



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Donatas Pranaitis

**VIRPESIŲ MAŽINIMAS 3D SPAUSDINTUVE REGULIUOJANT
GREITĮ IR PAGREITĮ**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Andrius Knyš

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

**VIRPESIŲ MAŽINIMAS 3D SPAUSDINTUVE REGULIUOJANT
GREITĮ IR PAGREITĮ**

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas

Doc. dr. Andrius Knyš

Recenzentas

doc. dr. Virginijus Baranauskas

Projektą atliko

EMV-4/2 gr. Stud. Donatas Pranaitis

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Donatas Pranaitis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos (621H66001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Virpesių mažinimas 3D spausdintuve reguliuojant greitį ir pagreitį“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. gegužės 23 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Donato Pranaičio**, baigiamasis projektas tema „Virpesių mažinimas 3D spausdintuve reguliuojant greitį ir pagreitį“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Pranaitis, Donatas. Virpesių mažinimas 3D spausdintuve reguliuojant greitį ir pagreitį. *Valdymo sistemų magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Andrius Knyš; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2016. 54 p.

SANTRAUKA

Šio magistro baigiamojo darbo tikslas sumažinti 3D spausdintuvo korpuso virpesius ir atlikti tyrimą taikant keletą virpesių slopinimo metodų, taip siekiama pagerinti spausdintuvo našumą ir spausdinimo kokybę. Spausdinimo metu, dėl judančių komponentų atsirandančios dinaminės apkrovos sukelia spausdintuvo korpuso ir kitų jo komponentų virpesius. Šie virpesiai didina spausdinimo galvutės pozicionavimo paklaidą, kas neigiamai įtakoja spausdinamų detalių kokybę. Didėjant spausdinimo greičiui, spausdinamų detalių kokybė vis prastėja, o pasiekus tam tikrą spausdinimo greitį, spausdinimo kokybė tampa nepriimtina, tai reiškia, jog spausdintuve atsiradę virpesiai taipogi mažina spausdintuvo našumą. Minėtas teiginys reiškia, jog net ir nekeičiant spausdintuvo konstrukcijos, o tiesiog pasitelkus virpesių mažinimo algoritmus ar sistemas, galima padidinti 3D spausdintuvo našumą.

Literatūros analizėje apžvelgti pagrindiniai virpesių mažinimo metodai naudojami robotikoje ir CNC įrenginiuose. Remiantis nustatytais kriterijais (greitaveika, integravimo į 3D spausdintuvus paprastumą ir lankstumą) parinkti du virpesių mažinimo metodai: pastūmų greičio reguliavimas ir pastūmų pagreičio reguliavimas. Taipogi literatūros analizėje apžvelgtas ir S-kreivių metodas, kuris naudojamas „planavimo į priekį“ algoritmuose, kurie šiuo metu naudojami „Ultimaker“ ir kituose atviro kodo 3D spausdintuvuose.

Tyrimo metu iširti realizuoti greičių ir pagreičių valdymo metodai ir „planavimo į priekį“ algoritmas. Remiantis atspausdintų detalių kokybės (matmenų nuokrypių), spausdinimo laiko ir spausdintuvo korpuso virpesių greičio kriterijais, virpesių mažinimo metodai palyginti tarpusavyje. Palyginus tyrimo rezultatus nustatyta, jog tarp tirtų metodų, efektyviausias virpesių mažinimo metodas yra pastūmų pagreičio reguliavimas.

Reikšminiai žodžiai (iki 8 žodžių):

3D spausdintuvas, virpesių mažinimas.

Pranaitis, Donatas. Vibration Reduction of the 3D Printer by Adjusting the Speed and Acceleration. Final project of *Control Systems Master's* / supervisor doc. dr. Andrius Knyš; Kaunas University of Technology The Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Automation.

Kaunas, 2016. 54 p.

SUMMARY

This master thesis aim is to implement several methods for vibration damping, in order to improve 3D printer performance and print quality and do testing of these methods. During printing, due to dynamic loads, moving components vibrate. These vibrations increase the print head positioning error, which negatively affect the quality of the printed parts. When increasing print speed, print quality is deteriorating more and more, and at a certain print speed print quality becomes unacceptable, it means that the printer vibrations also reduces the printer's print speed. That means that, even without changing the design of the printer, but simply through vibration reduction algorithms, printing time can be decreased.

Literary analysis reviews the main vibration reduction methods used in robotics and CNC machines. Based on these criteria (control speed, simplicity of integration to 3D printer and flexibility), two methods of vibration reduction were chosen: feed speed regulation and feed acceleration regulation. S-curve method was also reviewed in the literature analysis, this method is used for "planning-ahead" algorithms, which are currently used for "Ultimaker" and some other open source 3D printers.

During the study speed and acceleration regulation methods and "planning ahead " algorithm was implemented to the 3D printer (research object). Based on the quality of the printed parts (dimensional tolerances), print time and the printer housing vibration velocity criteria, vibration reduction methods are compared with each other. A comparison of the results showed that among tested methods, the most effective method of reducing vibration is feed acceleration regulation.

Key words (up to 8 words):

3D printer, vibration control.

