Vibracijų matavimų rezultatai X sijai judant 400 mm/min. Pastūma: a) pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta

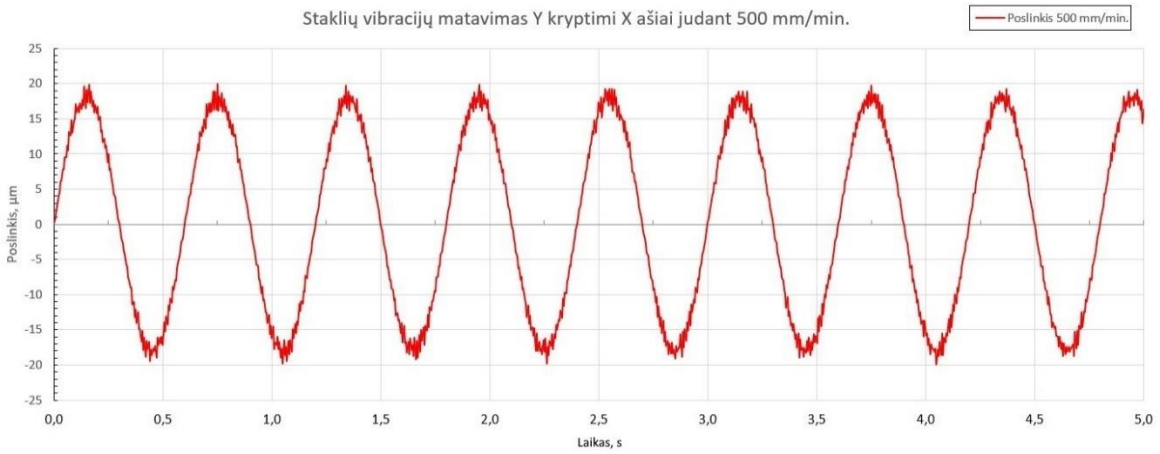
Pagal 36 pav. gautus rezultatus matoma, jog X ašies kryptimi vibracijų keliami poslinkiai siekia 15 µm, o Y ašies kryptimi poslinkiai siekia 19 µm. Išmatuotas judesys taip pat vyksta sklandžia sinusoide, todėl priimama, kad vibracijų šaltinis yra veleno mušimas. Šią išvadą pagrindžia ir vibracijų dažnių spektro grafikas su piku 2 Hz zonoje. Kiti vibracijų poslinkių pikai matomi ties 40, 70, 130, 150, 190, 245, 280 ir 330 Hz vietose, tai yra staklių konstrukcijos rezonansiniai dažniai, jų virpesius sužadina šaltinio vibracijų harmonikos.

37 pav. pateikiami X sijos vibracijų matavimo rezultatai, kai pastūma 500 mm/min.

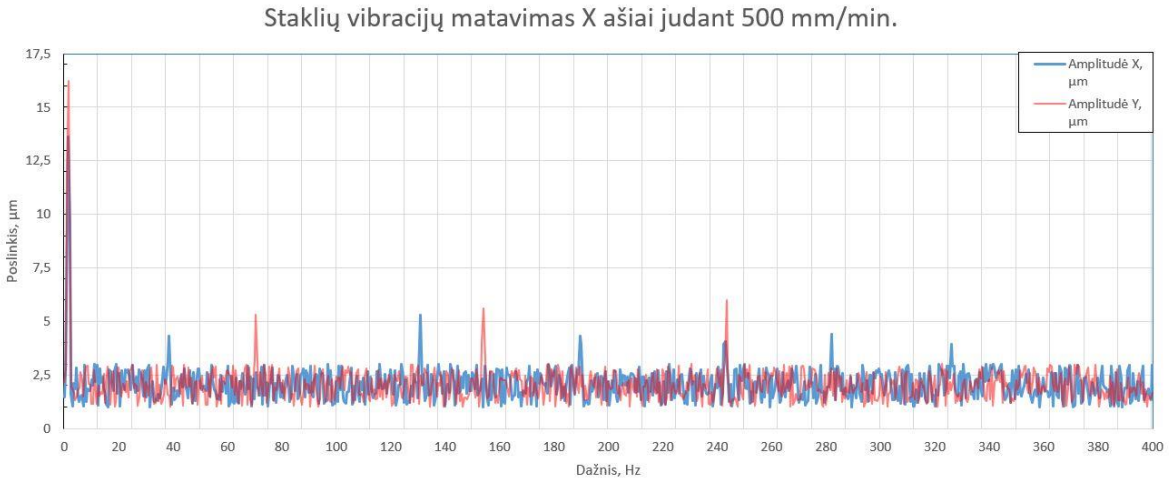
a)



b)



c)

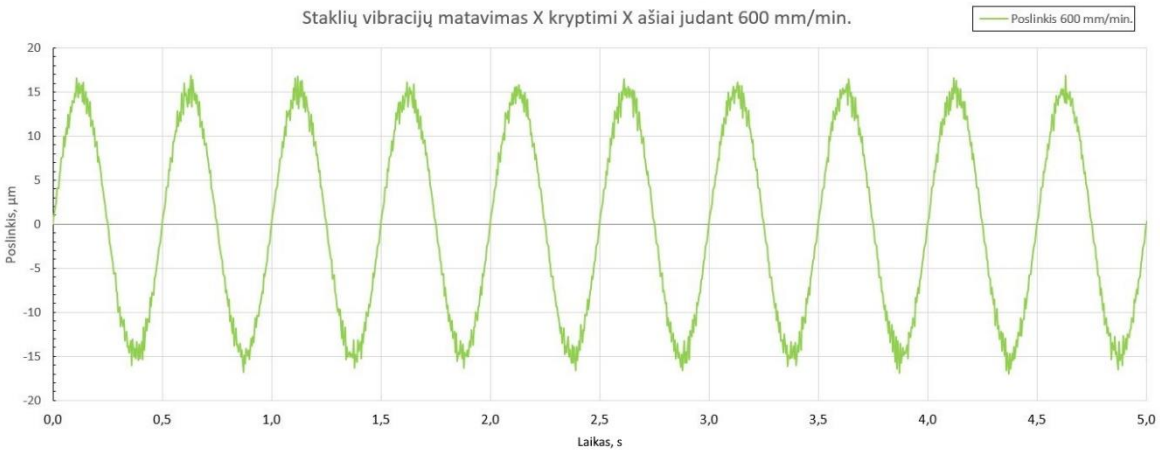


37 pav. Vibracijų matavimų rezultatai X sijai judant 500 mm/min. Pastūma: a) pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta

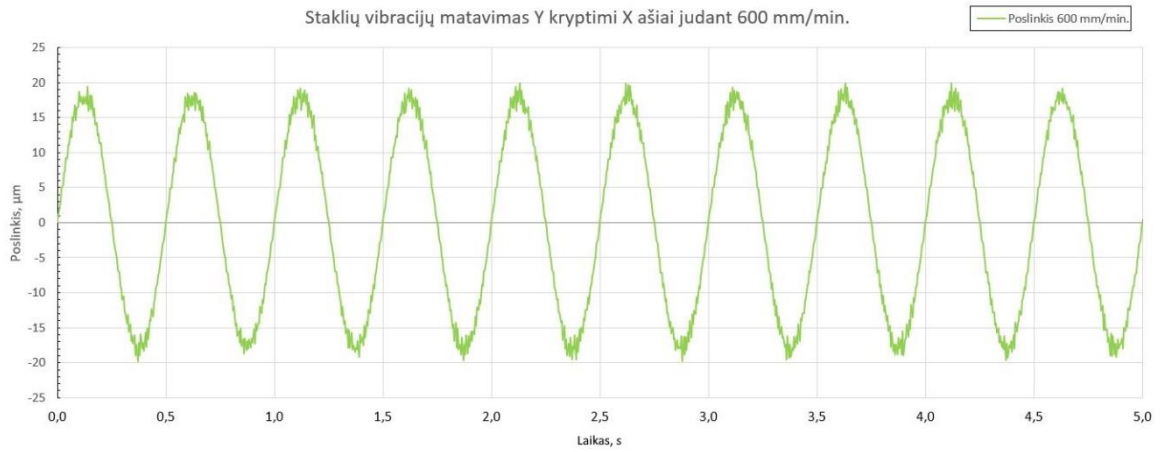
Pagal 37 pav. gauti rezultatai byloja, kad vibracijų sukelti poslinkiai X ašies siekia 16 µm, o Y ašies kryptimi – 19 µm. Grafiko forma sinusoidinė, todėl priimama, kad pagrindinis vibracijų šaltinis yra veleno mušimas. Didžiausius poslinkius kelia 2 Hz virpesiai, todėl priimta išvada yra patvirtinama. Kiti poslinkių ekstremumai matomi ties rezonansiniais staklių dažniais, priimama, kad juos sukelia virpesių šaltinių sukeliamos dažnių harmonikos.

38 pav. pateikiami X sijos vibracijų matavimo rezultatai, kai pastūma 600 mm/min.

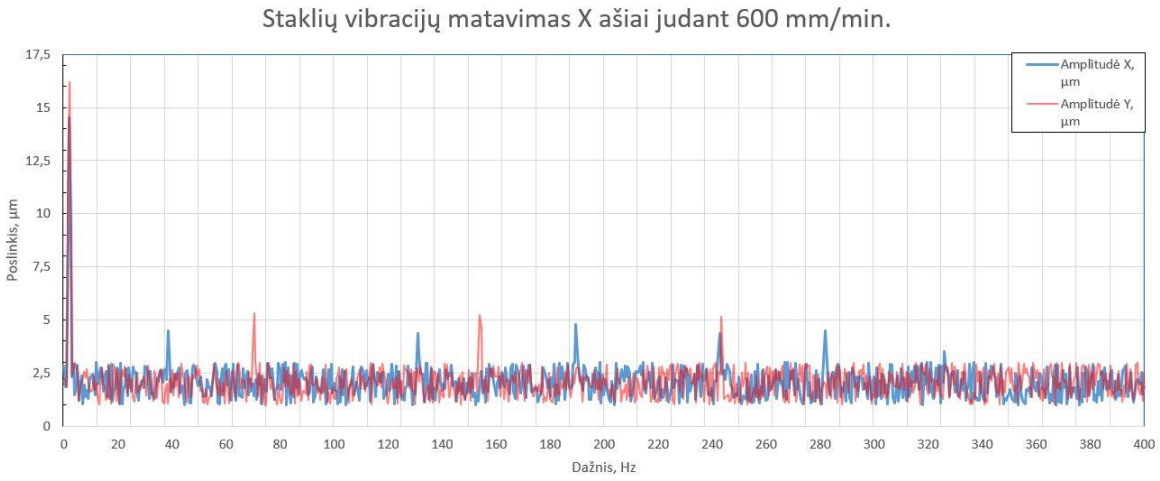
a)



b)



c)



38 pav. Vibracijų matavimų rezultatai X sijai judant 600 mm/min. Pastūma: a) pilnutinės vibracijos X ašies kryptimi, b) pilnutinės vibracijos Y ašies kryptimi, c) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta

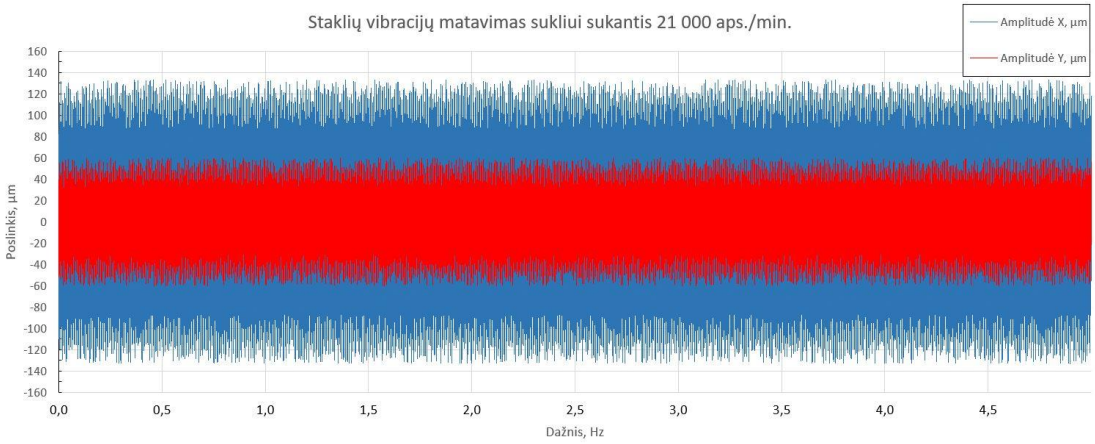
Pagal 38 pav. gautus rezultatus matoma, jog X ašies kryptimi vibracijų keliami poslinkiai siekia 16 µm, o Y ašies kryptimi poslinkiai siekia 19 µm. Išmatuotas judesys vyksta sklandžia sinusoide. 2 Hz zonoje matomi tiesiogiai mušimo sukelti poslinkiai. Kiti poslinkių pikai pasireiškia dėl staklių konstrukcijos rezonanso kurį sukelia šaltinio virpesių harmonikos.

4.3.Suklio sukeliamų vibracijų matavimas

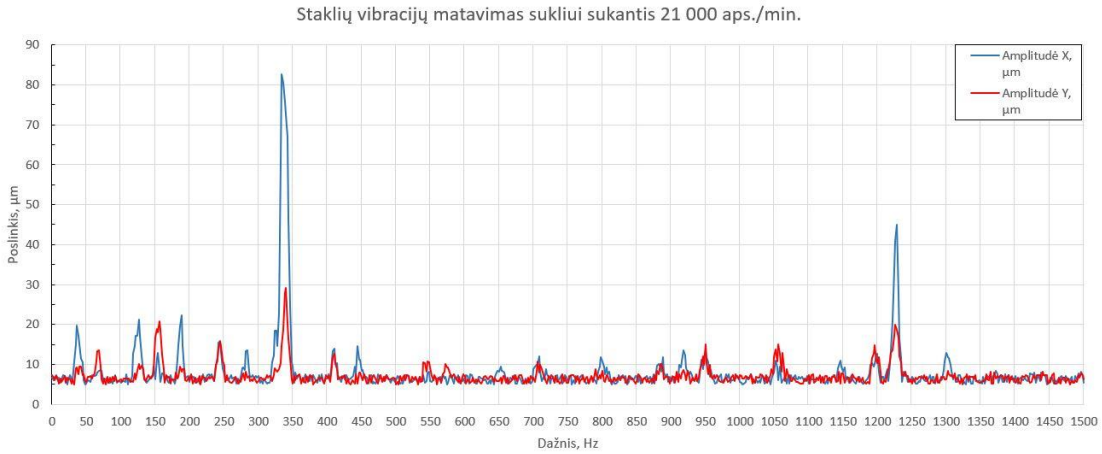
Šiame poskyryje matuojamos suklio veleno radialinio mušimo jėgos sukeliamos vibracijos. Rezultatai pateikiami dviejuose grafikuose, kiekvienam 4 skyriuje aprašytam kampiniam suklio dažniui. a) grafikas nurodo matuojamo paviršiaus poslinkį per laiką X ir Y ašių kryptimi, b) grafikas nurodo vibracijų sukeltų poslinkius dažnių spektre.

39 pav. pateikiami suklio vibracijų rezultatai, kai suklio kampinis dažnis 21 000 aps./min.

a)



b)



39 pav. Suklio keliamų vibracijų matavimų rezultatai sukliui sukantis 21 000 aps./min. kampiniu dažniu: a) pilnutinės vibracijos X ir Y ašių kryptimi, b) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta.

Iš 39 pav. a) grafiko matoma, jog X ašies kryptimi pilnutiniai vibracijų poslinkiai siekia 130 µm, Y ašies kryptimi poslinkiai siekia 60 µm. b) grafikas parodo, kad egzistuoja dvi esminės vibracijų dedamosios – 350 Hz suklio mušimo ir 1225 Hz atsirandanti dedamoji.

Daroma išvada, kad 1225 Hz dedamoji yra sukeliama suklio guolių išdilimo arba defekto, kadangi šis dažnis yra tiesiogiai proporcingas suklio mušimo dažniui (nuolat didesnis 3,5 karto, kaip matoma 41 pav., 42 pav., 43 pav. b) grafikuose). Šią išvadą galima pagrįsti planetinio reduktoriaus perdavos skaičiavimo formule, kadangi guolio sandara panaši į planetinio reduktoriaus. Apskaičiavus guolio sferų (planetų) apsisukimus aplink centrinį žiedą randama kiek sferų kontaktuos su žiedo defektu per veleno apsisukimą, taip galima palyginti ar gaunamas toks pat 3,5 santykis.

Suklyje guolis tvirtinamas fiksuojant išorinį žiedą, todėl šiam skaičiavimui naudojama perdavos skaičiavimo formulė kai planetinės pavaros žiedas yra įtvirtintas. Remiantis (Radzevich, 2016) knyga tokio planetinio reduktoriaus lėtinimo koeficientas skaičiuojamas naudojant formulę:

$$i = 1 + \frac{d_ž}{d_s}; \quad (5)$$

Čia: i – lėtinimo koeficientas, $d_ž$ – žiedo dalijamasis skersmuo, d_s – saulės dalijamasis skersmuo.