TURINYS

IVADAS	7
1. LITERATŪROS ANALIZĖ	8
1.1. Virpesių atsiradimo CNC staklėse priežastys	8
1.2. Konstrukciniai (pasyvūs) virpesių mažinimo metodai	9
1.3. Aktyvūs virpesių mažinimo metodai.....	10
1.3.1. Neuroninių tinklų panaudojimas virpesiams mažinti	10
1.3.2. Virpesių mažinimas naudojant greičio valdymą su grįžtamoju ryšiu	11
1.3.3. Virpesių mažinimas naudojant greičio valdymą su tiesioginiu ryšiu	12
1.3.4. Atvira sistema naudojant dažnių filtrus	13
1.3.5. Pagreičių reguliavimas naudojant sistemą su grįžtamoju ryšiu.....	15
1.3.6. Pavarų greičio reguliavimas naudojant S-kreivę.....	16
1.3.7. Pasirinkti metodai virpesių mažinimui 3D spausdintuvo korpuse.....	18
2. PASIRENGIMAS TYRIMUI	19
2.1. Spausdintuvo konstrukcijos analizė naudojant BEM	20
3. REALAUS OBJEKTO TYRIMAS. VIRPESIŲ ANALIZĖ 3D SPAUSDINTUVE	23
3.1 Pasirengimas virpesių matavimui spausdintuve.....	23
3.2 Virpesių matavimo rezultatai	25
3.3 Matavimo rezultatų apibendrinimas	28
4. VIRPESIŲ SLOPINIMO ALGORITMAI	29
5. SPAUSDINTUVO KORPUSO VIRPESIŲ TYRIMAS NAUDOJANT VIRPESIŲ SLOPINIMO ALGORITMUS	31
5.1. Spausdintuvo korpuso virpesių matavimas.....	31
5.2 Spausdintuvo virpesių mažinimo reguliuojant pastūmų greitį algoritmo bandymas	32
5.3 Spausdintuvo virpesių mažinimo reguliuojant pastūmų pagreitį algoritmo bandymas...	34
5.4 Spausdintuvo virpesių mažinimo bandymas naudojant planavimo į priekį algoritmą	38
5.5 Spausdinimo greičių ir spausdinių matmenų nuokrypių palyginimas	41
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	46
PRIEDAI	48
1 priedas. Greičio valdymo programa.	48
2 priedas. Pagreičio valdymo programa.....	50
3 priedas. Virpesių jutiklio MMF KD35 parametrai.	52
4 priedas. Operacinio stiprintuvo LTC6240 elektrinės charakteristikos.....	53
5 priedas. Spausdintuvo valdiklio Arduino MEGA 2560 schema.....	54

IVADAS

3D spausdintuve, kaip ir kitose CNC staklėse, didelę įtaką gaminio kokybei turi jame atsirandantys virpesiai. Virpesių atsiradimą mechaniniuose įrenginiuose nulemia inercinės jėgos, kurių sukelti virpesiai yra artimi įrenginio konstrukcijos laisvųjų svyravimų dažniui, kada inercinės jėgos tampa tokios didelės, kad konstrukcijos atsparumas joms pasidaro per mažas. Šioms problemoms spręsti naudojami konstrukciniai sprendimai, t.y. gaminami labai tvirti ir masyvus staklių korpusai, kurie atsparus deformacijoms ir sugeria virpesius, be konstrukcinių sprendimų naudojami programų algoritmai koreguojantys trajektorijas, greičius, darbo režimo parametrus.

Pradėjus plačiai naudoti CNC stakles buvo pradėti naudoti greičio ir pagreičio reguliavimo, trajektorijos koregavimo metodai, kad optimizuoti įrenginių darbą. Per keletą dešimtmečių šie metodai tapo labai išstobulinti. Adaptyvios greičio ir pagreičio sistemos tapo paplitusios ne tik CNC staklėse, bet ir kituose automatikos įrenginiuose. Tam pasiekti naudojami šie pagrindiniai metodai: neuroniniai tinklai, darbinio greičio reguliavimas naudojant tiesioginį (angl. feedforward) ryšį, atvira sistema naudojant dažnių filtrus, pagreičių reguliavimas naudojant sistemą su grįžtamoju ryšiu. Visus šiuos metodus nesudėtinga realizuoti, tam dažnai užtenka tik programinės įrangos ir korpuso laisvųjų svyravimų analizės.

Šiame darbe pateikiami virpesių mažinimo sistemų pavyzdžiai, kurių pagalba mažinami 3D spausdintuvo korpuso virpesiai. Koncentruojamasi į sistemą su grįžtamoju ryšiu, kuri naudotų pjezo keraminį jutiklį, jos efektyvumas būtų tiriamas didinant spausdintuvo našumą (taip didėja greičiai ir pagreičiai) iki leistinos maksimalios spartos, tada gauti vibracijų dažniai ir amplitudės lyginamos su rezultatais gautais nenaudojant adaptyvios greičio ir pagreičio reguliavimo sistemos.

Darbo tikslas – pritaikyti ir išbandyti keletą virpesių slopinimo sistemų 3D spausdintuvui, atlikti jų ir jau šiuo metu gaminamuose 3D spausdintuvuose naudojamos virpesių slopinimo sistemos tyrimą, palyginti šias sistemas tarpusavyje.

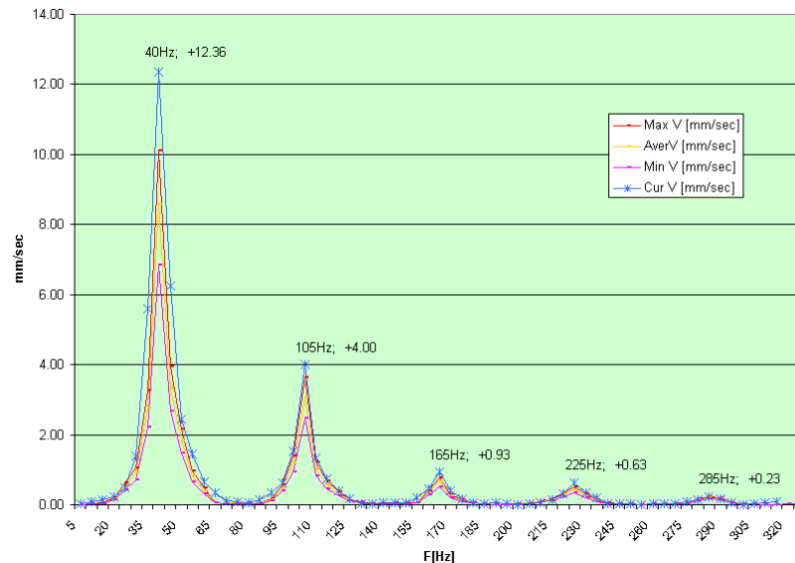
Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti šiuo metu naudojamas virpesių slopinimo sistemas;
2. Atlikti tiriamo 3D spausdintuvo korpuso virpesių tyrimą;
3. Parinkti ir pritaikyti virpesių slopinimo sistemas tiriamam 3D spausdintuvui, parašyti joms programos kodus;
4. Atlikti spausdintuvo korpuso virpesių tyrimą naudojant sukurtus ir šiuo metu 3D spausdintuvuose naudojamus virpesių slopinimo metodus;
5. Palyginti tirtus metodus, nustatyti, kuris yra efektyviausias.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

1.1. Virpesių atsiradimo CNC staklėse priežastys

Staklės, apdirbimo įrankis ir ruošinys sudaro struktūrinę sistemą turinčią sudėtingą dinaminę charakteristiką. Esant atitinkamoms sąlygoms gali atsirasti struktūrinės sistemos virpesiai (žr. 1.1 pav.), be to, kaip ir kitose mašinose, virpesius pagal atsiradimo priežastį galima skirstyti į tris pagrindines grupes: laisvuosius, priverstinius, save žadinančius [3]. Kiekvienu atveju virpesių analizė atliekama atskirai.



1.1 pav. CNC frezavimo staklių vibracijų analizė

Laisvieji virpesiai atsiranda dėl impulsų perduotų per įrenginio korpusą ar pagrindą. Šie impulsai gali atsirasti dėl staigių judančių masių (pvz., apdirbimo stalo) greičio pasikeitimų ar pirminio įrankio susidūrimo su apdirbama detale. Struktūra deformuojasi ir atsiranda laisvieji svyravimai atitinkamose struktūros laisvųjų svyravimų modose, šie virpesiai veikiant natūraliam struktūros slopinimui slopsta, kol išnyksta. Žinoma, jei minėtų laisvųjų virpesių energija vis papildoma, jie gali neslopti, o atvirkščiai padidėti [1]. Tokius virpesius galima aprašyti bendrąja formule 1.1 laikant, kad nagrinėjamame įrenginyje svyravimai nepakankamai slopinami [11].

$$x(t) = C_1 e^{\lambda t} \cos \mu t + C_2 e^{\lambda t} \sin \mu t \quad (1.1)$$

$x(t)$ -nuokrypio amplitudė; C_1, C_2 - integravimo pastoviosios; μ -dinamiškumo koeficientas; $e^{\lambda t}$ -eksponentinis sprendinys su realiomis šaknimis; t - laikas.

Priverstiniai virpesiai atsiranda dėl periodinių jėgų pačioje sistemoje, tokios jėgos gali atsirasti dėl: neišbalansuotos besisukančios masės, frezos ir ruošinio kontakto ar virpesių perduotų per pagrindą iš šalia esančios įrangos [1]. Apdirbimo įrankis virpės veikiančios jėgos dažniu ir jei šis dažnis atitiks vieną iš struktūros laisvųjų svyravimų dažnių, įrenginys pradės rezonuoti pagal

atitinkamą laisvųjų svyravimų modą [3]. Laisvųjų svyravimų amplitudę aprašo bendroji formulė 1.2 [11].

$$x(t) = C_1 e^{\lambda t} \cos \omega_0 t + C_2 e^{\lambda t} \sin \omega_0 t + \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t \quad (1.2)$$

$x(t)$ -nuokrypio amplitudė; C_1, C_2 - integravimo pastoviosios; ω_0 -laisvųjų svyravimų kampinis dažnis; ω -kampinis dažnis; F_0 - pradinė veikianti jėga; m - masė; $e^{\lambda t}$ -eksponentinis sprendinys su realiomis šaknimis; t - laikas.

Save žadinantys virpesiai atsiranda dėl apdirbimo įrankio dinaminio nestabilumo (dažniausiai pasitaiko pjovimo procesų metu). Šis reiškinys dažnai vadinamas apdirbimo įrankio virpėjimu (angl. machine tool chatter). Jei parenkamas per didelis pjovimo gylis, virpesiai sustiprėja, taip sumažindami ruošinio medžiagos šalinimo tempus. Įrenginys, kaip ir prieš tai aptartuose atvejuose, pradeda virpėti viename iš laisvųjų svyravimų dažnių [8].

1.2. Konstrukciniai (pasyvūs) virpesių mažinimo metodai

Pasyvūs virpesių mažinimo metodai tiesiogiai veikia fizinius, mechaninius įrenginio struktūros parametrus, tokius, kaip standumas, masė ir slopinimas. Pasyvus virpesių kontrolės būdai dažniausiai yra tiesiog protingas projektavimas atsižvelgiant į galimus virpesius, įrenginio mechaninės struktūros patobulinimas [4].