Formulėje (5) vietoj dalijamųjų skersmenų naudojami guolio kontaktinių paviršių skersmenys. Tokį pakeitimą galima atlikti todėl, kad šie skersmenys aprašo analogiškus matmenis – elementų kontakto vietas. „SKF 6005“ guolio modelis (40 pav.), gautas iš (SKF, 2022), išmatuojamas naudojant „Solidworks“ programinę įrangą. Išmatuoti skersmenys $d_ž$ – 24,08 mm, d_s – 18,74 mm įstatomi į (5) formulę:

$$i = 1 + \frac{24{,}08}{18{,}74} = 2{,}285;$$

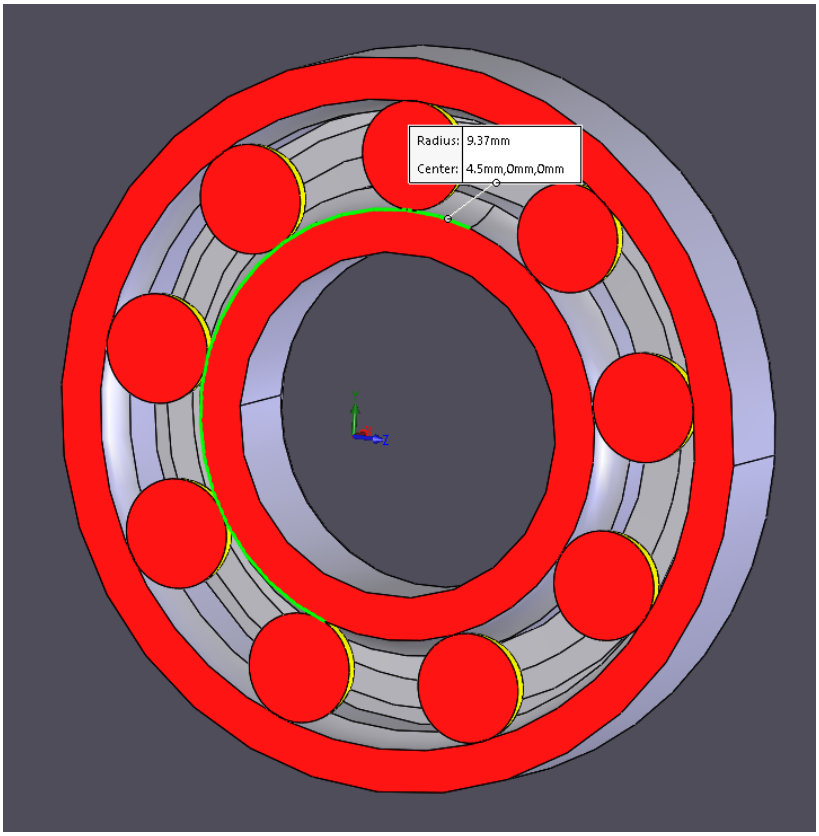
Apskaičiavus lėtinimo koeficientą gauta, kad šio guolio sferos aplink centrinį žiedą sukasi 2,285 karto lėčiau nei pats žiedas. Iš modelio 40 pav. matoma, kad guolis turi 8 sferas, todėl padalijus sferų skaičių iš lėtinimo koeficiento gaunamas sferų kontakto su išorinio guolio žiedo defektu dažnis.

$$k = \frac{N}{i}; \quad (6)$$

Čia: k – sferų kontakto su išoriniu guolio žiedu dažnis, N – sferų skaičius, i – lėtinimo koeficientas.

$$k = \frac{8}{2{,}285} = 3{,}5\ ; \quad (7)$$

Apskaičiuotas kontakto dažnis pagrindžia teoriją, kad dažnių pikas matomas ties 1225 Hz sukeltas guolio išdilimo arba defekto.

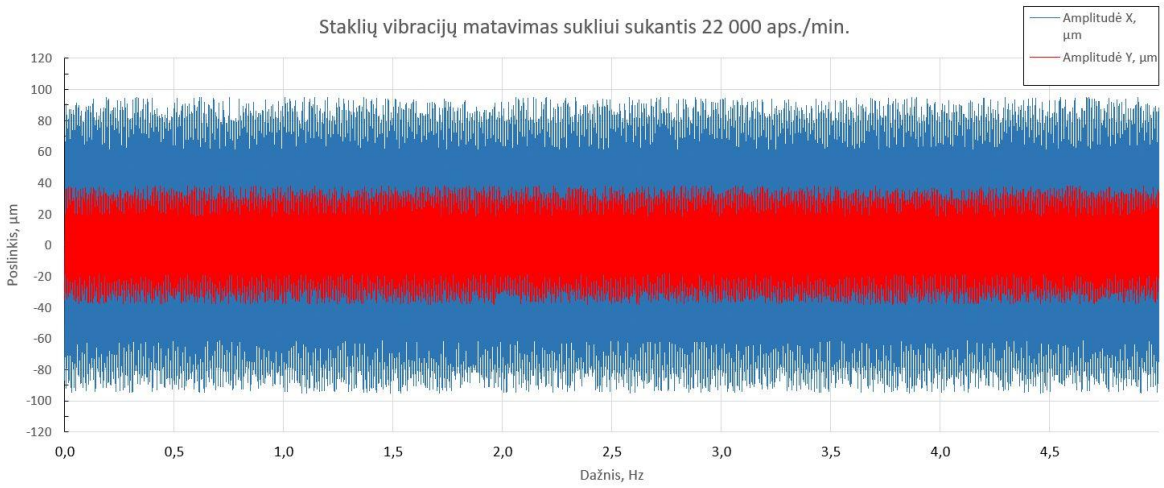


40 pav. „SKF 6005“ guolio modelio pjūvis (modelis gautas iš (SKF, 2022))

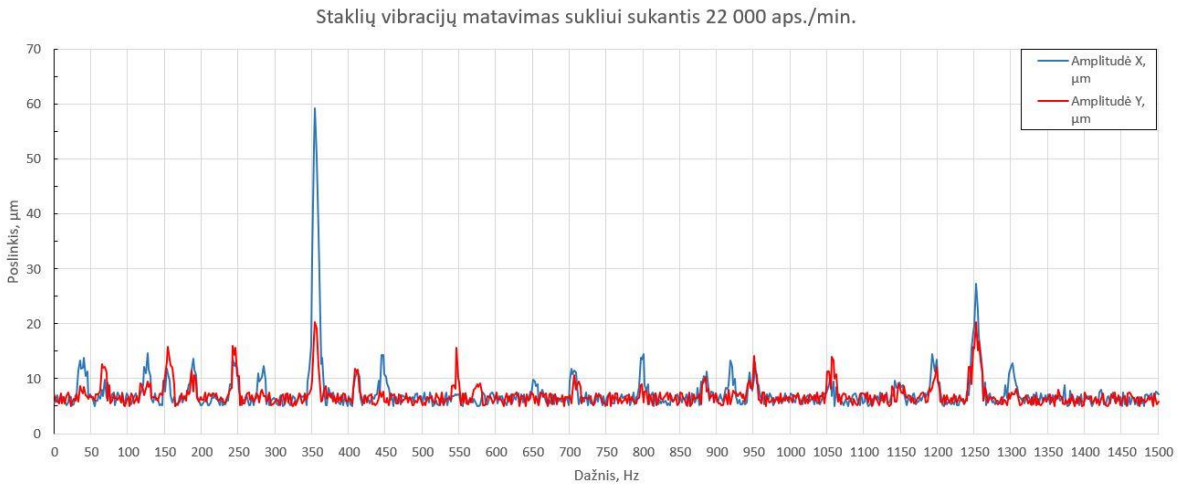
Šis guolio defekto sukeltas poslinkio pikas matomas ir tolimesniuose suklio vibracijų rezultatuose (41 pav.). Priimama, kad kiti ekstremumai pasireiškia dėl staklių rezonanso kurį sukelia šaltinio virpesių harmonikos, nes staklių rezonanso dažniai sutampa su 7 lentelėje apskaičiuotais dažniais.

41 pav. pateikiami suklio vibracijų rezultatai, kai suklio kampinis dažnis 22 000 aps./min.

a)



b)

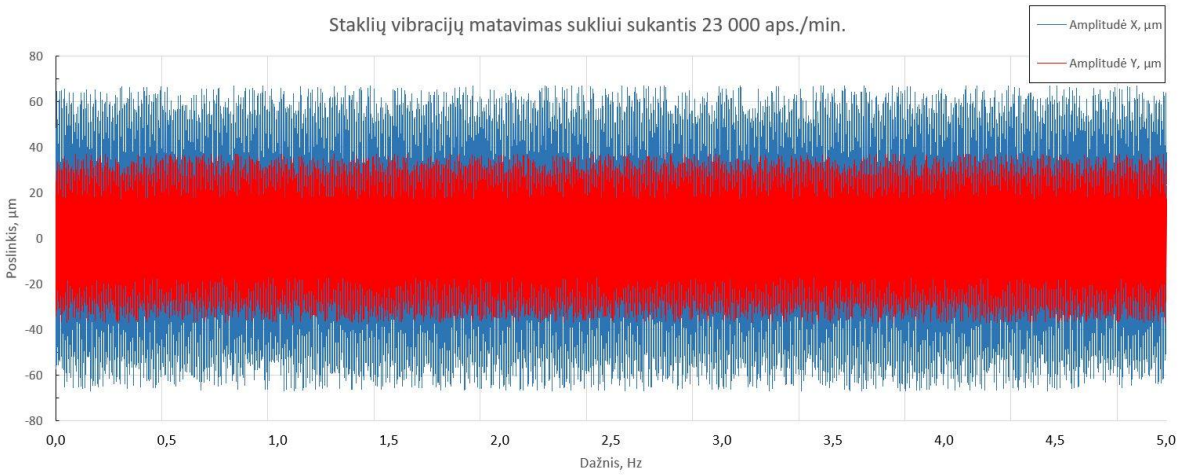


41 pav. Suklio keliamų vibracijų matavimų rezultatai sukliui sukantis 22 000 aps./min. kampiniu dažniu: a) pilnutinės vibracijos X ir Y ašių kryptimi, b) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta.

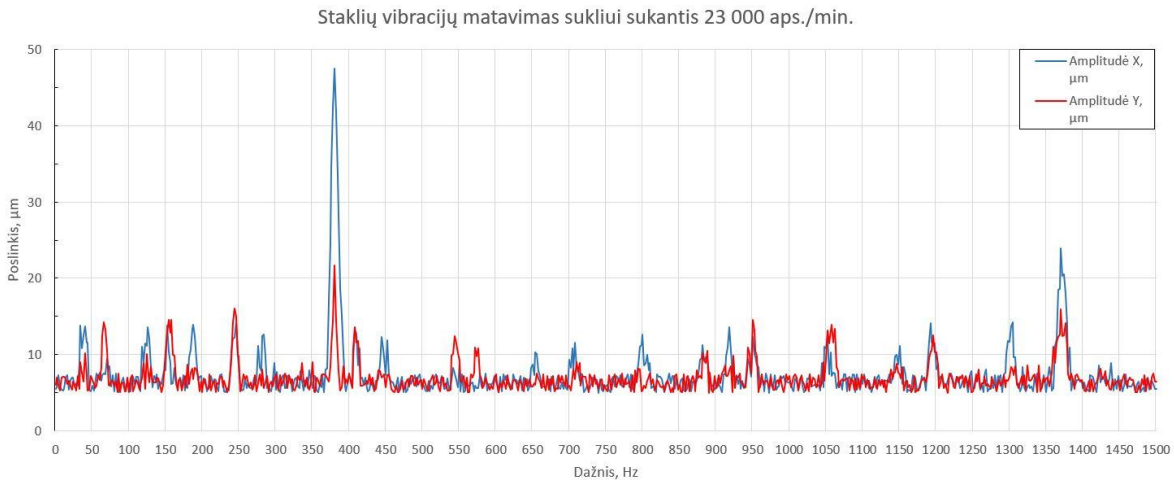
Iš 41 pav. a) grafiko matoma, jog X ašies kryptimi pilnutiniai vibracijų poslinkiai siekia 95 µm, Y ašies kryptimi poslinkiai siekia 40 µm. b) grafikas parodo, kad dvi esminės vibracijų dedamosios – 363 Hz ir 1270 Hz. Tendencija atitinka (7) formulės rezultatus, todėl priimama išvada, kad šios dedamosios yra sukeltos veleno mušimo ir guolių išdilimo. Kiti pikai yra sukeliami staklių rezonanso.

42 pav. pateikiami suklio vibracijų rezultatai, kai suklio kampinis dažnis 23 000 aps./min.

a)



b)

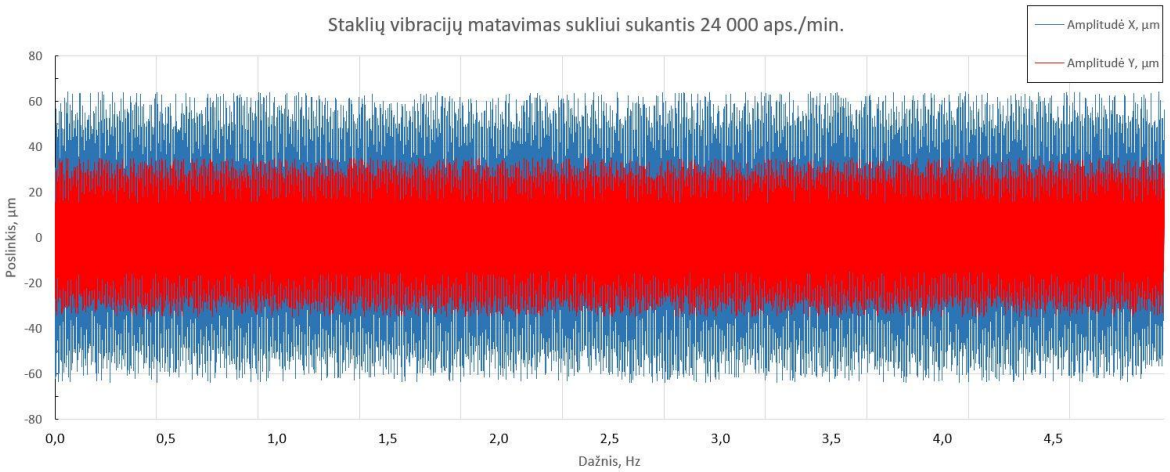


42 pav. Suklio keliamų vibracijų matavimų rezultatai sukliui sukantis 23 000 aps./min. kampiniu dažniu: a) pilnutinės vibracijos X ir Y ašių kryptimi, b) vibracijų X ir Y ašių kryptimi dažnių juosta.

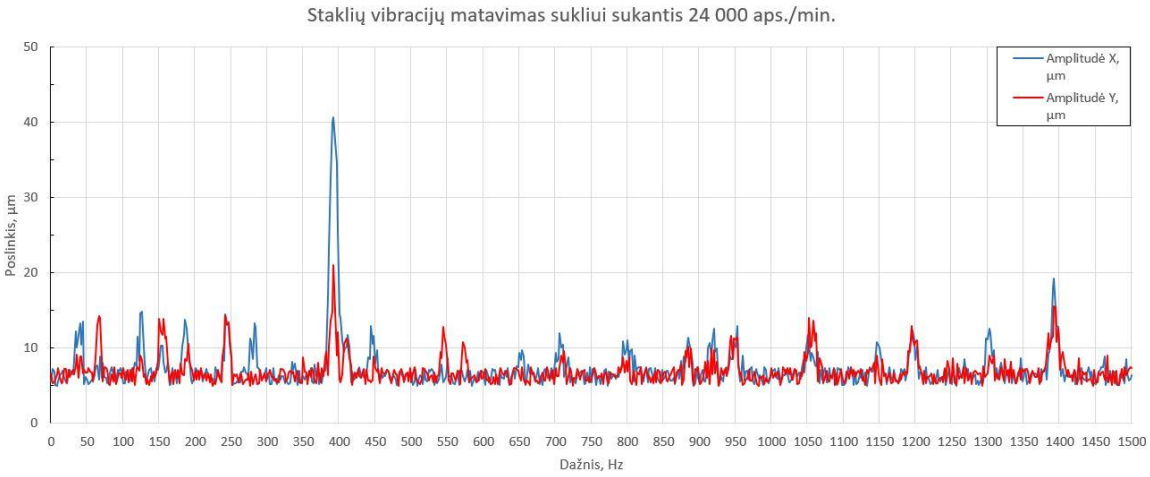
42 pav. a) sudarytas grafikas parodo, kad pilnutiniai vibracijų poslinkiai X ašies kryptimi yra 65 µm, o Y ašies kryptimi – 35 µm. b) grafike matomos dvi esminės vibracijų dedamosios – 386 Hz ir 1350 Hz. Ši informacija atitinka (7) formule apskaičiuotą santykį, todėl teigiama, kad tai veleno mušimo ir guolių išdilimo sukelti poslinkių ekstremumai. Mažesnieji pikai yra sukelti staklių rezonanso, nes dažniai sutampa su 7 lentelės duomenimis.

43 pav. pateikiami suklio vibracijų rezultatai, kai suklio kampinis dažnis 24 000 aps. / min.

a)



b)



43 pav. Suklio keliamų vibracijų matavimų rezultatai sukliui sukantis 24 000 aps./min. kampiniu dažniu: a) pilnutinės vibracijos X ir Y kryptimi, b) vibracijų X ir Y kryptimi dažnių juosta.

Iš 43 pav. a) grafiko matoma, jog X ašies kryptimi pilnutiniai vibracijų poslinkiai siekia 65 µm, Y ašies kryptimi poslinkiai siekia 35 µm. b) grafikas parodo, kad dvi esminės vibracijų dedamosios – 400 Hz ir 1400 Hz. Tendencija atitinka (7) formulės rezultatus, todėl priimama, kad šios dedamosios yra sukeltos veleno mušimo ir guolių išdilimo. Kiti pikai yra sukeliami staklių rezonanso.

Atlikus frezavimo staklių vibracijų matavimus buvo gauta, kad:

- Y sijos sraigto keliamos vibracijos sukelia suklio korpuso poslinkius, kurių dydis yra 9 µm X ašies ir 20 µm Y ašies kryptimi. Pagrindinis vibracijų šaltinis – sraigto mušimas. Pastebėta, kad pastūmos kitimas nedaro įtakos mušimo jėgai, kadangi sraigto kampinis greitis per mažas, kad sukeltų reikšmingą išcentrinę jėgą. Ši pastaba sutampa su 3.3 skyriuje pateiktais pastebėjimais apie mušimo jėgos pastovumą.
- X sijos sraigto keliamos vibracijos sukelia suklio korpuso poslinkius, kurių dydis yra 15–16 µm X ašies ir 19 µm Y ašies kryptimi. Pagrindinis vibracijų šaltinis – sraigto mušimas. Šio sraigto mušimo jėga taip pat nepriklauso nuo pastūmos.
- Suklio keliamos vibracijos sukelia suklio korpuso poslinkius, kurių dydis yra 65–130 µm X ašies ir 35–60 µm Y ašies kryptimi. Pagrindiniai vibracijų šaltiniai – veleno mušimas ir veleno guolių išdilimas.