Įrenginio struktūros standumo padidinimas sumažina deformacijų amplitudes veikiant dinaminėms jėgoms, tai ženkliai sumažina virpesių amplitudę, o tam tikrus dažnius gali visiškai nuslopinti [8]. Projektuojant taip pat atsižvelgiama į mechaninės struktūros laisvųjų virpesių dažnius, kuriuos stengiamasi padaryti tokius, kad įrenginio darbo metu atsiradusių virpesių dažnis nepriartėtų arba netaptų lygus struktūros laisvųjų virpesių dažniui. Įrenginio masės padidinimas leidžia labiau slopinti virpesius, nes sugeria dalį energijos iš pačios įrenginio struktūros [1]. Pakankamai dažnai yra naudojami įvairūs virpesių slopintuvai, jie gali būti guminiai, spyruokliniai, hidrauliniai, pneumatiniai ir t.t.

Tokie sprendimai yra plačiai taikomi, nes užtikrina patikimumą ir ženkliai sumažina vibracijas. Papildomas standumas reikalingas pasyviai virpesių slopinimui turi įtakos įrenginio kainai. Didinant staklių inerciją kartu ženkliai didėja ir jų gamybos kaina, bei prastėja staklių dinaminė charakteristika, kas nulemia mažesnę galimą įrenginio pastūmų pagreitį ir įrenginio našumą. Nėgana to, pasyvus staklių virpesių mažinimo metodai ne visada duoda norimų rezultatų, kadangi jie inkorporuojami ankstyvame staklių projektavimo etape, kai sunku nuspėti staklių virpesių režimus. Virpesių slopintuvai puiki ir nebrangi svyravimų mažinimo priemonė,

nebloginanti įrenginio dinaminės charakteristikos, bet dažnai ją tikslinga naudoti tik konkretaus komponento virpesių mažinimui [5].

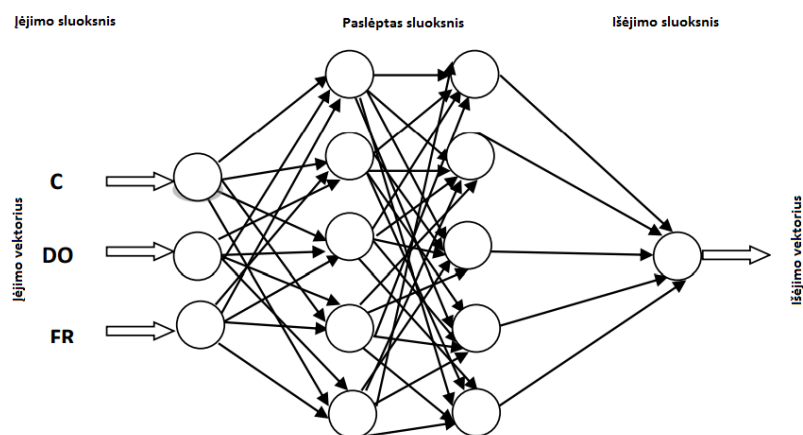
1.3. Aktyvūs virpesių mažinimo metodai

Didinant CNC staklių našumą didinami pastūmų greičiai, didinamas pjūvio gylis, dėl to atsirandančių virpesių amplitudės didėja. Norint sumažinti šiuos virpesius, be minėtų konstrukcinių virpesių mažinimo metodų, galima naudoti aktyvius metodus. Aktyvūs virpesių mažinimo metodai gali būti skirstomi į 2 grupes: valdymo sistemos parametų koregavimo ir tiesioginis apdirbimo įrankio judesio trajektorijos valdymo metodai [4].

Dažnai valdymo sistemos parametų koregavimo metodai realizuojami analizuojant virpesių dažnį ir amplitudę, remiantis jais koreguojamas ruošinio apdirbimo procesas: reguliuojami greičiai, pagreičiai, naudojami dažnių filtrai, koreguojama įrankio trajektorija, valdomos aktyvios įrankio vibracijų slopinimo sistemos (pvz. pjezo keraminis pjovimo peilio slopintuvas) [10]. Šiame darbe apžvelgiami aktyvūs virpesių mažinimo metodai, labiau tinkami pasirinktai temai. Šie metodai yra neuroninių tinklų panaudojimas virpesių slopinimo sistemoms valdyti, darbinio greičio reguliavimas naudojant grįžtamąjį ryšį, darbinio greičio reguliavimas naudojant tiesioginį ryšį, atvira sistema naudojant dažnių filtrus ir pagreičių reguliavimas naudojant grįžtamąjį ryšį.

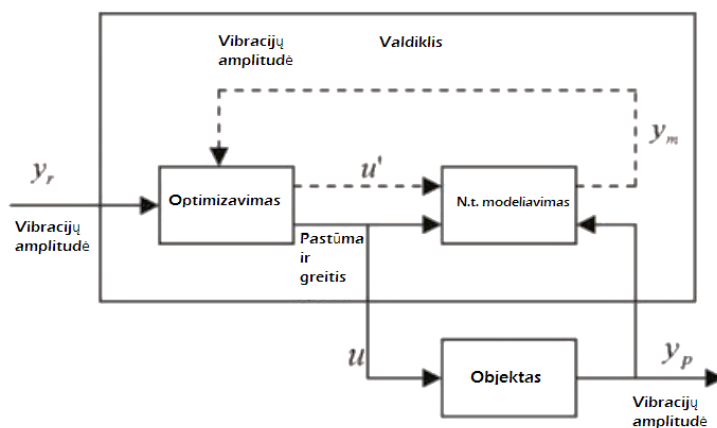
1.3.1. Neuroninių tinklų panaudojimas virpesiams mažinti

Neuroniniai tinklai yra sėkmingai panaudoti dinaminių sistemų identifikavimui ir valdymui. Universalios aproksimavimo galimybės daugiasluoksnio perceptrono (MLP) tinklo (žr. 1.2 pav.), jį daro populiariu pasirinkimu modeliuojant netiesines sistemas ir integruojant bendros paskirties netiesinį valdiklį [2].



1.2 pav. Daugiasluoksnio perceptrono neuronų tinklas

Toliau apžvelgimas procesas kaip sukuriamas neuroninio tinklo valdiklis. Yra du valdiklio realizavimo neuroniniame tinkle etapai: pirmas sistemos struktūros identifikavimas, o antras valdymo struktūros identifikavimas. Sistemos struktūros identifikavimo etape turėtų būti sukurtas modelis norimai sistemai valdyti. Valdymo etape gautas modelis turėtų būti panaudojamas apmokant valdiklį. Šis valdiklis naudoja neuroninio tinklo modelį, kad numatytų valdomo įtaiso atsakus į valdymo signalus. Tuomet optimizavimo procesas apskaičiuoja valdymo signalą vėlesniam įrenginio valdymui. Prognozuojantis valdymo procesas grindžiamas besitraukiančio horizonto principu. Neuroninio tinklo modelis numato įrenginio atsaką per numatytą laiko horizontą, šis atsakas išreiškiamas išėjimo vektoriumi $f(x)$ (formulė 1.3). Numatytas atsakas yra naudojamas skaitiniame optimizavimo procese, kad nustatytų valdymo signalą minimizuojanti valdymo kriterijų numatytame horizonte [9]. 1.3 paveiksle pavaizduota valdiklio optimizavimo procedūra, siekiant sumažinti įrenginio virpesius.



1.3 pav. Optimizavimo schema

$$f(x) = G(b^{(2)} + W^{(2)}(s(b^{(1)} + W^{(1)}x))) \quad (1.3)$$

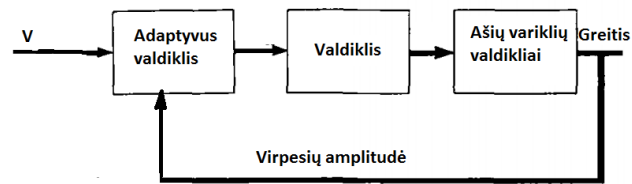
$f(x)$ - išėjimo vektorius, x -įėjimo vektoriaus dydis; G - aktyvavimo funkcija, W - matricių svoriai, s -aktyvavimo funkcija, b - šališkumo vektorius.

Tokia sistema pasižymi lankstumu, tokį pat sistemos modelį galima naudoti adaptyviam greičio ar pagreičio valdymui, dažnių filtravimui ar aktyviems virpesių slopintuvams. Be to, daugiasluoksnis perceptrono neuronų tinklas lengvai apmokomas, kaip ir kiti neuroniniai tinklai, turi platesnes valdymo galimybes lyginant su tradiciniais reguliatoriais.

1.3.2. Virpesių mažinimas naudojant greičio valdymą su grįžtamoju ryšiu

Adaptyvios greičio reguliavimo sistemos virpesiams mažinti tikslas išlaikyti įrenginio virpesių amplitudę leistinose ribose. Tai atliekama stebint įrenginio atitinkamų komponentų

vibracijų amplitudę ir jei padidėjus iki neleistinos ribos mažinti valdomo įrenginio greitį (pvz. tekinimo staklių padavimo greitį) [8].

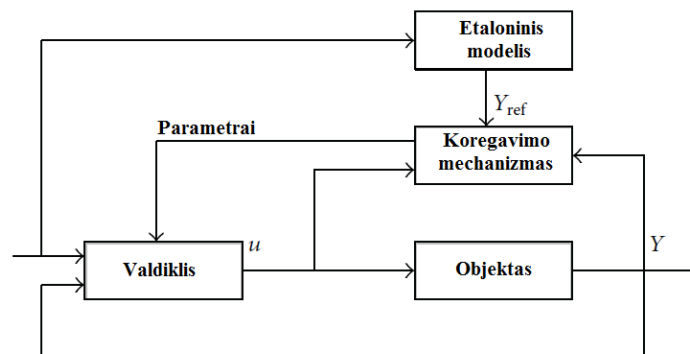


1.4 pav. Virpesių mažinimo sistema valdant greitį

Tokia virpesių mažinimo sistema (žr. 1.4 pav.) susideda iš tokių pagrindinių komponentų: adaptyvaus valdiklio, pagrindinio staklių valdiklio, variklių valdiklio ir virpesių arba poslinkio jutiklių. Sistema veikia per grįžtamąjį ryšį gaudama duomenis apie virpesių arba apdirbimo įrankio poslinkių amplitudę ir koreguodama užduoties signalą valdo viso įrenginio greitį (padavimo, apdirbimo įrankio ar ruošinio greitį), taip atsiradus nepageidaujamiems virpesiams įrenginio greitis palaipsniui mažinamas, kol virpesių amplitudė tampa leistina. Jei virpesių amplitudė pasidaro labai maža, sistema padidina įrenginio greitį, jei leidžia techninės galimybės, bei kiti parametrai nesikerta su nauja užduotimi. Toks metodas yra itin paprastas ir leidžia pagerinti gaminio kokybę, bet dėl mažinamų padavimo greičių gali sumažėti darbo našumas.

1.3.3. Virpesių mažinimas naudojant greičio valdymą su tiesioginiu ryšiu

Kita greičio reguliavimo sistema siekiant sumažinti virpesius pateikta 1.5 paveiksle. Ją sudaro: etaloninis modelis, koregavimo mechanizmas, valdiklis, objektas.