5. REZULTATŲ SANTRAUKA

Šiame skyriuje glaustai pateikiami išmatuoti ir apskaičiuoti rezultatai. Skyriaus tikslas – pateikti turimus rezultatus, kad būtų galima greitai ir sklandžiai peržvelgti tyrimo gavinius.

14 lentelėje pateikiami išmatuoti virpesių šaltinių parametrai. Radialinis sraigtų mušimas išmatuotas su „Mitutoyo 2046S“ indikatoriumi. Suklio veleno disbalansas išmatuotas su „EBS R10B-VS“ rotorių balansavimo mašina.

14 lentelė. Virpesių šaltinių parametrai

X sijos sraigto radialinis mušimas	Y sijos sraigto radialinis mušimas	Suklio veleno disbalansas
0,79 mm	2,01 mm	0,0994 kg*mm

15 lentelėje pateikiami apskaičiuoti staklių rezonansiniai dažniai. Dažniai apskaičiuoti naudojant „Ansys“ programinę įrangą.

15 lentelė. Apskaičiuoti staklių rezonansiniai dažniai

Rezonansinio dažnio Nr.	Dažnis, Hz	Rezonansinio dažnio Nr.	Dažnis, Hz
1	41,72	16	716,78
2	75	17	746,24
3	133,67	18	818,05
4	159,06	19	846,07
5	192,28	20	895,44
6	248,27	21	930,09
7	287,18	22	961,95
8	317,18	23	967,61
9	330,38	24	976,26
10	414,57	25	1075,7
11	450,81	26	1091,1
12	550,28	27	1160,1
13	581,57	28	1213,1
14	629,89	29	1316,9
15	663,44		

16 lentelėje pateikiami apskaičiuoti (teoriniai) ir pamatuoti (praktiniai) staklių virpesių rezultatai. Skaičiavimai atlikti naudojant „Ansys“ programinę įrangą, matavimai atlikti naudojant „National Instruments NI USB-4431“ signalo imtuvą su dviem vienetais „IMI Sensors 603C01“ akcelerometrų. Darbiniai staklių parametrai pateikiami paryškintais simboliais.

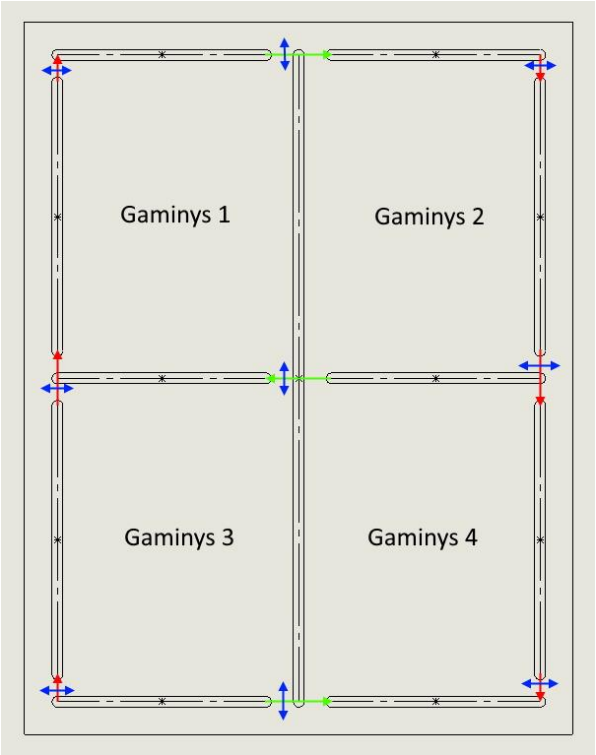
16 lentelė. Teoriniai ir praktiniai tyrimo rezultatai

			X sijos pastūma mm/min.			Y sijos pastūma mm/min.			Suklio kampinis dažnis, aps./min.			
			400	**500**	600	400	**500**	600	21000	22000	23000	**24000**
Dinaminis tikslumas	**Teorinis**	X ašies kryptimi, µm	18	**18**	18	12	**12**	12	94	66	55	**48**
		Y ašies kryptimi, µm	21	**21**	21	25	**25**	25	30	20	16	**16**
	Praktinis	X ašies kryptimi, µm	16	**16**	16	9	**9**	9	130	95	65	**65**
		Y ašies kryptimi, µm	19	**19**	19	20	**20**	20	60	40	35	**35**

Šiame skyriuje buvo pateikta darbe gautų teorinių ir praktinių rezultatų santrauka. Duomenys pateikiami pagal tyrimo veiksmų seką. 16 lentelės duomenys naudojami 6 skyriuje apskaičiuojant staklių pilnutinį dinaminį tikslumą.

6. REZULTATŲ APDOROJIMAS

Atlikus tyrimus gauti atskirų šaltinių keliamų vibracijų poslinkiai. Tam, kad būtų gautas suminis staklių tikslumas, atitinkamus rezultatus reikia sudėti. Rezultatų sumavimo metodika aiškinama remiantis 44 pav. pateiktu pjūvių eskizu:



44 pav. Spausdintinės plokštės frezavimo pjūvių eskizas (brėžinį parengė darbo autorius)

Eskize pavaizduota spausdintinių elektronikos plokščių technologinė paletė. Paletė leidžia vienu metu gaminti kelis gaminius, taip pasiekiamas didesnis gamybos našumas ir proceso atkartojamumas. Pavaizduotoje technologinėje paletėje yra 4 gaminiai, kurie sujungti vienas su kitu. Paskutiniame elektronikos plokštės gamybos etape atliekamas gaminių išpjovimas, kad gaminiai būtų atskirti nuo technologinės paletės ir vienas nuo kito. Išpjovimas atliekamas frezuojant gaminių sujungimus X arba Y ašių kryptimis. X ašies krypties pjūviai 44 pav. pažymėti žaliomis rodyklėmis, Y ašies krypties – raudonomis. Gaminio formai įtaką daro vibracijų sukeliami poslinkiai, kurie yra statmeni pastūmos krypčiai (mėlynos rodyklės eskize). Tai reiškia, kad pjaunant X ašies kryptimi įtaką gaminio formai darys Y ašies krypties vibraciniai poslinkiai, pjaunant Y ašies kryptimi – X ašies krypties poslinkiai. Šie poslinkiai sumuojami su suklio virpesių sukeltais atitinkamų krypčių poslinkiais naudojant (8) ir (9) formules:

$$\delta_X = \delta_{sX} + \delta_{YsrX}; \tag{8}$$

Čia: δ_X – staklių dinaminės paklaidos X ašies kryptimi, δ_{sX} – suklio virpesių sukelti poslinkiai X ašies kryptimi, δ_{YsrX} – Y sijos virpesių sukelti poslinkiai X ašies kryptimi.

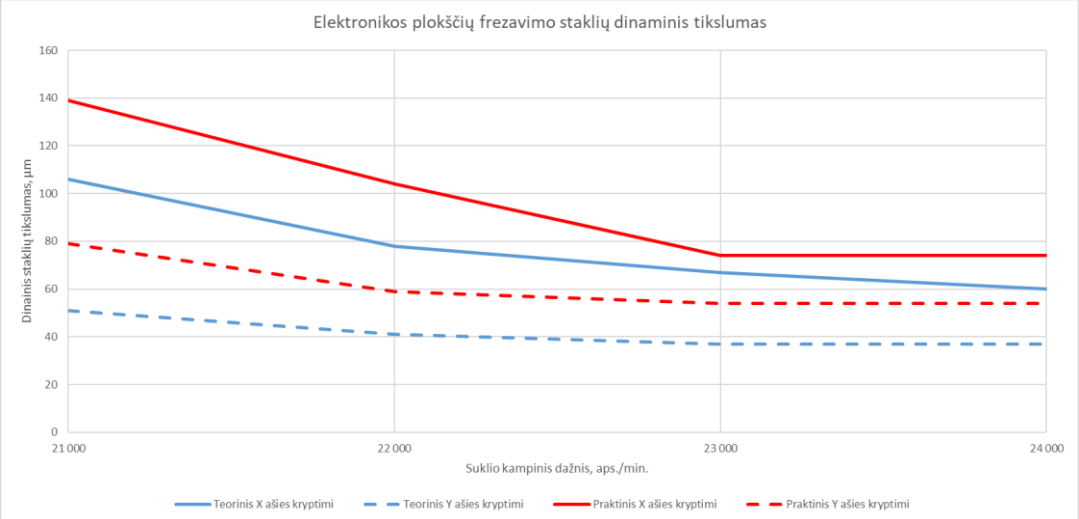
$$\delta_Y = \delta_{sY} + \delta_{XsrY}; \quad (9)$$

Čia: δ_Y – staklių dinaminės paklaidos Y ašies kryptimi, δ_{sY} – suklio virpesių sukelti poslinkiai Y ašies kryptimi, δ_{XsrY} – X sijos virpesių sukelti poslinkiai Y ašies kryptimi.

17 lentelėje bei 45 pav. pateikiamos staklių dinaminio tikslumo teorinės bei praktinės vertės kurios apskaičiuotos remiantis (8) ir (9) formulėmis. Gamyboje naudojami parametrai paryškinti.

17 lentelė. Elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminis tikslumas

			Suklio kampinis dažnis			
			21 000 aps./min.	22 000 aps./min.	23 000 aps./min.	**24 000 aps./min.**
Dinaminis staklių tikslumas	Teorinis	X ašies kryptimi, µm	± 106	± 78	± 67	**± 60**
		Y ašies kryptimi, µm	± 51	± 41	± 37	**± 37**
	Praktinis	X ašies kryptimi, µm	± 139	± 104	± 74	**± 74**
		Y ašies kryptimi, µm	± 79	± 59	± 54	**± 54**



45 pav. Elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminio tikslumo grafikas

Iš rezultatų matoma, kad X sijos pamatuoti (praktiniai) poslinkiai yra 10,5–33,3 % didesni nei teoriniai, Y sijos pamatuoti poslinkiai yra 44–55 % didesni nei teoriniai. Daroma išvada, jog atliekant teorinius skaičiavimus neįvertintas sujungimo elementų standumas ir guolių susidėvėjimas, todėl apskaičiuotos paklaidos yra mažesnės nei išmatuotos. Iš praktinių staklių tikslumo rezultatų matoma, kad didžiausias pjūvių tikslumas gaunamas naudojant 24 000 aps. / min. suklio kampinį greitį. Didžiausias tikslumas gaunamas todėl, kad, lyginant su parinktais suklio greičiais, šio kampinio dažnio keliami virpesiai ir jų harmonikos labiausiai nesutampa su staklių rezonansiniais dažniais, kaip minima 3.4 skyriaus pabaigoje. Naudojant tokį suklio greitį gaunamos pjūvio paklaidos yra ± 74 µm X ašies kryptimi ir ± 54 µm Y ašies kryptimi.

IŠVADOS

Atlikus literatūros analizę sudaryta metodika spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminiams tyrimams atlikti. Darbe atlikti staklių dinaminiai tyrimai – baigtinių elementų analizė ir praktiniai matavimai. Palyginus teorinių ir praktinių rezultatų ekstremumus išaiškinti paklaidų šaltiniai.

1. Atlikus tyrimą gautos staklių dinaminės paklaidos X ašies kryptimi. Apskaičiuotos ± 60 µm paklaidos, pamatuotos ± 74 µm paklaidos. Pamatuotos paklaidos yra 23,3 procentais didesnės nei apskaičiuotosios.
2. Atlikus tyrimą gautos staklių dinaminės paklaidos Y ašies kryptimi. Apskaičiuotos ± 37 µm paklaidos, pamatuotos ± 54 µm paklaidos. Pamatuotos paklaidos yra 45,9 procentais didesnės nei apskaičiuotosios.
3. Išmatuotos pjūvių pozicijos paklaidos yra mažesnės nei ± 0,1 mm, todėl priimama, kad dinaminis staklių tikslumas yra pakankamas gaminti pramoninei elektronikai.
4. Palyginus apskaičiuotus ir pamatuotus rezultatus gauta, kad staklių dinaminiam tikslumui įtaką daro:
    - X ir Y sijas varančių sraigtų radialinis mušimas (neleistina viršyti 16 µm radialinio mušimo).
    - Suklio veleno disbalansas (neleistina viršyti G 2,5 balansavimo klasės – 1,771 g*mm).
    - Suklio guolių išdilimas (neleistina viršyti 10–15 µm radialinio mušimo).
    - Tvirtinimo elementų standumas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Afkhamifar, A., Antonelli, D., ir Chiabert, P. (2016). Variational analysis for CNC milling process. *Procedia CIRP 43*, 118–123.

Akbari, S., Nourani, A., ir Spelt, J. K. (2017). Predicting delamination in multilayer composite circuit boards. *Engineering Fracture Mechanics*.

AZoNetwork. (2022 m. 02 27 d.). *Tungsten Carbide - An Overview*. Nuskaityta iš AZO materials: https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1203

Chiu, H.-W., ir Lee, C.-H. (2017). Prediction of machining accuracy and surface quality for CNC machine tools using data driven approach. *Advances in Engineering Software 114*, 246–257.

Conway, J. R., Darling, A. L., Ernesto, C. A., Farouki, R. T., ir Palomares, C. A. (2013). Experimental study of contouring accuracy for CNC machines executing curved paths with constant and curvature-dependent feedrates. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 29*, 357-369.

EBS Balancing Machine. (2022 m. Balandžio 12 d.). *R10B-VS*. Nuskaityta iš EBS Balancing Machine: https://www.ebs-balancing.com/machine-type/r10b-vs-horizontal-balancing-machine/

Franco, J., Kaczer, B., ir Groeseneken, G. (2014). *Reliability of High Mobility SiGe Channel MOSFETs for Future CMOS Applications.* Springer Netherlands.

Guo, S., Zhang, D., ir Xi, Y. (2016). Global Quantitative Sensitivity Analysis and Compensation of Geometric Errors of CNC Machine Tool. *Mathematical Problems in Engineering, vol. 2016*, 12.

HIWIN. (2022, Kovo 22). Linear guideways.

I.S.N.V.R.Prashanth, Shankar, D., Hussain, M., ir Reddy, D. (2017). Performances of different mill cutters in machining of GFRP Composite Laminates. *Materials Today: Proceedings 4*, 2800–2805.

International Organisation of Standardization. (2001). *Test conditions for machining centres — Part 2: Geometric tests for machines with vertical spindle or universal heads with vertical primary rotary axis (vertical Z-axis) (ISO standarto Nr.: 10791-2:2001).* Nuskaityta iš https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=aleph&id=1278971

IPC. (1991). *Design Standard for Rigid Printed Boards and Rigid Printed Board Assemblies.*

Jalaludin, A. H., Shukor, M. H., Mardi, N. A., Sarhan, A. A., Karim, M. S., Besharati, S. R., . . . Dambatta, Y. S. (2017). Development and evaluation of the machining performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume 93*, 1347–1356.

Kasparaitis, A., Kilikevičius, A., Barakauskas, A., ir Mokšin, V. (2012). Experimental research of vibrations of angle measurement comparator. *Journal of vibroengineering*.

Kilikevičius, A., Prokopovič, V., ir Makarskas, V. (2013). Kampo matavimo komparatoriaus dinaminių charakteristikų tyrimai. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 625–628.

Limit. (2022 m. balandžio 30 d.). *ELEC.MICROM.0-150 23263-620*. Nuskaityta iš Limit – Precision Made Easy: https://limit-tools.com/product/elec-microm-0-150-23263-620/

Lin, Z.-C., ir Ho, C.-Y. (2009). Performance of coated tungsten carbide tools on milling. *journal of materials processing technology 209*, 303–309.

Liu, J., Chen, G., Ren, C., Qin, X., Zou, Y., ir Ge, J. (2020). Effects of axial and longitudinal – torsional vibration on fiber removal in. *Journal of Manufacturing Processes*, 868–883.

Mitutoyo America Corporation. (2022 m. Balandžio 12 d.). *Metric Standard Type-Series 2*. Nuskaityta iš Mitutoyo: https://www.mitutoyo.com/products/small-tool-instruments-and-data-management/indicators/dial-indicators/metric-standard-type-series-2/

Mou, W., Zhu, S., Jiang, Z., ir Song, G. (2020). Vibration signal-based chatter identification for. *Chinese Journal of Aeronautics*.

Nghiep , T. N., Sarhan, A., ir Aoyama, H. (2018). Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace. *Measurement 125*, 476–495.

Olejárová, Š., Dobránsky, J., Svetlík, J., ir Pituk, M. (2017). Measurements and evaluation of measurements of vibrations. *Measurement 106*, 18–25.

PCB Piezotronics, Inc. (2022 m. Balandžio 14 d.). *Model : 603C01 | Platinum Low-cost Industrial ICP® Accelerometer*. Nuskaityta iš PCB Piezotronics An Amphenol Company: https://www.pcb.com/products?m=603c01

PCB Universe. (2020 m. 11 22 d.). *Products: Flex*. Nuskaityta iš PCB Universe Printed Circuit Boards: http://www.pcbuniverse.com/pcbu-flex-pcb.php

Pierson, B., Faestel, P., Spector, J. T., ir Johnson, P. (2021). Preliminary comparison of vibration measurement accuracy between a low cost, portable acceleration measurement unit and a gold-standard accelerometer system. *Applied Ergonomics 90*, -.

Radzevich, S. P. (2016). *Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture*. CRC Press.

Raksiri, C., ir Parnichkun, M. (2004). Geometric and force errors compensation in a 3-axis. *International Journal of Machine Tools* & *Manufacture 44*, 1283–1291.