1.5 pav. Virpesių mažinimas greitį reguliuojant pasitelkus etaloninį modelį

Adaptyvus valdymas naudojantis etaloninį modelį (angl. *Model reference adaptive control (MRAC)*) yra uždara valdymo sistema, kuri gali pakeisti sistemos atsaką, naudodama etaloninį modelį, kurio pagalba keičiami pavaru valdymo parametrai. Nagrinėjamos adaptyvaus valdymo sistemos įėjimas gali būti pastūmos greitis ir/ar apdirbimo įrankio greitis. Išmatavus įėjimo virpesių parametrų vertes jos lyginamos su etaloniniu modeliu ir pagal tai, bei atsižvelgiant į

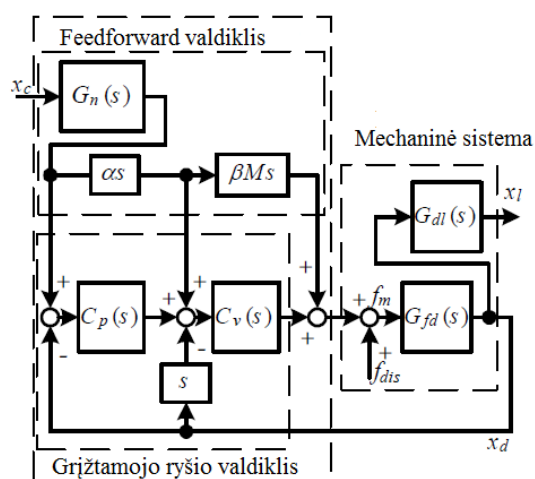
maksimalias leistinas pavaroms naudojamų variklių srovės, realiu laiku valdomi pavarų greičiai. Dėl procesų greičio adaptacijos, užtikrinama, kad procesas atliekamas naudojant optimalų energijos kiekį sukuriant reikalingas jėgas užtikrinti apdirbimo proceso našumą, bet kartu mažinant perkrovas, kurios gali sukelti virpesius. Be to tuo pačiu metu kontroliuojamas pavarų variklių apkrovimas. Esant skirtingiems apkrovimams ypač kenčia apdirbimo įrankis ir jo pavara, taip mažėja įrankio darbo valandų skaičius, didėja pavaros ir atraminių elementų (guolių) dilimas, momentinės srovės gali išaugti iki neleistinos ribos. Tinkamai suderinus adaptyvią greičio reguliavimo sistemą su etaloniniu modeliu, minėtų reiškinų įtaką galima sumažinti [6].

Apibendrinant galima teigti, kad dėl tokios adaptyvios sistemos įdiegimo pagerėja ruošinio apdirbimo kokybė, sumažėja elektros sąnaudos, mažėja įrankio ir staklių dilimas. Visa tai turi teigiamą ekonominį efektą su pakankamai nedidelėmis investicijomis.

1.3.4. Atvira sistema naudojant dažnių filtrus

Virpesių mažinimas naudojant filtrus realizuojamas atvira valdymo sistema. Įrenginio rezonansiniai dažniai yra sumodeliuojami ir valdiklis žinodamas įrenginio rezonansinius dažnius išsiunčia atitinkamas padėties valdymo užduotis.

Yra įvairių būdų praktikoje realizuoti tokius filtrus, vienas iš jų bikvadratinis filtras [12]. Tokios sistemos, naudojančios bikvadratinį filtrą, schema pateikta 6 paveiksle. Ši sistema susideda iš tiesioginio ryšio valdiklio su dažnių filtru, kuris koreguoja valdiklio su grįžtamoju ryšiu įėjimą. Valdiklis su grįžtamoju ryšiu valdo pavarų elektros variklius.



1.6 pav. Pavaros valdymo sistema su dažnių filtru

Sistemos pateiktos 1.6 paveiksle perdavimo funkcija yra 1.4. Čia ω_v ir ζ_v yra rezonansinis dažnis ir slopinimo koeficientas atitinkamai. $G_{fb}(s)$ ir $G_{ff}(s)$ yra polinomai, kurie nustatomi iš grįžtamojo ryšio parametru.

$$G(s) = \frac{1 + \frac{2\zeta_n}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2}{1 + \frac{2}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2} \frac{G_{ff}(s)}{G_{fb}(s)} \frac{1 + \frac{2\zeta_a}{\omega_a} s}{1 + \frac{2\zeta_v}{\omega_v} s + \frac{1}{\omega_v^2} s^2} \quad (1.4)$$

Vėlinimas gaunamas formulę 1.4 įstačius formulę 1.5:

$$t_d = \frac{2}{\omega_n} \quad (1.5)$$

Priimant, kad su ω_n ir ζ_n yra nustatomi lygiai ω_v ir ζ_v , atitinkamai ir nekreipiant dėmesio į aukštesnio laipsnio dedamąsias stebint žemesniųjų dažnių modas aproksimuojama (formulė 1.6):

$$G_n(s) = \frac{1}{1 + \frac{2}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2} \quad (1.6)$$

Tada apskaičiuojami analitiniai trajektorijos paklaidos parametrai. Radialinis mažinimas gaunamas iš (formulė 1.7):

$$\Delta_r = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2}{\omega_n^2} \left(\frac{v}{r}\right)^2 + \frac{1}{\omega_n^4} \left(\frac{v}{r}\right)^4}} \right) r \quad (1.7)$$

Jei komandos kampinis greitis (v/r) yra žymiai mažesnis nei ω_n , tada panaudojama tokia aproksimacija:

$$\Delta_r = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4} t_d^2 \frac{v^2}{r} \quad (1.8)$$

Krašto užapvalinimas gaunamas iš formulės 1.9:

$$\Delta_e = \frac{8e^{-2}}{\omega_n} \left(v \sin \frac{\theta}{2} \right) = 0.54 t_d \left(v \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.9)$$

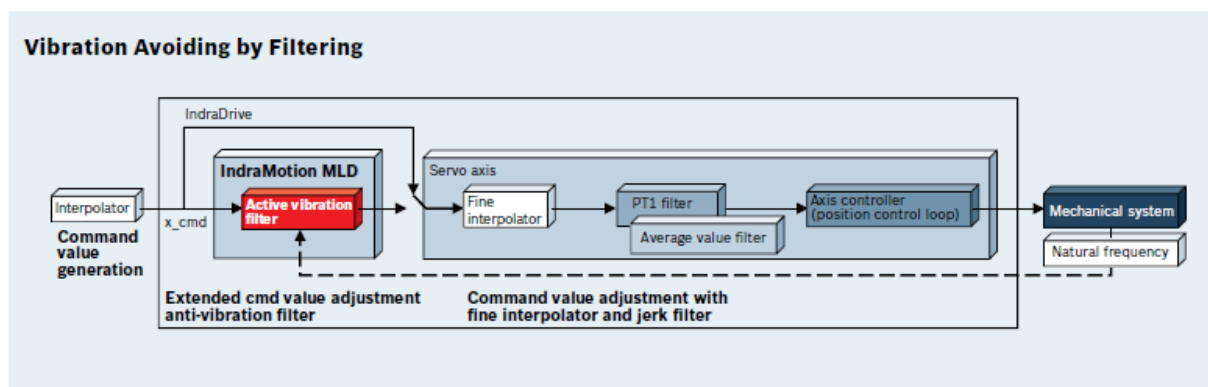
Asimetrinė paklaida gaunama iš formulės 1.10:

$$\Delta_a = \frac{0.309}{\omega_n} \left(v \sin \frac{\theta}{2} \right) = 0.155 t_d \left(v \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.10)$$

Naudojant šį metodą valdymo sistemos atsakas priklauso nuo rezonansinio sistemos dažnio. Jei uždaros sistemos rezonansinis dažnis yra žemesnis, tada atsako greitis turi būti mažesnis, o asimetrinė paklaida didesnė, kad išvengtų virpesių.

Virpesių mažinimo sistemos naudojant dažnių filtrus pavyzdys pateiktas 1.7 paveiksle. Ją sudaro: aktyvus virpesių filtras (laisvųjų svyravimų dažnių filtras), interpoliatorius, vidutinės reikšmės filtras, ašių pavarų valdiklis [10]. Esant darbiniam režimui virpesių filtras modeliuoja rezonansinius mechaninės sistemos laisvųjų svyravimų dažnius ir pagal juos koreguoja įeinančius užduoties signalus, priartėjančius prie įrenginio rezonansinių dažnių. Po to „nufiltruoti“ užduoties

signalai keliauja į interpoliatorių, kur sujungiami trajektorijos taškai ir gaunamos vidutinės reikšmės panaudojant vidurkio reikšmės filtrą, iš kurio gautas užduoties signalas keliauja į variklių valdiklį, ir valdo įrenginio ašių variklius.

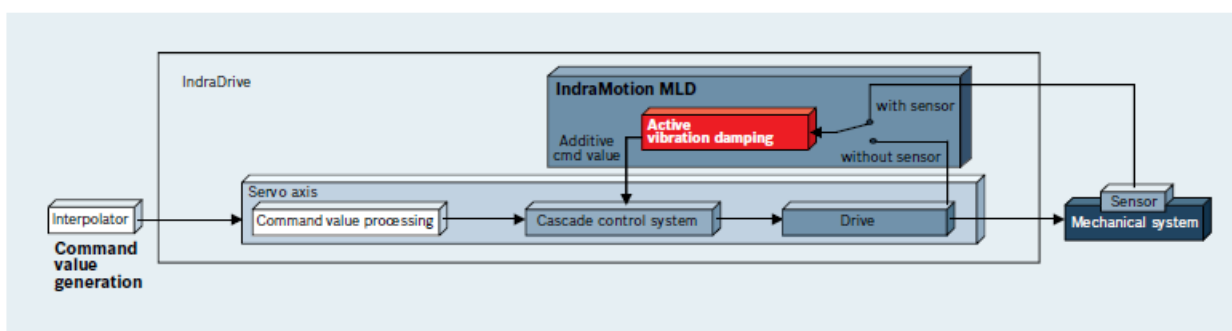


1.7 pav. „Rexroth“ siūloma vibracijų filtravimo schema

Praktikoje šis metodas puikiai tinka įrenginio valdymui, kur objektas nejudamai įtvirtintas, o įrankio apkrovimas nesikeičia (tokio įrenginio pavyzdys 3D spausdintuvas).

1.3.5. Pagreičių reguliavimas naudojant sistemą su grįžtamoju ryšiu

Pagreičių reguliavimas naudojant sistemą su grįžtamoju ryšiu yra adaptyvus virpesių mažinimo metodas. Metodo esmė, kad matuojami įrenginio, kuriam siekiama sumažinti virpesius, virpesių amplitudė ir dažnis. Naudojant šį metodą labai svarbu teisingai parinkti naudojamo jutiklio (virpesių ar poslinkio) vietą ir tinkamai suderinti virpesių mažinimo reguliatorių.