Rubio-Mateos, A., Casuso, M., Rivero, A., Ukar, E., ir Lamikiz, A. (2020). Vibrations characterization in milling of low stiffness parts with a rubber-based vacuum fixture. *Chinese Journal of Aeronautics*.

Sarhan, A. A., ir Matsubara, A. (2015). Investigation about the characterization of machine tool spindle stiffness for intelligent CNC end milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 34*, 133–139.

Schenck, H. V. (1979). *Theories Of Engineering Experimentation.* CRC Press.

Schuerink, G., Slomp, M., Wits, W. W., Legtenberg, R., ir Kappel, E. (2013). Modeling printed circuit board curvature in relation to. *Procedia CIRP 9*, 55–60.

SKF. (2022 m. 05 21 d.). *6005*. Nuskaityta iš SKF Deep Groove Ball Bearings: https://www.skf.com/au/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6005

Somashekar, V. N., Harikrishnan, S., Ahmed, P. A., ir Kamesh, D. (2016). Vibration Response Prediction of the Printed Circuit Boards using. *Procedia Engineering 144*, 576–583.

Sood, B., ir Pecht, M. (2018). The effect of epoxy/glass interfaces on CAF failures in printed circuit boards. *Microelectronics Reliability*.

Standardization, I. O. (2016). *Geneva, Switzerland Patento Nr. ISO 21940-12:2016.*

Stejskal, T., Svetlík, J., Dovica, M., Demeč, P., ir Král, J. (2018). Measurement of Static Stiffness after Motion on a. *Applied Sciences Volume 8, Issue 1*.

Steward, J. (2022 m. Balandžio 17 d.). The Ultimate List of Marketing Automation Statistics 2022.

Tatar, K., ir Gren, P. (2008). Measurement of milling tool vibrations during cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture 48*, 380–387.

Thong, Y. K., Woolfson, M. S., Crowe, J. A., Hayes-Gill, B. R., ir Jones, D. A. (2004). Numerical double integration of acceleration measurements in noise. *Measurement, Volume 36, Issue 1*, 73–92.

United Nations Industrial Development Organization. (2022). *World Manufacturing Production Statistics for Quarter IV 2021.* United Nations Industrial Development Organization.

Wei, X., Su, Z., Yang, X., Lv, Z., Yang, Z., Zhang, H., . . . Fang, F. (2019). A Novel Method for the Measurement of Geometric Errors in the Linear Motion of CNC Machine Tools. *Applied Sciences 9*.

Wenbin, T., Ying, X., Hao, L., Chengyong, W., ir Lijuan, Z. (2020). Machining accuracy detection of PCB hole by X-ray micro-CT. *Micron 131*.

Wu, H., Zheng, H., Li, X., Wang, W., Xiang, X., ir Meng, X. (2021). A geometric accuracy analysis and tolerance robust design approach for. *Measurement Volume 181*.

Zahaf, M. Z., ir Benghersallah, M. (2021). Surface roughness and vibration analysis in end milling of annealed and. *Measurement: Sensors*.

PRIEDAI

1 priedas. Straipsnis pristatytas 25-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“

ELEKTRONIKOS PLOKŠČIŲ FREZAVIMO STAKLIŲ DINAMINIAI TYRIMAI

Rytis ŠVEINAUSKAS ORCID iD (0000-0003-3495-7268)[1], Paulius RAGAUSKAS 2, Ieva Švagždytė ORCID iD (0000-0002-1792-2728)[3]

[1]*Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra, Vilnius Tech, Vilnius, Lietuva*
[2]*Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra, Vilnius Tech, Vilnius, Lietuva*
[3]*Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra, Vilnius Tech, Vilnius, Lietuva*

Santrauka. *Straipsnyje aprašomas elektronikos plokščių frezavimo staklių teorinis dinaminis tyrimas. Tyrimo tikslas – apskaičiuoti elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminį tikslumą X ir Y kryptimis. Tikslumas išreiškiamas mikrometrais, aprašant tolerancijų lauko dydį. Tyrime nustatomas vibracijų poveikis frezavimo tikslumui. Vibracijas sukelia staklių pastūmų sraigtinių pavarų ir suklio radialinio mušimo sukeliami virpesiai. Tyrimas atliekamas „Solidworks“ ir „Ansys“ programine įranga. Darbe rastos staklių dinaminės paklaidos X ir Y pagal išmatuotas žadinimo vertes.*

Reikšminiai žodžiai: Virpesiai, CNC staklės, dinaminės paklaidos, frezavimas.

ĮVADAS

Elektronikos plokščių gamyboje naudojama daugybė skirtingų procesų: cheminis ėsdinimas, terminis sluoksnių sukabinimas, elektrolizė, gręžimas ir t.t. Šiuolaikinės plokštės yra itin sudėtingos ir joms apdirbti reikalingas aukštas tikslumas. Pati paprasčiausia elektronikos plokštė gali būti sudaryta iš vieno dielektrinio ir vieno laidaus sluoksnio, o sudėtingos plokštės gali būti sudaromos iš keliolikos ar daugiau tokių sluoksnių. Dažniausiai tokios plokštės storis – 1,6 mm, tačiau gaminamos 0,4 mm arba 3 mm storio plokštes.

Šiame darbe nagrinėjamos elektronikos plokščių frezavimo staklės, skirtos spausdintinėms plokštėms išpjauti iš technologinės paletės, gali būti nuo dviejų vienetų iki šimtų vienetų plokščių paruošų. Plokščių išpjovimui populiariausi yra du metodai – pjovimas lazeriu arba frezavimas, tačiau dėl geresnio kainos ir našumo santykio dažniau naudojamas frezavimo procesas. Lyginant su pjovimu lazeriu, frezavimas yra mažiau tikslus procesas, kadangi gaminys yra tiesiogiai veikiamas mechaninio kontakto su frezavimo įrankiu. Siekiant didelio išpjovimo našumo naudojami aukšti įrankio sūkiai ir didelės pastūmos. Kai kuriais atvejais plokštės gali būti sugadinamos dėl didelių frezavimo jėgų. Vienas iš galimų gedimų aprašomas (Sood & Pecht, 2018) straipsnyje – įtrūkiai atsiradę plokštėje gali sukelti anodinio užpildo susidarymą, kuris per laiką gali sudaryti trumpą jungimą gaminyje.

Naudojant didelius sūkius ir pastūmas išskiriama daug mechaninės energijos, kuri veikia staklių konstrukcijos elementus. Dėl šios priežasties išryškėja staklių konstrukcijos trūkumai ar paklaidos taip sukeldami apdirbimo nuokrypius. Apdirbimo tikslumas yra vienas iš pagrindinių parametrų kuris yra naudojamas plokštės mechaniniams parametrams nusakyti. Dažniausiai plokščių gamyboje naudojamas ± 0,1 mm ir ± 0,2 mm tikslumas (JLCPCB, 2022) (Multi Circuit Boards Ltd., 2202) (PCBWay, 2022) (PCB Baltic, 2022), tačiau yra ir specifinių atvejų kai reikalingas ± 0,05 mm tikslumas.

Tyrimo objektas. Spausdintinių elektronikos plokščių frezavimo staklės „Supra M“.

Tyrimo tikslas. Nustatyti kokio dydžio poslinkius sukelia vibracijos kurias sužadina vidiniai vibracijų šaltiniai. Šiame straipsnyje aprašomi elektronikos plokščių frezavimo staklių teoriniai dinaminiai tyrimai. Tyrimu siekiama nustatyti vibracijų sukeliamų paklaidų dydžius. Šios paklaidos sukelia įrankio nepageidaujamus poslinkius, kurie daro tiesioginę įtaką pjovimo tikslumui. Virpesius šiose staklėse sukelia X ir Y sijų pavarų sraigtų ir suklio radialinis mušimas. Kadangi technologinės paletės frezavimas vykdomas per visą plokštės storį ir tik X ir Y ašių kryptimis, tiriamos tik X ir Y kryptimis atsirandančios paklaidos.

Tyrimas atliekamas teoriniu būdu, „Solidworks“ ir „Ansys“ programine įranga. Pirmiausia išmatuojami X ir Y ašių sraigtų radialiniai mušimai bei išmatuojamas suklio veleno dinaminis disbalansas. Sraigtų mušimas matuojamas laikrodiniu indikatoriumi „Mitutoyo 2046S“, veleno disbalansas matuojamas rotorių balansavimo mašina „EBS R10B-VS“. Tuomet „Solidworks“ aplinkoje sudaromas staklių modelis, įkeliamas į „Ansys“ aplinką ir atliekami skaičiavimai naudojant išmatuotas ir apskaičiuotas vibracijų žadinimo vertes. Skaičiavimams atlikti pasirinkta „Ansys“ programinė įranga, kadangi ji leidžia:

- Detaliau aprašyti tyrimo sąlygas – aprašyti kūną kaip besisukantį (tuomet jam taikomas Koriolio efektas, giroskopinės jėgos ir kt.); aprašyti besisukančio kūno mušimo jėgą įvedant disbalansą; įvertinti terminius sistemos pokyčius skaičiuojant mechaninius uždavinius.
- Sistemingiau sudėlioti tyrimo eigą – sudėlioti tyrimo medį kuris parodo sąsajas tarp skaičiavimų; skaičiavime gaunamus rezultatus įkelti į kitą skaičiavimą ir juos automatiškai atnaujinti.
- Įvesti išplėstinius sąlygų nustatymus kurių nėra „Solidworks“ – valdyti skaičiavimo tinklo kokybę rankiniu būdu, rezultatus automatiškai pateikti lentelėmis, grafikais, erdviniais arba modeliais; automatiškai sudaryti tyrimo raportą.

Darbo naujumas: Atlikus literatūros analizę pastebėta, kad daugumoje nagrinėtų straipsnių rašoma apie staklių paklaidų šaltinius arba paklaidų dydį. Dažniausiai parenkama siaura tyrimo sritis ir prarandamas potencialas aprašyti visą poveikio sistemai spektrą. Toliau pateikiami straipsnių pavyzdžiai kurie pagrindžia atlikto tyrimo naujumą:

1. (Sarhan & Matsubara, 2015) darbe rašoma apie suklio standumo matavimus esant skirtingai suklio temperatūrai ir skirtingiems suklio kampiniams dažniams. Rezultatai matuoti sukliui sukantis 3 000, 6 000 ir 9 000 apsisukimų per minutę, 20-24 laipsnių celsijaus temperatūros ruože. Rezultatai byloja, kad temperatūros pokytis turi nykstamai mažą įtaką suklio standumui. Didžiausią įtaką standumui daro kampinis suklio greitis. Apkrova standumo atžvilgiu turi tiesinę priklausomybę. Naudojantis šiuo straipsniu priimama, kad elektronikos plokščių frezavimo staklių tyrime suklio temperatūros pokytis bus nepaisomas, kadangi suklio standumas nepasikeis - nepakis ir vibracijų amplitudė. Naujumo prasme, šis darbas susitelkia į vienos problemos aiškinimą ir hipotezių kūrimą. Darbe gauti rezultatai nesuformuoja baigtinio staklių tikslumo, kuriam įtaką daro standumas ir nesudaro baigtinio situacijos vaizdo.
2. (Somashekar, Harikrishnan, Ahmed, & Kamesh, 2016) darbe rašoma apie metodą, kuris leidžia atlikti nesudėtingą baigtinių elementų analizę, kuri duoda tikslius rezultatus ir eliminuoja praktinių matavimų

poreikį. Toks metodas padeda mažinti tyrimams sunaudojamą laiką ir įrangos kaštus. Tyrimai atliekami naudojant „MSC.NASTRAN“ programinę įrangą baigtinių elementų analizei ir vibracijų matavimo įrankį skaičiavimo rezultatams patikrinti. Tyrimai atliekami tiriant tris spausdintines elektronikos plokštes: pirmoji – 2,1 mm storio plokštė su 9 tvirtinimo taškais, antroji - 2,1 mm storio plokštė su 8 tvirtinimo taškais, trečioji – 1,6 mm storio plokštė su 9 tvirtinimo taškais. Rezultatai rodo, kad tarp baigtinių elementų skaičiavimo ir praktinio tyrimo rezultatų gautas skirtumas yra –10,13–11,16 procentų ruože. Darbe teigiama, kad apskaičiuoti rezultatai yra pakankamai artimi išmatuotoms reikšmėms ir pakankamas tikslumas yra pasiektas panaudojus 2 procentų slopinimo koeficientą. Šio straipsnio metodika leido atlikti tikslesnius elektronikos plokščių frezavimo staklių tyrimus parenkant tinkamą slopinimo koeficientą (2 procentus). Naujumo prasme, darbas sutelktas į siaurą ir specifinę sritį, tačiau praplėtus tyrimo spektrą būtų galima labiau įsigilinti į metodo patikimumą ir pagrindines kliūtis pasiekti reikalingą tikslumą. Tyrimo spektro praplėtimui būtų naudinga atkreipti dėmesį į šiuos aspektus: nagrinėjamos plokštės nėra užpildytos komponentais, parinkti tik trys bandiniai, neįvertinami vibracijų sukeliami poslinkiai.

3. (Tatar & Gren, 2008) darbe rašoma apie alternatyvią frezavimo įrankio vibracijų matavimo metodiką. Frezavimo vibracijos aprašomame tyrime matuojamos lazeriniu interferometru frezuojant medžiagą. Gaunami duomenys - įrankio poslinkis lazerio spindulio kryptimi skirtingu laiko momentu. Iš šių duomenų vėliau išreiškiamos pjovimo jėgos, įrankio poslinkio greitis ir vibracijų dažniai. Rezultatai sulyginami su praktikoje naudojamų akselerometrų ir jėgos matavimo duomenimis. Pasirinktas matavimo būdas yra pranašus, nes poslinkio vertės yra matuojamos tiesiai nuo pjaunančio įrankio paviršiaus labai arti pjaunančių briaunų. Gauta informacija rodo, kad rezultatai koreliuoja su akselerometrų ir jėgos matavimo duomenimis. Tyrime aprašoma kaip iš matavimų signalo yra išfiltruojami optiniai trikdžiai, kaip gaunamos veleno ir įrankio mušimo vertės bei kaip gaunami jų harmoniniai virpesių dažniai. Remiantis šia informacija suformuotas fundamentalus staklių vibracijų šaltinių suvokimas. Šios žinios panaudotos elektronikos plokščių frezavimo staklių vibracijų šaltiniams atpažinti. Vertinant straipsnį pagal anksčiau iškeltą naujumo problematiką, šis tyrimas atliekamas plačiai ir jame įsigilinama į matavimo įrangos problematiką. Dėmesys atkreipiamas į optinės terpės švarumą, lazerio spindulį atspindinčio paviršiaus švarumą, įrankio radialinio mušimo sukeliamus virpesius, staklių rėmo virpesius, įrankį veikiančias jėgas ir gauto paviršiaus šiurkštumą. Naujumo prasme, šis straipsnis į įvertina keliamos problemos kompleksiškumą ir išnagrinėja platų priežasčių spektrą. Pateikiami rezultatai atskleidžia virpesių priežastis, dydžius ir parodo reikalingas matavmo priemones.

Šiame darbe spausdintinių plokščių frezavimo staklių dinaminių charakteristikų kompleksiniu tyrimu norima pateikti platesnį staklių dinaminio tikslumo vaizdą. Siekiama įvertinti vibracijų pasekmes pjūvio tikslumui ir nustatyti kurie mazgai jas sukelia

1. METODINĖ DALIS

Uždaviniai. Šiame straipsnyje aprašomas staklių vibracijų teorinis ir praktinis tyrimas. Gauti rezultatai parodo X, Y sijų sraigtų bei suklio virpesių sukeliamų nuokrypių dydį.

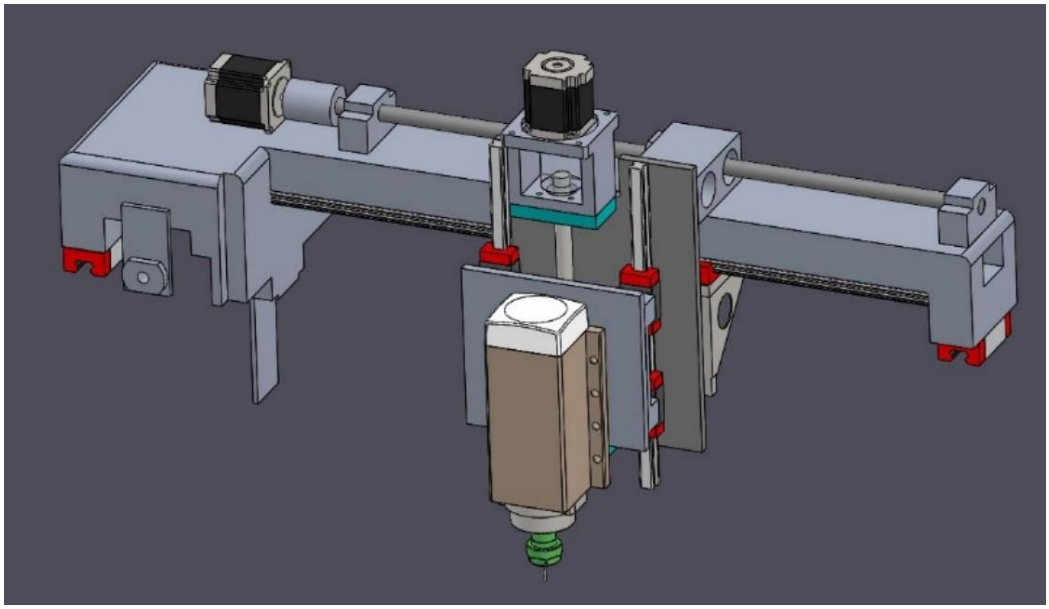
Šiame tyrime atliekamas teorinis virpesių amplitudės skaičiavimas „Ansys“ programine įranga. Gaunami rezultatai parodo, kokia amplitude virpės frezos galiukas ir suklio korpusas kai:

1. X ašis juda 400, 500, 600 milimetrų per minutę pastūma.
2. Y ašis juda 400, 500, 600 milimetrų per minutę pastūma.
3. Suklys sukasi 21 000, 22 000, 23 000, 24 000 apsisukimų per minutę greičiu.

Virpesių šaltiniams aprašyti išmatuojami ir apskaičiuojami virpesius sukeliančių jėgų dydžiai:

- Naudojant rotorių balansavimo mašiną „EBS R10B-VS“ matuojamas suklio disbalansas.
- Naudojant laikrodinį indikatorių išmatuojami X ir Y sraigtų mušimai.
- Naudojant „Solidworks“ programinę įrangą sudaromas staklių modelis
- „Ansys“ programine įranga apskaičiuojamos suklio radialinio mušimo sukeliamos ciklinės jėgos.
- „Ansys“ programine įranga apskaičiuojamos X ir Y ašių sraigtų radialinio mušimo sukeliamos ciklinės jėgos.

Teorinio uždavinio formuluotė. Staklių vibracijų teoriniams skaičiavimams sudaromas teorinis staklių modelis (1 pav.).



1 pav. Teorinis staklių "Supra M" modelis (modelį parengė darbo autorius)

Skaičiavimai atliekami naudojant „Ansys“ programinę įrangą. Staklių dalių medžiagos atitikmenys parenkami standartinėje programos medžiagų bibliotekoje. Skaičiavimuose anksčiau aprašyti judesio parametrai vertinami kaip atskiri atvejai. Atvejus išskaidyti nuspręsta tam, kad būtų galima įvertinti kiekvieno judesio komponento poveikį į pilnutinę paklaidą.

Pirmiausia skaičiuojami staklių rezonansiniai dažniai. Modalinės analizės rezultatai padės pagrįsti staklių poslinkių pakitimus kintant virpesių dažniams.

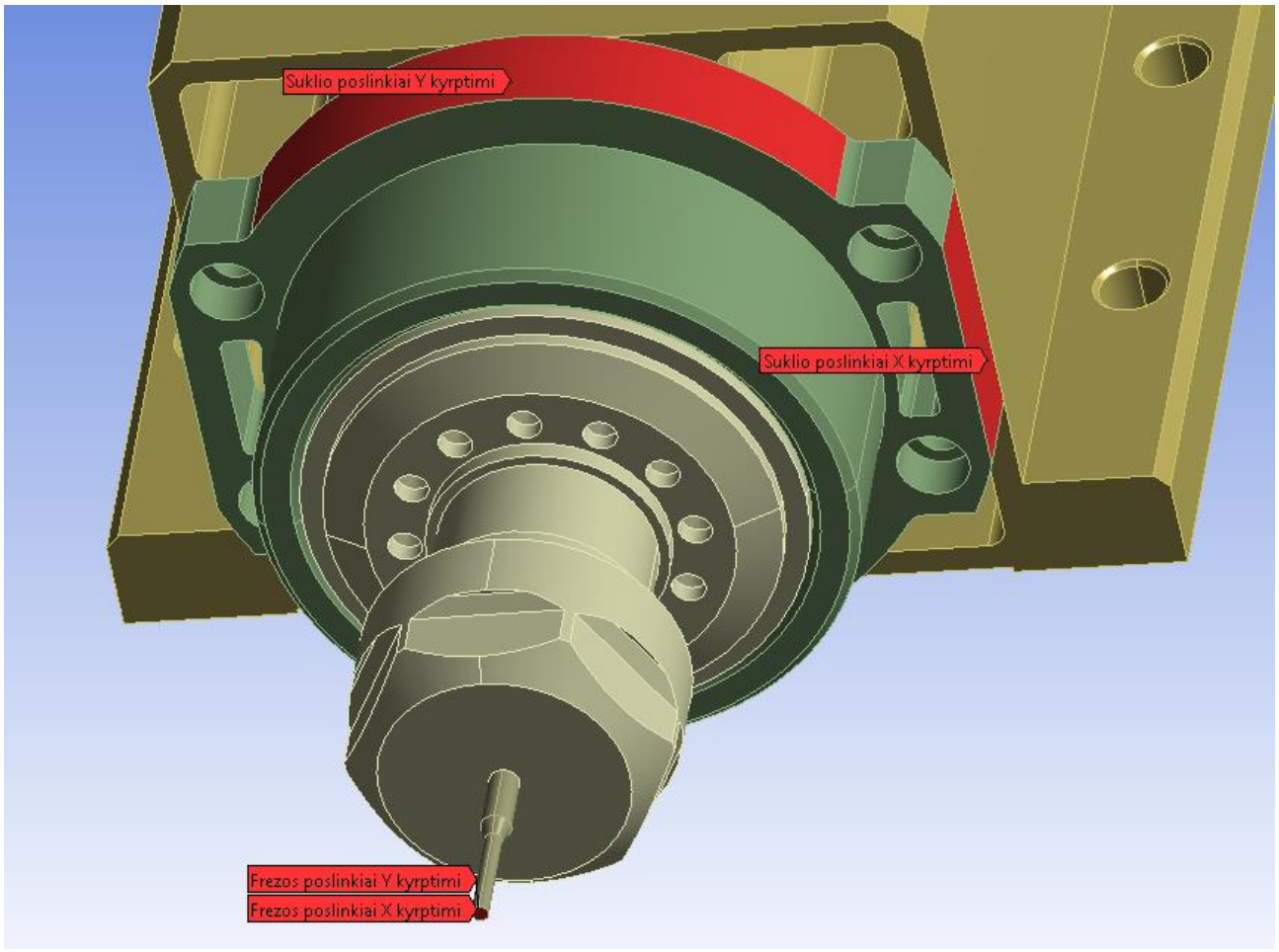
Toliau pasirinkta skaičiuoti harmoninį atsaką įvertinantį staklių mazgų poslinkius, kuriuos sukelia staklėse esantys vibracijų šaltiniai. Kaip ir minėta anksčiau, vibracijų šaltiniais šiose staklėse parinkti X ir Y ašių varantieji sraigtai bei suklys, traktuojami kaip ciklines jėgas. Jėgų dydžiai gauti teoriniuose tyrimuose, o jų cikliškumas apibrėžiamas variklių kampiniu sukimosi dažniu.

Sraigtų keliamų vibracijų cikliškumas skaičiuojamas pagal formulę:

$$\nu = \frac{f}{p \times 60}; \quad (1)$$

čia: ν – ciklinis dažnis, Hz; f – pastūma, mm/min; p – sraigto žingsnis, mm;

Teorinio uždavinio kraštinės sąlygos. Aprašius sąlygas ir vibracijų šaltinius atliekami trys skaičiavimai naudojant „Ansys“ programinę įrangą. Rezultatai kiekvienam atvejui atvaizduojami sudarant frezos galiuko ir suklio korpuso poslinkių Bode diagramas. Diagramose pateikiami rezultatai paviršiams, pažymėtiems 2 pav. pav. Frezos galiuko poslinkiai parodo tiesioginę paklaidą, kuri atsiranda frezavimo vietoje. Kadangi teorinius rezultatus siekiama sulyginti su praktiniais, poslinkiai skaičiuojami ir akselerometrų montavimo vietoje. Šie poslinkiai toliau vadinami „korpuso poslinkiais“.



2 pav. Paviršiai kurių atžvilgiu pateikiami rezultatai (modelį parengė darbo autorius)

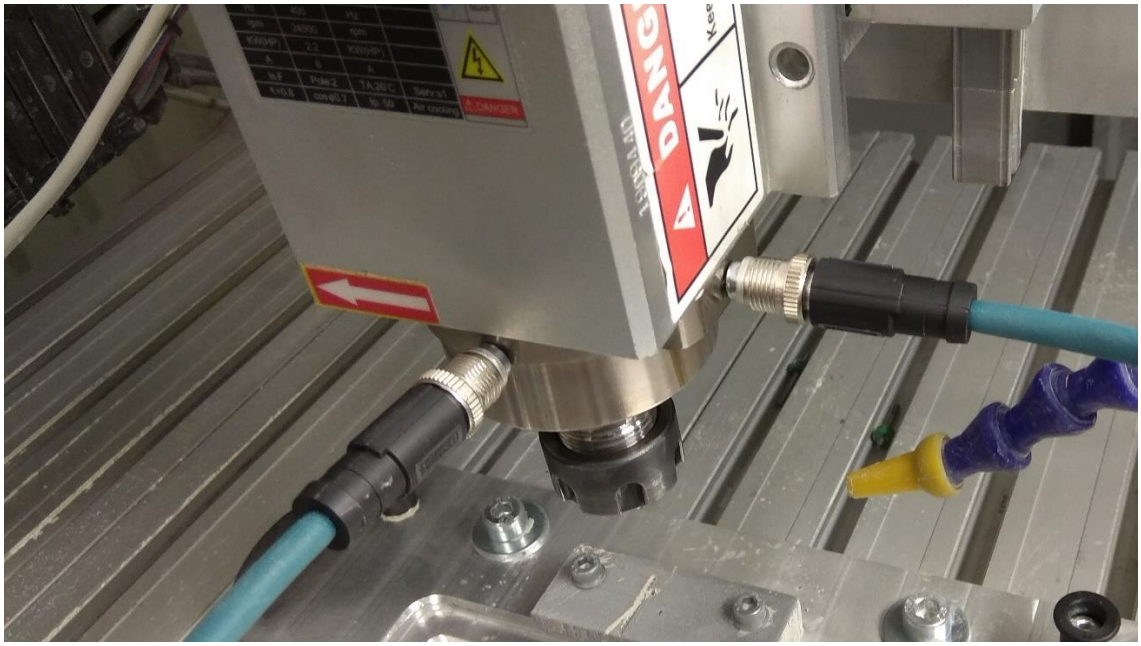
Skaičiuojant Y ašies ir suklio vibracijas vertinamos visos staklių sijos (X, Y ir Z ašys) ir suklys, fiksuojant Y ašies kreipiančiųjų karietėles. Frezavimo paklaidos atsiranda tarp staklių rėmo ir sijų - rėmo įlinkiai nedaro įtakos dinaminiam frezavimo tikslumui. Dėl šios priežasties staklių tyrimas atliekamas pradedant nuo Y sijos karietėlių. Pasirinktos tokios kraštinės sąlygos, kadangi sraigto ir suklio vibracijų jėgos veikia visą staklių konstrukciją.

Skaičiuojant X ašies vibracijas vertinami tik X ir Z ašių sijos bei suklys. Tokios kraštinės sąlygos nustatomos todėl, kad sraigto virpesių jėga veikia tik X ašies siją ir prie jos pritvirtintą suklio mazgą.

Frezos galiuko vibracijų duomenys parodo nuokrypius, kurie atsiranda pjovimo zonoje, o jų dydis geriausiai nusako paklaidas, kurios iškraipys gaminio matmenis.

Šiame etape atliekami skaičiavimai parodo frezos ir suklio korpuso poslinkius, kurie atsiranda dėl vibracijų. Poslinkiai atspindi dinamines frezavimo paklaidas.

Praktinio uždavinio formuluotė. Praktinis tyrimas atliekamas naudojant piezoelektrinius akselerometrus. Akselerometrai montuojami ant suklio korpuso, kuo arčiau frezavimo zonos (3 pav.).



3 pav. Akselerometrų montavimas ant suklio korpuso(darbo autoriaus nuotrauka)

Matavimai atliekami naudojant tuos pačius parametrus kaip ir teoriniame tyrime. Tyrimo metu atliekant kiekvieną matavimą pagal aprašytus scenarijus įrašomi tokie duomenys: vibracijų amplitudė, bei vibracijų dažnis X ir Y ašių kryptimis. Gauti duomenys pateikiami grafikuose ir vibracijų tyrimo lentelėje.

Gauti duomenys leis palyginti teorinius ir praktinius rezultatus.

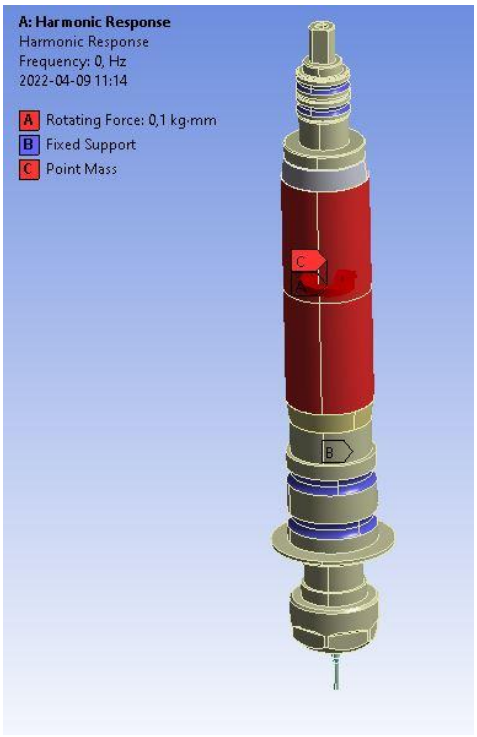
TIRIAMOJI DALIS

Skaičiuojama staklių suklio teorinė virpesių amplitudė X ir Y ašių kryptimis. Staklių sijas varantys sraigtai ir suklys yra traktuojami kaip ciklinių virpesių šaltiniai. Šaltinių sukelti virpesiai žadina suklio poslinkius. Suklio poslinkiai X ir Y ašių kryptimi daro tiesioginę įtaką staklių tikslumui. Šiame skyriuje teoriniu būdu gaunami šaltinių virpesių parametrai ir apskaičiuojami suklio poslinkiai.

1.1. Virpesių šaltinių matavimas ir skaičiavimas

Veleno disbalansas išmatuotas „R10B-VS“ rotorių balansavimo mašina 0,2 g*mm tikslumu (EBS Balancing Machine, 2022). Matavimas atliktas veleną tvirtinant staklėse ant cilindrinių paviršių guolių montavimo vietose. Gautas radialinio mušimo dydis 0,0994 kg*mm. Apskaičiavus veleno modelio masę naudojant „Solidworks“ programinę įrangą gauta 1,78 kg masė. Vadovaujantis ISO 21940 standartu (Geneva, Switzerland Patento Nr. ISO 21940-12:2016, 2016) veleno balansas yra priskiriamas prie G 250 balanso klasės (G 250 klasės radialinio mušimo diapazonas 0,0398-0,0999 kg*mm 1,78 kg masės velenui).

Sudaromas veleno teorinis modelis ir kraštinės sąlygos aprašomos „Ansys“ programinėje įrangoje (4 pav.).



4 pav.. Supaprastinto veleno modelis (modelį parengė darbo autorius)

Naudojant „Ansys“ programinę įrangą atliekamas veleno radialinio mušimo jėgos skaičiavimas nurodžius išmatuotą mušimo dydį ir tyrimui parinktus kampinius sukimosi dažnius: 21 000, 22 000, 23 000 ir 24 000 apsisukimų per minutę. Gauti mušimo jėgos rezultatai pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė Veleno mušimo jėgos rezultatai

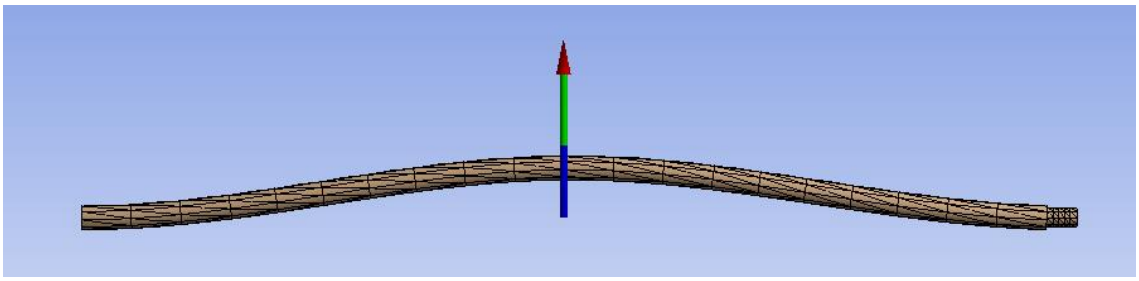
Nr.	Veleno kampinis sukimosi dažnis, aps./min.	Radialinio mušimo jėga, N
1	21 000	487,38
2	22 000	535,3
3	23 000	585,54
4	24 000	638,09

Pastūmų sraigtų mušimo dydžiai išmatuoti „Mitutoyo 2046S“ indikatoriumi (matavimo tikslumas ± 0,013 mm), prietaiso informacijos šaltinis: (Mitutoyo America Corporation, 2022). X ašies sraigto ilgis tarp guolių - 700 mm, Y - 640 mm.

- Išmatuotas X sijos sraigto (ø16) radialinio mušimo dydis 0,79 mm.
- Išmatuotas Y sijos sraigto (ø12) radialinio mušimo dydis 2,01 mm.

Pastebėta, jog sraigtų maksimali radialinio mušimo vertė pasiekiama vidurinėje dalyje, vienodu atstumu nuo sraigto galų. Daroma išvada, kad sraigtas yra išlinkęs ties viduriniaja dalimi, todėl sraigto radialinio mušimo ekstremumas pasiekiamas vieną kartą per apsisukimą. Priimama sąlyga, kad virpesių cikliškumas lygus sraigto apsisukimų dažniui.

Naudojant „Ansys“ programinę įrangą sumodeliuojami sraigtai ir apskaičiuojama sraigto deformacijos reakcijos jėga (**Error! Reference source not found.** pav.).



5 pav. Sraigto reakcijos jėgos skaičiavimas (modelį parengė darbo autorius)

Apskaičiuota, kad deformuojant X ašies sraigtą 0,79 mm gaunama deformacijos jėga lygi 372,19 N. Deformuojant Y ašies sraigtą 2,01 mm – 231,24 N.

1.2.Staklių vibracijų skaičiavimas

Atliekama staklių modalinė analizė 0-1500 Hz diapazone, kad būtų galima matyti, ar atsiranda virpesių harmonikos. Harmonikos sužadina virpesių atsikartojimą dažnių juostoje, taip sukeldami papildomus poslinkius kurie didina staklių paklaidas. Gauti rezonansinių virpesių rezultatai pateikiami

2 lentelė Staklių modalinės analizės rezultatai

Rezonansinio dažnio Nr.	Dažnis, Hz	Rezonansinio dažnio Nr.	Dažnis, Hz
1	41,72	16	716,78
2	75	17	746,24
3	133,67	18	818,05
4	159,06	19	846,07
5	192,28	20	895,44
6	248,27	21	930,09
7	287,18	22	961,95
8	317,18	23	967,61
9	330,38	24	976,26
10	414,57	25	1075,7
11	450,81	26	1091,1
12	550,28	27	1160,1
13	581,57	28	1213,1
14	629,89	29	1316,9
15	663,44		

Gauti dažniai parodo koki virpesių dažniai kelia staklių virpesių poslinkių sustiprėjimą. Vadovaujantis šiais duomenimis bus galima daryti išvadas ar rezonansas sukelia virpesių sustiprėjimą sistemoje.

Staklių sijose naudojamos linijinės kreipiančiosios – Y sijai HG-20C , X sijai – HG-15C. Pagal (HIWIN, 2022) kataloge pateikiamus duomenis kreipiančiųjų HG-20C standumas 250 N/mm, HG-15C - 200 N/mm. Šie duomenys „Ansys“ programinėje įrangoje aprašant staklių sijų kontaktus (sijų sujungimo elementų tarpusavio sąveiką).

„Ansys“ programinėje įrangoje vibracijų šaltiniams aprašyti naudojamos anksčiau apskaičiuotos jėgos:

X ašies sraigto mušimui – 372,19 N, kai pastūma 400, 500 ir 600 milimetrų per minutę.

Y ašies sraigto mušimui – 231,24 N, kai pastūma 400, 500 ir 600 milimetrų per minutę.

Suklio velenui:

- 487,38 N, kai veleno kampinis greitis 21 000 apsisukimų per minutę;
- 535,3 N kai kampinis greitis 22 000 apsisukimų per minutę;
- 585,54 N kai kampinis greitis 23 000 apsisukimų per minutę;
- 638,09 N kai kampinis greitis 24 000 apsisukimų per minutę;

Suklio keliamų vibracijų cikliškumas yra suklio sukimosi dažnis išreikštas hercais. Šiuo atveju:

- 21 000 aps./min = 350 Hz;
- 22 000 aps./min = 366,667 Hz;
- 23 000 aps./min = 383,333 Hz;
- 24 000 aps./min = 400 Hz;

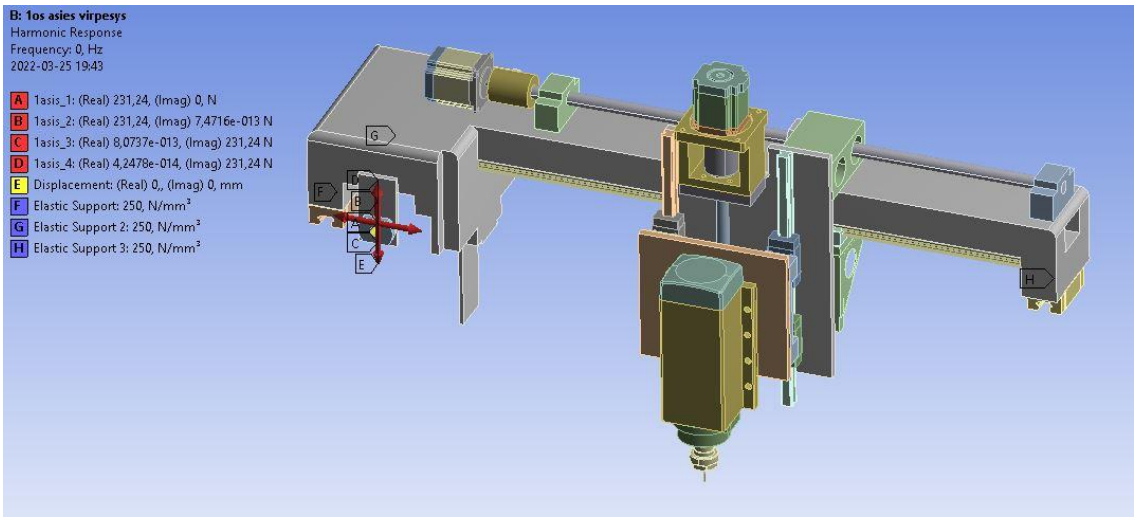
Sraigtų cikliniai dažniai apskaičiuojami naudojant (1) formulę (abiejų sraigtų žingsniai „p“ yra 5 mm).

$\frac{400}{5\times60} = 1{,}333\ Hz;$

$\frac{500}{5\times60} = 1{,}667\ Hz;$

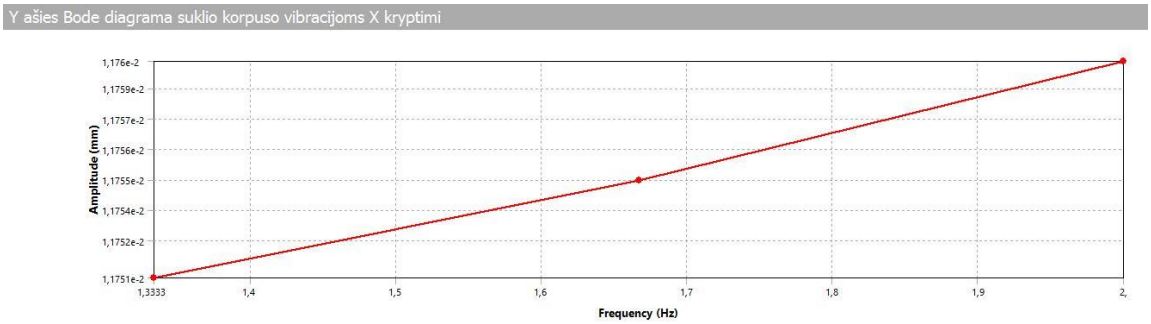
$\frac{400}{5\times60} = 2\ Hz;$

Atliekami Y ašį varančio sraigto keliamų vibracijų skaičiavimai „Ansys“ programine įrangos (6 pav.).

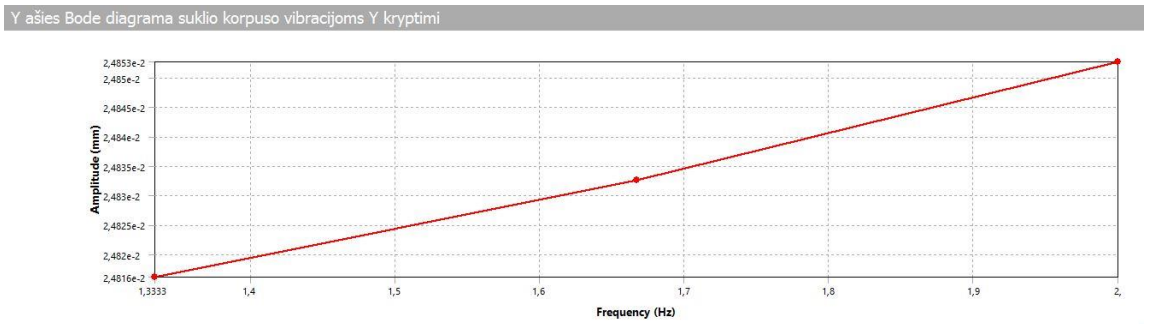


6 pav. Y ašies virpesius sukeliančių jėgų vektorių vaizdas "Ansys" programinėje įrangoje (modelį parengė darbo autorius)

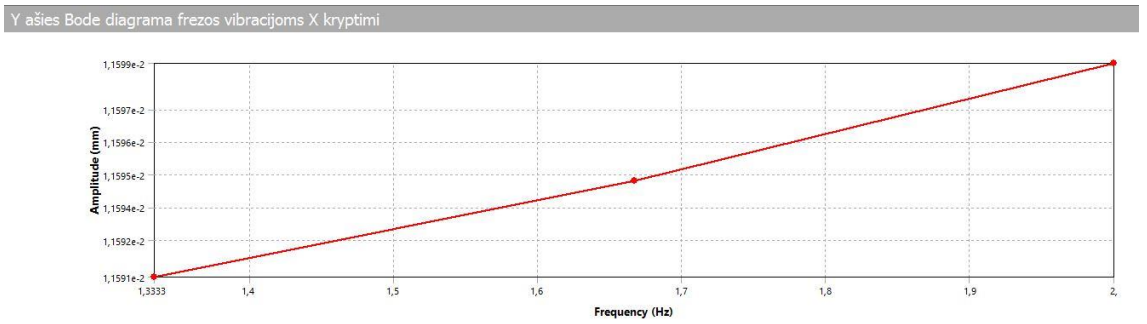
Atlikus skaičiavimus gautos Y sijos vibracijų Bode diagramos (7 pav., 8 pav., 9 pav. ir 10 pav.). Diagramose matoma, kad skirtumai tarp amplitudžių yra nykstamai maži (iki 0,05 µm).



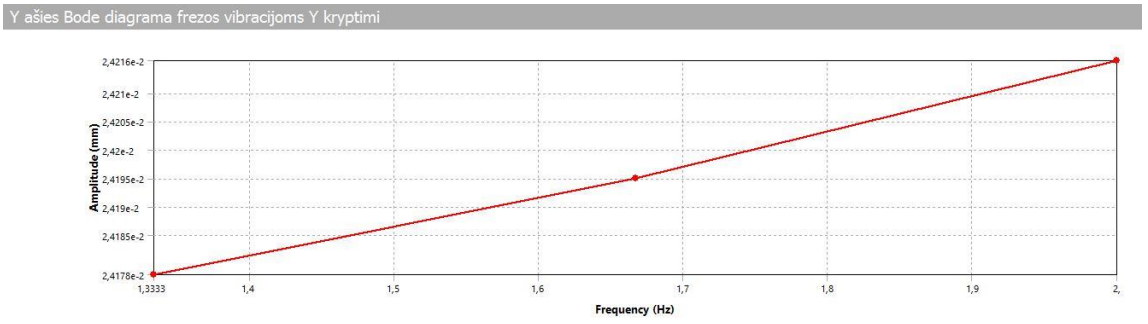
7 pav. Y sijos Bode diagrama suklio korpuso vibracijoms X kryptimi



8 pav. Y sijos Bode diagrama suklio korpuso vibracijoms Y kryptimi



9 pav. Y sijos Bode diagrama frezos vibracijoms X kryptimi



10 pav. Y sijos Bode diagrama frezos vibracijoms Y kryptimi

Tikslios apskaičiuotų poslinkių vertės pateikiamos 3 ir 4 lentelėse (dažniausiai gamyboje naudojami parametrai paryškinti):

3 lentelė Y sijoje kylančios suklio korpuso vibracijos

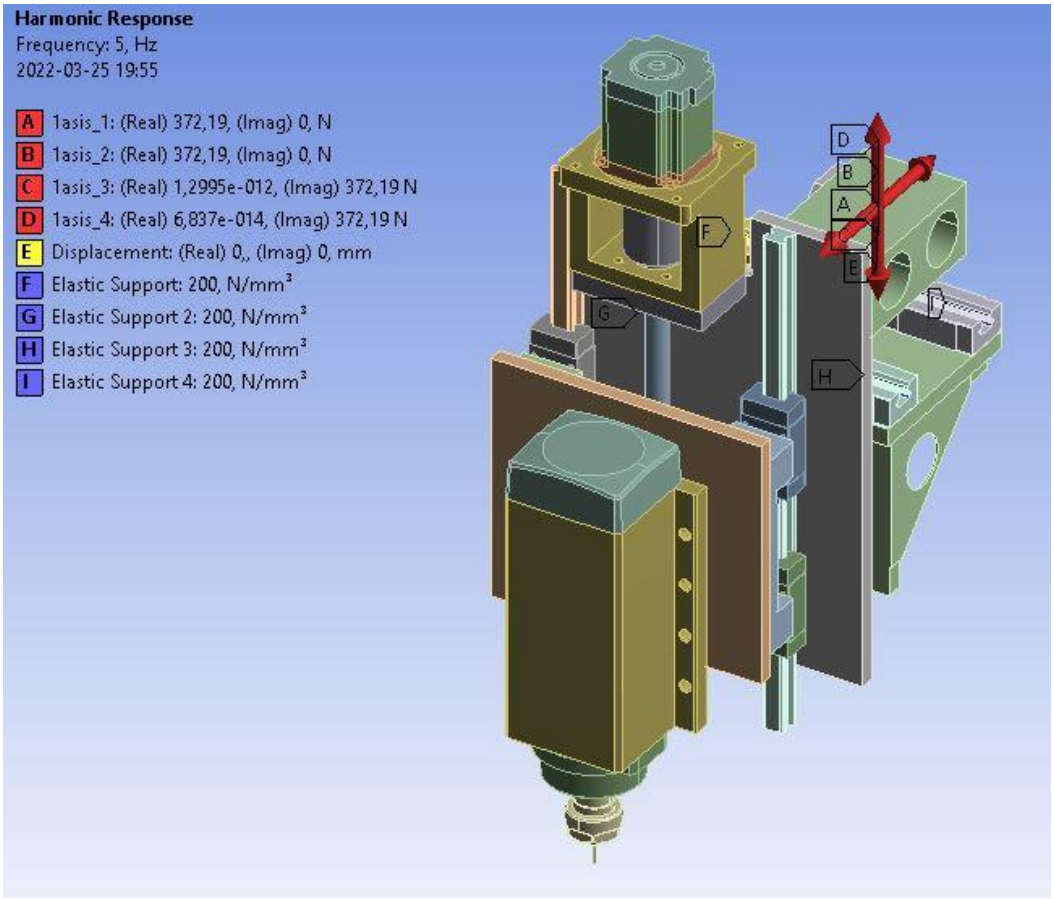
Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus poslinkis X kryptimi, mm	Maksimalus poslinkis Y kryptimi, mm
1	1,3333	0,012	0,025
2	1,6667	0,012	0,025
3	2	0,012	0,025

4 lentelė Y sijoje kylančios frezos vibracijos

Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus poslinkis X kryptimi, mm	Maksimalus poslinkis Y kryptimi, mm
1	1,3333	0,012	0,024
2	1,6667	0,012	0,024
3	2	0,012	0,024

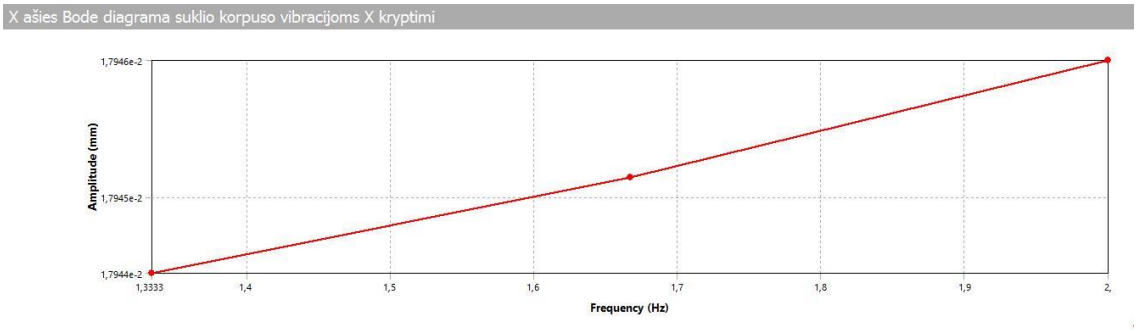
Iš lentelės duomenų matoma, kad skirtingi virpesių šaltinių dažniai nedaro įtakos virpesių sukeliamiems poslinkiams. Dažnis nedaro įtakos todėl, kad esant tokiam žemam kampiniam sraigto sukimosi dažniui sugeneruojama maža išcentrinė jėga kuri daro nykstamai mažą įtaką jėgos pokyčiui. Skirtumas tarp korpuso ir frezos vibracijų sukeltų poslinkių yra nykstamai mažas. Skirtumas nedidelis todėl, kad šioje sijoje matuojami paviršiai yra arti jėgos poveikio zonos, tai reiškia, kad poveikio petis maža ir nesukelia didelių poslinkių.

Atliekami X sijoje keliamų vibracijų skaičiavimai naudojant „Ansys“ programinę įrangą (11 pav.).

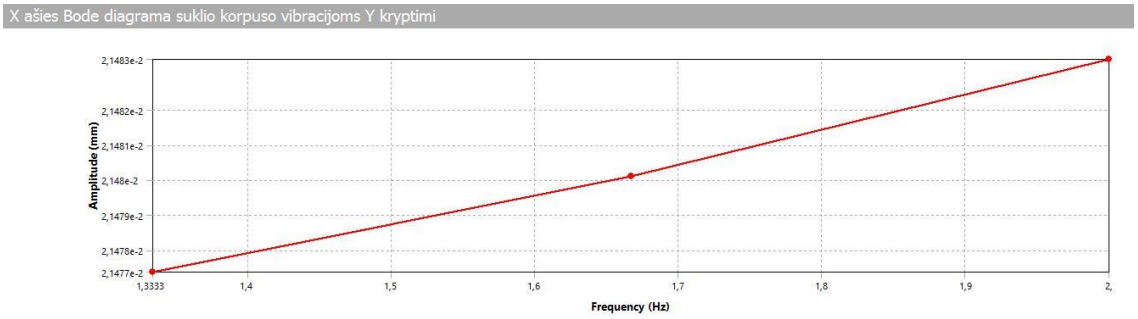


11 pav. X sijos virpesius sukeliančių jėgų vektorių vaizdas "Ansys" programinėje įrangoje (modelį parengė darbo autorius)

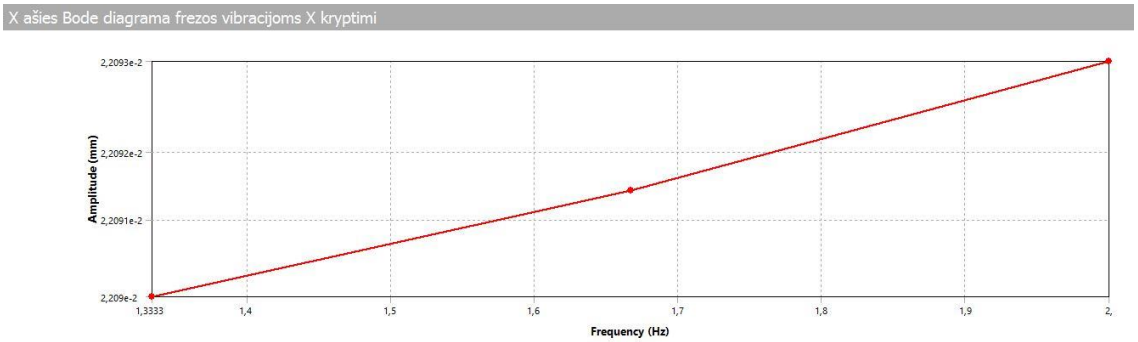
Atlikus skaičiavimus gautos X sijos vibracijų Bode diagramos (12 pav., 13 pav., 14 pav. ir 15 pav.). Diagramose matoma, kad skirtumai tarp amplitudžių yra nykstamai maži (0,01 μm).



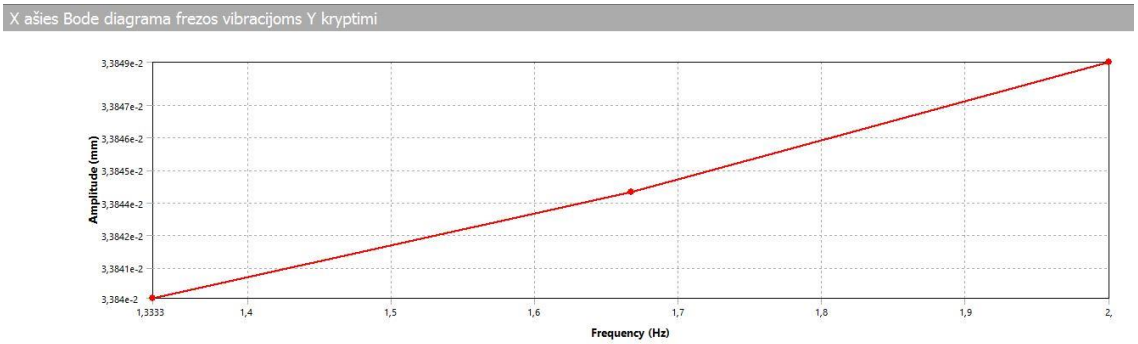
12 pav. X sijos Bode diagrama suklio korpuso vibracijoms X kryptimi



13 pav. X sijos Bode diagrama suklio korpuso vibracijoms Y kryptimi



14 pav. X sijos Bode diagrama frezos vibracijoms X kryptimi



15 pav. X sijos Bode diagrama frezos vibracijoms Y kryptimi

Tikslios apskaičiuotų poslinkių vertės pateikiamos 5 ir 6 lentelėse (darbiniai parametrai paryškinti):

5 lentelė X sijoje kylančios suklio korpuso vibracijos

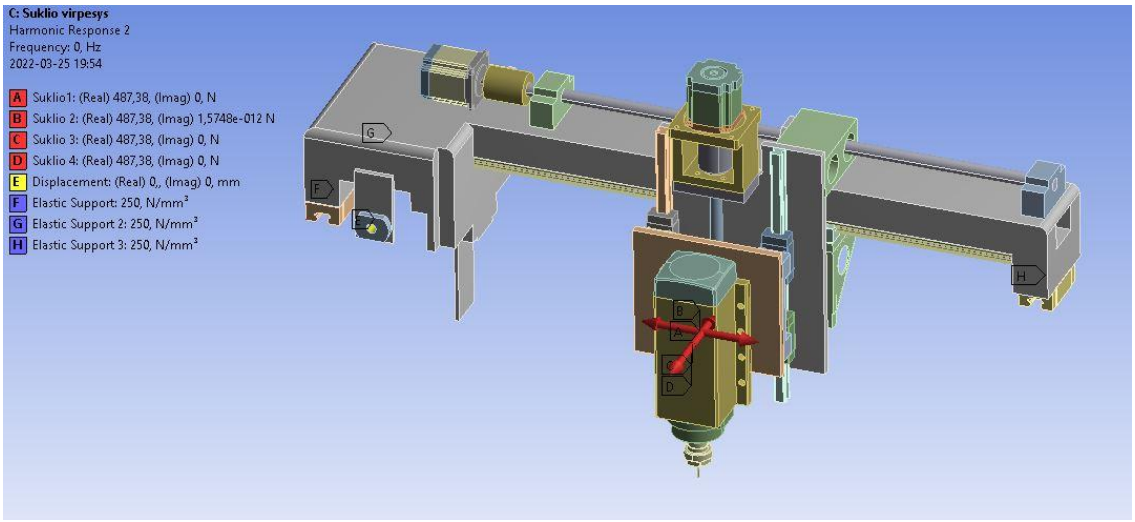
Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus poslinkis X kryptimi, mm	Maksimalus poslinkis Y kryptimi, mm
1	1,3333	0,018	0,021
2	1,6667	0,018	0,021
3	2	0,018	0,021

6 lentelė X sijoje kylančios frezos vibracijos

Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus poslinkis X kryptimi, mm	Maksimalus poslinkis Y kryptimi, mm
1	1,3333	0,022	0,034
2	1,6667	0,022	0,034
3	2	0,022	0,034

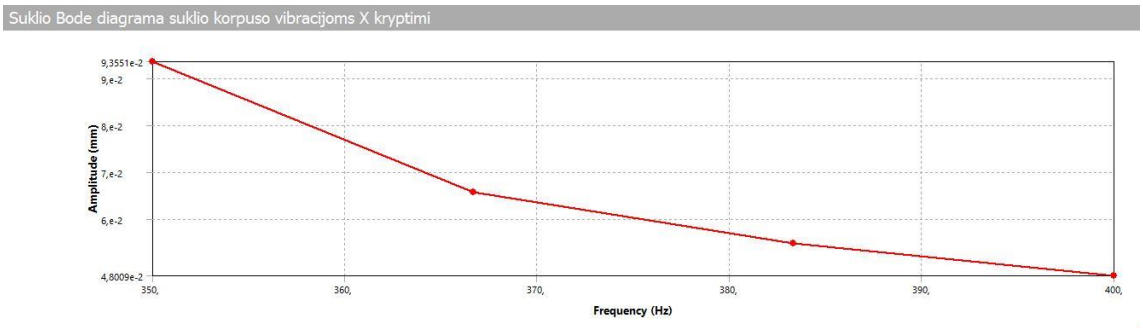
Matoma, kad skirtingi virpesių šaltinių dažniai nedaro įtakos virpesių sukeliamiems poslinkiams kaip 3 ir 4 lentelės rezultatams. Skirtumas tarp korpuso ir frezos vibracijų poslinkių yra 4 µm X kryptimi ir 13 µm Y kryptimi. Skirtumas atsiranda todėl, kad šioje sijoje matuojami paviršiai yra toli nuo jėgos poveikio zonos. Tai reiškia, kad poveikio petys yra didelis ir atstumas tarp nagrinėjamų paviršių sukelia ženklų poslinkio kitimą.

Atliekami suklio keliamų vibracijų skaičiavimai naudojant „Ansys“ programinę įrangą (16 pav.).

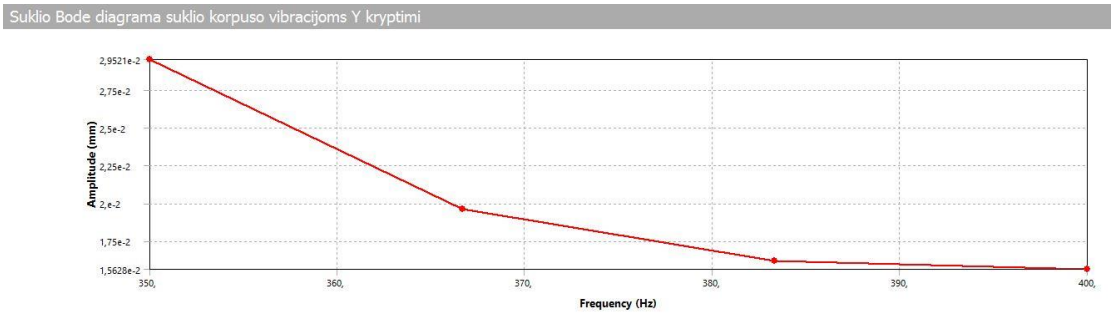


16 pav. suklio virpesius sukeliančių jėgų vektorių vaizdas "Ansys" programinėje įrangoje (modelį parengė darbo autorius)

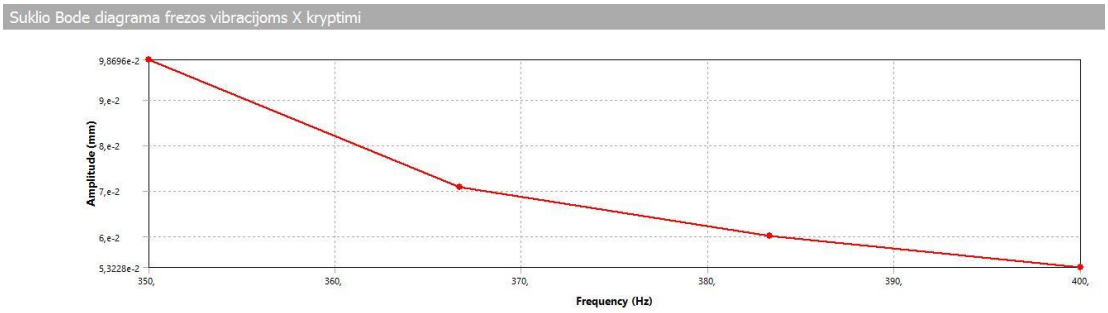
Atlikus skaičiavimus gautos suklio vibracijų Bode diagramos (17 pav., 18 pav., 19 pav. ir 20 pav.):



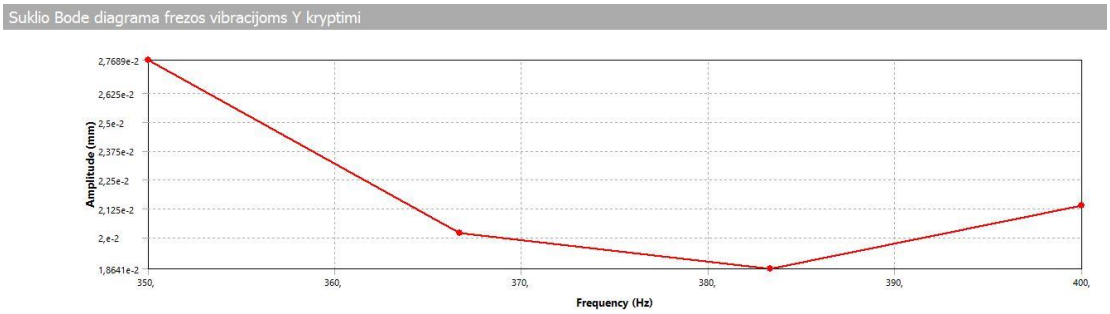
17 pav. suklio Bode diagrama suklio korpuso vibracijoms X kryptimi



18 pav. suklio Bode diagrama suklio korpuso vibracijoms Y kryptimi



19 pav. suklio Bode diagrama frezos vibracijoms X kryptimi



20 pav. suklio Bode diagrama frezos vibracijoms Y kryptimi

Tikslios apskaičiuotų poslinkių vertės pateikiamos 7 ir 8 lentelėse.

7 lentelė Suklio keliamos korpuso vibracijos

Nr.	Dažnis, Hz	Didžiausias poslinkis X kryptimi, mm	Didžiausias poslinkis Y kryptimi, mm
1	350	0,094	0,030
2	366,67	0,066	0,020
2	383,33	0,055	0,016
3	400 (Maksimalus suklio kampinis dažnis)	0,048	0,016

8 lentelė Suklio keliamos frezos vibracijos

Nr.	Dažnis, Hz	Didžiausias poslinkis X kryptimi, mm	Didžiausias poslinkis Y kryptimi, mm
1	350	0,099	0,028
2	366,67	0,071	0,020
3	383,33	0,060	0,019
4	400 (Maksimalus suklio kampinis dažnis)	0,053	0,021

Iš rezultatų matoma, kad didžiausi poslinkiai gaunami sukliui sukantis 350 Hz dažniu. Tai atsitinka todėl, kad šis dažnis yra arčiausiai staklių rezonansinio dažnio, todėl matomos rezonanso pasekmės. Tolstant nuo rezonansinio dažnio poslinkiai mažėja.

1.3.Staklių vibracijų matavimas

Vibracijų matavimai atliekami naudojant „National Instruments NI USB-4431“ signalo imtuvą su dviem vienetais „IMI Sensors 603C01“ akselerometrų. Akselerometru matuojamų dažnių juosta 0.5-10000 Hz, matavimo ribos ±50 g, masė 51 gramas (PCB Piezotronics, Inc., 2022).

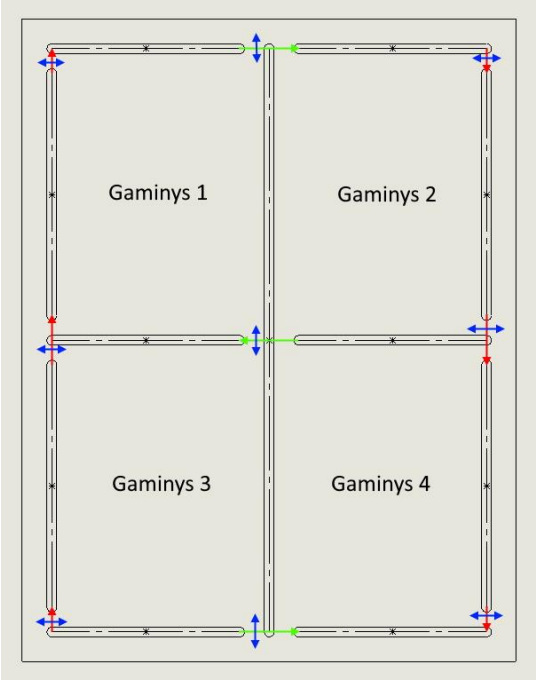
Gauti matavimų rezultatai pateikiami 9 lentelėje.

9 lentelė Praktinių virpesių matavimų rezultatai

Didžiausi poslinkiai	X sijos	Y sijos	Suklio (21 000 aps./min.)	Suklio (22 000 aps./min.)	Suklio (23 000 aps./min.)	Suklio (24 000 aps./min.)
X ašies kryptimi, µm	16	9	130	95	65	65
Y ašies kryptimi, µm	19	20	60	40	35	35

1.4.Virpesių rezultatų apdorojimas

Atlikus tyrimus buvo gauti atskirų šaltinių keliamų vibracijų poslinkiai. Tam, kad būtų gautas suminis staklių tikslumo dydis, atitinkamus rezultatus reikia sudėti. Rezultatų sumavimo metodika aiškinama remiantis 21 pav. Pateiktu pjūvių eskizu:



21 pav. Spausdintinės plokštės frezavimo pjūvių eskizas (brėžinį parengė darbo autorius)

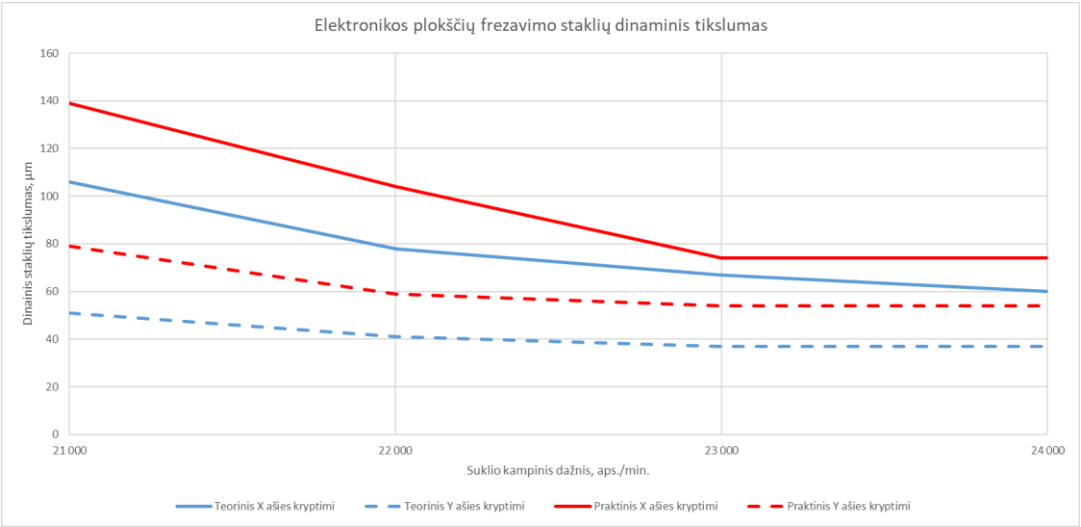
Eskize pavaizduota spausdintinių elektronikos plokščių technologinė paletė. Paletė leidžia vienu metu gaminti kelis gaminius, taip pasiekiamas didesnis gamybos našumas ir atkartojamumas. Pavaizduotoje technologinėje paletėje yra 4 gaminiai, kurie sujungti vienas su kitu. Paskutiniame elektronikos plokštės gamybos etape atliekamas gaminių išpjovimas, kad gaminiai būtų atskirti nuo technologinės paletės ir vienas nuo kito. Išpjovimui atlikti naudojamas frezavimas. Frezavimas atliekamas frezuojant gaminių sujungimus X arba Y kryptimis. X krypties pjūviai pažymėti žaliomis rodyklėmis, Y krypties – raudonomis. Įtaką gaminio formai daro vibracijų sukeliami poslinkiai kurie yra

statmeni pastūmos krypčiai (mėlynos rodyklės eskize). Tai reiškia, kad pjaunant X kryptimi įtaką gaminio formai darys Y krypties poslinkiai, pjaunant Y kryptimi – X krypties poslinkiai.

Naudojantis aprašyta metodika susumuojami rezultatai ir 10 lentelėje bei 22 pav. pateikiamos staklių dinaminio tikslumo teorinės bei praktinės vertės. Gamyboje naudojami parametrai paryškinti.

10 lentelė Elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminis tikslumas

			Suklio kampinis dažnis			
			21 000 aps./min.	22 000 aps./min.	23 000 aps./min.	24 000 aps./min.
Dinaminis staklių tikslumas	Teorinis	X ašies kryptimi, µm	±106	±78	±67	±60
		Y ašies kryptimi, µm	±51	±41	±37	±37
	Praktinis	X ašies kryptimi, µm	±139	±104	±74	±74
		Y ašies kryptimi, µm	±79	±59	±54	±54



22 pav. Elektronikos plokščių frezavimo staklių dinaminio tikslumo grafikas

Iš rezultatų matoma, kad X ašies pamatuoti poslinkiai yra 10,5-33,3 % didesni nei teoriniai. Y ašies pamatuoti poslinkiai yra 44-55 % didesni nei teoriniai. Daroma išvada, jog teoriniai matavimai neįvertino sujungimo elementų standumo, atsiveržimo tikimybės ir guolių susidėvėjimo, todėl apskaičiuotos paklaidos yra mažesnės nei išmatuotos.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę pastebėta, kad didžioji dauguma mokslinių straipsnių nagrinėja siaurą probleminę sritį ir aiškiną vieną problemos aspektą. Siekiant mokslinio naujumo buvo pasirinkta nagrinėti platesnę sferą – dinaminę staklių sritį ir išmatuoti staklių tikslumą bei ištirti paklaidų šaltinius.
2. Atlikus teorinius staklių skaičiavimus buvo gauta, kad naudojant gamyboje nustatytus parametrus staklių dinaminis tikslumas X ašies kryptimi yra ± 60 µm, Y ašies kryptimi ± 37 µm.
3. Atlikus praktinius staklių matavimus buvo gauta, kad naudojant gamyboje nustatytus parametrus staklių dinaminis tikslumas X ašies kryptimi yra ± 74 µm, Y ašies kryptimi ± 54 µm.
4. Palyginus apskaičiuotus ir pamatuotus rezultatus gauta, kad matuotos paklaidos yra didesnės nei apskaičiuotosios. X kryptimi – 23,3 procentais, Y kryptimi – 45,9 procentais. Daroma išvada, kad rezultatai skiriasi nes skaičiavimas neįvertino tvirtinimo elementų standumo, atsiveržimo tikimybės bei guolių susidėvėjimo.
5. Išmatuoti rezultatai rodo, kad dinaminis staklių tikslumas yra pakankamas, kad būtų pasiektos ± 0,1 mm ir ± 0,2 mm tolerancijos.
6. Atlikus matavimus daroma išvada, kad staklių dinaminiam tikslumui įtaką daro X ir Y tiltus varančiųjų sraigtų radialinis mušimas, suklio veleno radialinis mušimas, suklio guolių išdilimas bei tvirtinimo elementų atsiveržimas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

EBS Balancing Machine. (2022 m. Balandžio 12 d.). *R10B-VS*. Nuskaityta iš EBS Balancing Machine: https://www.ebs-balancing.com/machine-type/r10b-vs-horizontal-balancing-machine/

HIWIN. (2022, Kovo 22). Linear guideways.

JLCPCB. (2022 m. Balandžio 11 d.). *Capabilities*. Nuskaityta iš JLCPCB: https://jlcpcb.com/capabilities/Capabilities

Mitutoyo America Corporation. (2022 m. Balandžio 12 d.). *Metric Standard Type-Series 2*. Nuskaityta iš Mitutoyo: https://www.mitutoyo.com/products/small-tool-instruments-and-data-management/indicators/dial-indicators/metric-standard-type-series-2/

Multi Circuit Boards Ltd. (2202 m. Balandžio 11 d.). *Manufacturing tolerances*. Nuskaityta iš Multi-cb Printed Circuit Boards: https://www.multi-circuit-boards.eu/en/quality/manufacturing-tolerances.html

PCB Baltic. (2022 m. Balandžio 11 d.). *Tolerances*. Nuskaityta iš PCB Baltic: https://www.pcbbaltic.lt/tolerances

PCB Piezotronics, Inc. (2022 m. Balandžio 14 d.). *Model : 603C01 | Platinum Low-cost Industrial ICP® Accelerometer*. Nuskaityta iš PCB Piezotronics An Amphenol Company: https://www.pcb.com/products?m=603c01

PCBWay. (2022 m. Balandžio 11 d.). *PCB Manufacturing tolerances.* Nuskaityta iš PCBWay: https://www.pcbway.com/pcb_prototype/PCB_Manufacturing_tolerances.html

Sarhan, A. A., & Matsubara, A. (2015). Investigation about the characterization of machine tool spindle stiffness for intelligent CNC end milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 34*, 133-139.

Somashekar, V. N., Harikrishnan, S., Ahmed, P. A., & Kamesh, D. (2016). Vibration Response Prediction of the Printed Circuit Boards using. *Procedia Engineering 144*, 576-583.

Sood, B., & Pecht, M. (2018). The effect of epoxy/glass interfaces on CAF failures in printed circuit boards. *Microelectronics Reliability*.

Standardization, I. O. (2016). Geneva, Switzerland Patento Nr. ISO 21940-12:2016.

Tatar, K., & Gren, P. (2008). Measurement of milling tool vibrations during cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture 48*, 380–387.

2 priedas. FR4 medžiagos techniniai parametrai.

CYLEX® Engineering Plastics

Cylex Engineering Plastics Limited
Web.:www.cylexplastics.co.uk
Email: info@cylexplastics.co.uk



Typical Properties Data Sheet

The Supplier of Engineering Plastics
Rods, Sheets, Tubes,Profiles and Machining Parts

Typical Properties Data Sheet of FR4

①Raw material description			
Standard Grade:	laminated grade	**Appearance color:**	Natural color - light green
Applications:	Processing materials, sheet, board.It has applicable as insulation structural components for electromechanical/electrical equipment,generators,high and low voltage distribution box, electrical machine.		
Remarks:	Charactors: With superior mechanical property and dielectric property, superior heat resistance and moisture resistance, mechinability.		

②Raw material technical datasheet				
Property item	**Test conditions**	**Testing method**	**Testing data**	**Unit**
I.Physical property				
Density	---	GB/IPC4101	2.0±0.2	g/cm^3
Water absoption	thickness 1.6 mm	GB/IPC4101	≤ 19	mg
Flammability class	---	UL94	V0	Class
Ⅱ .Chemical property				
Tensile strength	---	GB/IPC4101	≥ 240	MPa
Vertical flexture strength	Normal	GB/IPC4101	≥ 340	MPa
Vertical compression strength	---	GB/IPC4101	≥ 350	MPa
Parellel shearing strength	---	GB/IPC4101	≥ 34	MPa
Parellel impact strength	simply supported beam	GB/IPC4101	≥ 33	kJ/m^2
Bonding strength	---	GB/IPC4101	8.0-1.0	KN
Elastic modulus	---	GB/IPC4101	21560-24500	MPa
Hardness-Rockwell	---	GB/IPC4101	120-125	R（Scale）
Hardness-Shore D	---	DIN 53505	96	D
Ⅲ.Thermal property				
Flammability	---	GB/IPC4101	≥ 170	°C
Max. working temperature(short time)	30S	GB/IPC4101	280	°C
Max. working temperature(long time)	---	GB/IPC4101	150	°C
Melting temperature(processing plate)	---	GB/IPC4101	203°C	°C
Vertical coefficient linear thermal expansion	RT~200°C	GB/IPC4101	1.7×10^{-4}	1/°C
Parellel coefficient linear thermal expansion	RT~200°C	GB/IPC4101	9.2×10^{-6}	1/°C
Ⅳ .Electrical property				
Relative dielectric constant	50Hz	GB/IPC4101	≤5.5	---
Dielectric loss angle tangent	50Hz	GB/IPC4101	≤0.04	---
Electric grinder resistance property	---	GB/IPC4102	200-300	V（CTI）
Insulation resistance after dipping in the water	---	GB/IPC4101	$\geq 1.3\times10^{12}$	Ω
Volume resistance	---	GB/IPC4102	$10^7\times10^9$	MΩ * cm
Surface resistance	---	GB/IPC4103	$10^6\times10^8$	MΩ
Electric strength for vertical	90°C oil 20s step by step boosting	GB/IPC4101	≥ 13.7	MV/m
Breakdown volatge for parellel	90°C oil 20s step by step boosting	GB/IPC4101	> 50	kV
Electric arc resistance	---	GB/IPC4101	120-140	sec

NOTE: 1 g/cm^3 = 1,000 kg/m^3, 1 Mpa = 1 N/mm^2, 1kV/mm = 1 MV/m

Statement:

NOTE: The information contained herein are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should NOT be used as a basis for design specifications or quality control. Cylex will not provide any legally binding guarantee of certain properties, or any suitability.

3 priedas. „Hiwin“ karietėlių standumas

3.1.8 Rigidity

Rigidity depends on preload. Formula F 3.1 can be used to determine deformation depending on rigidity.

F 3.1 $$\delta = \frac{P}{k}$$

δ Deformation [µm]
P Operating load [N]
k Rigidity [N/µm]

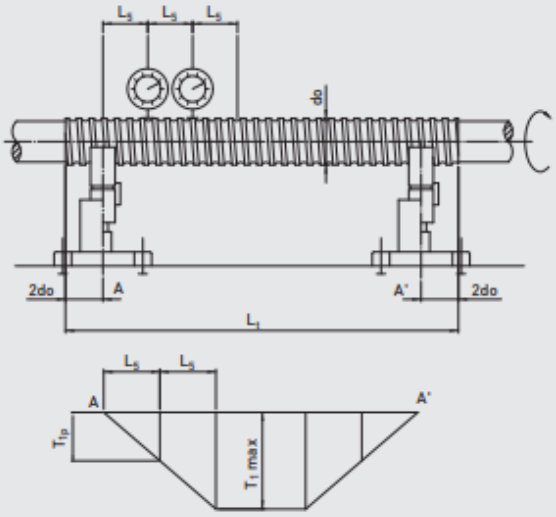
Table 3.5 **Radial rigidity for series HG/QH**

Load class	Series/ size	Rigidity depending on preload		
		ZO	ZA	ZB
Average load	HG_20S	130	170	190
Heavy load	HG_15C	200	260	290
	QH_15C	180	230	260
	HG_20C	250	320	360
	QH_20C	230	290	320
	HG_25C	300	390	440
	QH_25C	270	350	400
	HG_30C	370	480	550
	QH_30C	330	430	500
	HG_35C	410	530	610
	QH_35C	370	480	550
	HG_45C	510	660	750
	QH_45C	460	590	680
	HG_55C	620	800	910
	HG_65C	760	980	1,120
Super heavy load	HG_20H	310	400	460
	QH_20H	280	360	410
	HG_25H	390	510	580
	QH_25H	350	460	520
	HG_30H	480	620	710
	QH_30H	430	560	640
	HG_35H	530	690	790
	QH_35H	480	620	710
	HG_45H	650	850	970
	QH_45H	590	770	870
	HG_55H	790	1,030	1,180
	HG_65H	1,030	1,330	1,520

Unit: N/µm

4 priedas. „Hiwin“ varančiųjų sraigtų leistinas radialinis mušimas

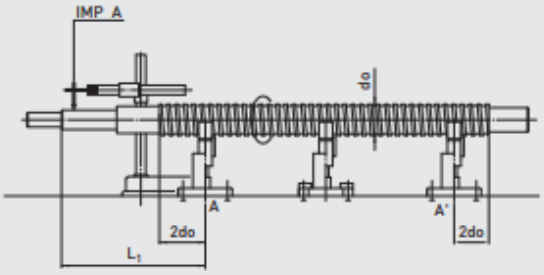
Table 4.6 Tolerance table and measurement method for HIWIN precision ballscrews



T1: True running deviation of external diameter relative to AA' (This measurement is made according to DIN 69051 and JIS B1192)

Nominal Diameter do [mm]		refer-ence length	T_{1p} [µm] For HIWIN tolerance class							
above	up to	L5	0	1	2	3	4	5	6	7
6	12	80	20	20	20	23	25	28	32	40
12	25	160								
25	50	315								
50	100	630								
100	200	1250								

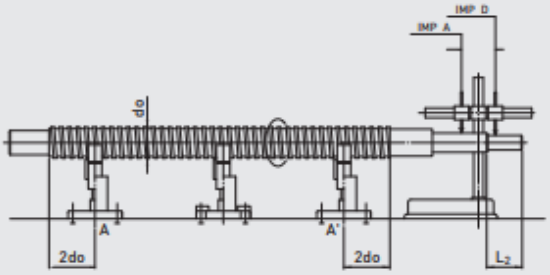
Lt/do		T_{1max} [µm] [for $L_1 \geq 4L_5$] For HIWIN tolerance class							
above	up to	0	1	2	3	4	5	6	7
	40	40	40	40	45	50	60	64	80
40	60	60	60	60	70	75	85	96	120
60	80	100	100	100	115	125	140	160	200
80	100	160	160	160	180	200	220	256	320



T2: Run out deviation of bearing relative to AA' (This measurement is made according to DIN 69051 and JIS B1192)

Nominal Diameter do [mm]		refer-ence length	T_{2p} [µm] [for $L_1 \leq L_r$] For HIWIN tolerance class							
above	up to	Lr	0	1	2	3	4	5	6	7
6	20	80	6	8	10	11	12	16	20	40
20	50	125	8	10	12	14	16	20	25	50
50	125	200	10	12	16	18	20	26	32	63
125	200	315	-	-	-	20	25	32	40	80

if $L_1 > L_r$, then $t_{2a} \leq T_{2p} \frac{L_1}{L_r}$



T3: Coaxial deviation relative to AA' (This measurement is made according to DIN 69051 and JIS B1192)

Nominal Diameter do [mm]		refer-ence length	T_{3p} [µm] [for $L_2 \leq L_r$] For HIWIN tolerance class							
above	up to	Lr	0	1	2	3	4	5	6	7
6	20	80	4	5	5	6	6	7	8	12
20	50	125	5	6	6	7	8	9	10	16
50	125	200	6	7	8	9	10	11	12	20
125	200	315	-	-	-	10	12	14	16	25

if $L_2 > L_r$, then $t_{3a} \leq T_{3p} \frac{L_2}{L_r}$

5 priedas. SKF guolių radialinis mušimas

table 1 - Normal tolerances for radial bearings, except tapered roller bearings

Inner ring

d		$t_{\Delta dmp}$ [1]		t_{Vdsp} [1]			t_{Vdmp}	$t_{\Delta Bs}$			t_{VBs}	t_{Kia}
				Diameter series				All	Normal	Modified [3]		
>	≤	U	L	7, 8, 9 [2]	0, 1	2, 3, 4		U	L	L		
mm		µm		µm			µm	µm			µm	µm
–	2.5	0	–8	10	8	6	6	0	–40	–	12	10
2.5	10	0	–8	10	8	6	6	0	–120	–250	15	10
10	18	0	–8	10	8	6	6	0	–120	–250	20	10
18	30	0	–10	13	10	8	8	0	–120	–250	20	13
30	50	0	–12	15	12	9	9	0	–120	–250	20	15
50	80	0	–15	19	19	11	11	0	–150	–380	25	20
80	120	0	–20	25	25	15	15	0	–200	–380	25	25
120	180	0	–25	31	31	19	19	0	–250	–500	30	30
180	250	0	–30	38	38	23	23	0	–300	–500	30	40
250	315	0	–35	44	44	26	26	0	–350	–500	35	50
315	400	0	–40	50	50	30	30	0	–400	–630	40	60
400	500	0	–45	56	56	34	34	0	–450	–	50	65
500	630	0	–50	63	63	38	38	0	–500	–	60	70
630	800	0	–75	–	–	–	–	0	–750	–	70	80
800	1 000	0	–100	–	–	–	–	0	–1 000	–	80	90
1 000	1 250	0	–125	–	–	–	–	0	–1 250	–	100	100
1 250	1 600	0	–160	–	–	–	–	0	–1 600	–	120	120
1 600	2 000	0	–200	–	–	–	–	0	–2 000	–	140	140

6 priedas. Slankmačio „Holex“ duomenų lapas

HOLEX

Skaitmeninis slankmatis IP67, Matavimo ribos: 150 mm



Užsakymo data

Užsakymo numeris	412751 150
GTIN	4045197347411
Produktų klasė	42A

Aprašymas

Modelis:
Didelis, ryškus skaitmeninis ekranas. Matavimo plokštumos tiksliai nušlifuotos. Slankmatis atsparus vandeniui ir dulkėms. Nenaudojamas 2 valandas automatiškai išsijungia. Tvirtas, smūgiams atsparus korpusas.
Standartas:
Gerai įskaitomas, ryškus skaitmeninis ekranas. Slankmatis nejautrus vandeniui, aušinimo emulsijoms, alyvai ir dulkėms. Matavimo plokštumos tiksliai šlifuotos.
Funkcija:
IP67: yra apsauga nuo laikino panardinimo į vandenį ir apsauga nuo dulkių (nelaidus dulkėms), taip pat apsauga nuo kontakto.: IP67: Yra apsauga nuo laikino panardinimo į vandenį ir apsauga nuo dulkių (nelaidus dulkėms), taip pat apsauga nuo kontakto.
Tiekimo sudėtis:
Su baterija Nr. 081560 dyd. CR2032.
Pakuotė: tvirta dėžė
Norma: DIN 862
Padalos vertė, pasirenkama: mm / coliai
Gylmatis: plokščia
IP apsaugos klasė: IP 67
Kalibravimas: A1
Padalos vertė: 0,01 mm
Padalos vertė: 0,0005 in
Leistina paklaida: 0,03 mm
Antgalių ilgis: 40 mm

Techninis aprašymas