1.8 pav. „Rexroth“ siūloma pagreičių reguliavimo su grįžtamoju ryšiu sistema

Naudojant aktyvų virpesių slopinimą reguliuojant pagreičius, naudojama valdymo sistema (žr. 1.8 pav.) su grįžtamoju ryšiu, pozicijos interpoliatoriumi, ši sistema siunčia užduoties signalus į judesio valdiklį. Judesio valdiklis tada nustato sukimo momentą arba greitį atitinkamose pozicijose taip, kad minėtų korekcijų jėgos impulsai slopintų atsiradusius virpesius [10]. Automatiškai parametrus nusistatantis PID reguliatorius reguliuoja įrenginį atsižvelgdamas į apkrovą.

Robotikoje ir CNC įrenginiuose dažnai sutinkamas pagreičių mažinimo metodas yra trečios greičio išvestinės (angl. „Jerk“) mažinimo metodas [13]. Jis naudojamas dėl savo galimybės išgauti labai tolygius judesius, kurie primena žmogaus judesius. Minimalių trūkčiojimų metodas formuluojamas taip: reikia rasti tokią $x_{ref}(t)$ funkciją, kuri minimizuotu darbo charakteristikos indeksą, kuris yra trūkčiojimo kvadratinis laiko integralas (formulė 1.11).

$$J(x_{ref}(t)) = \frac{1}{2} \int_0^T \ddot{x}_{ref}^2(t) \quad (1.11)$$

Čia T-nurodytas pagreitėjimo laikas.

Šios optimizavimo procedūros metu atsiranda penktos eilės polinomas. Todėl optimalaus judesio dėsnis paprastai asocijuojamas su pirminiu filtru, kuris pagerina trajektorijos sekimą. Pirminis filtras tokioje sistemoje yra keleto tyrėjų adresuojama problema. Žvelgiant supaprastintai šis filtras atitinka atvirkščią sistemos dinamiką (turima omenyje minimalios fazės dinamikos sistemas). Tiesa pirminis filtras nėra būtinas ir nemažai daliai sistemų minimalių trūkčiojimų metodą galima taikyti tiesiogiai be pirminio filtro.

Įvertinant greitaveiką ir kartu pritaikomumą naudojant minimalaus trūkčiojimo dėsnį, reikia įvertinti ir mažiausią pagreitėjimo laiką. Teoriškai šis laikas apribojamas maksimalaus pagreičio. Apskaičiuoti greitėjimo laiką T_{MJ} poslinkiui P_{ref} galima naudojantis formule 1.12.

$$T_{MJ} = \sqrt{\frac{10P_{ref}}{\sqrt{3}A}} \quad (1.12)$$

Judesio dėsnis su minimaliu trūkčiojimu gali būti kompromisas tarp vibracijų mažinimo, greitėjimo laiko ir jautrumo dominuojantiems virpesių parametrų (pasižymi dideliu jautrumu). Reiktų paminėti, kad minimalaus trūkčiojimo metodas reikalauja daugiau resursų iš valdiklio, bet pakeičiant penktos eilės polinomas kubinėmis kreivėmis.

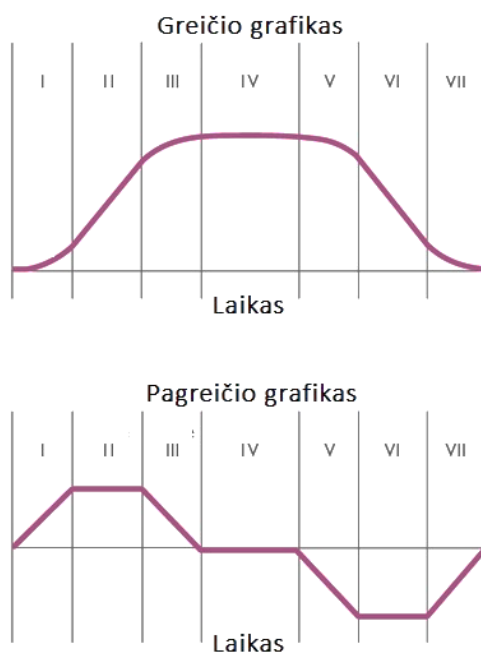
Tokio tipo vibracijų slopinimo sistema puikiai tinka įrenginiams, kurių mechaninės apkrovos keičiasi, bet reikia atsižvelgti, kad tokia sistema yra lėtesnė, nei tiesioginio ryšio sistemos ir norint pasiekti ta pačią valdymo greitaveiką, reikia naudoti greitesnius valdiklius, dėl to padidėja išlaidos sistemai įdiegti.

1.3.6. Pavarų greičio reguliavimas naudojant S-kreivę

S kreivės naudojamos įvairiose judesio valdymo sistemose įskaitant ir CNC įrenginius. S-kreivės judesio profilis padeda judesius atlikti sklandžiau, leidžia sumažinti mechaninių virpesių amplitudę. Minėtas efektas gaunamas tolygiai didinant pagreitį judesio pradžioje ir tolygiai

mažinant pagreitį judesio pabaigoje, taip gaunamas tolygus judesys be staigių greičio pokyčių, kas sumažina atsirandančias inercines jėgas.

S-kreivę galima suskirstyti į 7 fazes (1.9 paveikslas). I etape, apkrova pradeda judėti (iš rimties būsenos), netiesiškai didėja pagreitis iki maksimalios vertės. II fazėje, apkrovos pagreitis didinimas tolygiai. III fazėje tolygiai mažinamas pagreitis, kol pasiekia 0, tuo metu apkrovos greitis pasiekia savo didžiausią vertę. Greitis išlieka pastovus visoje IV fazėje, tada simetriškai I-III fazėms apkrova V, VI ir VII fazėse stabdoma (pagreičio vertė tampa neigiama) kol nurodytą greitį (pvz. sustoja).



1.9 pav. S-kreivės fazės

S-kreivės trajektorija sudaryta iš segmentų, kurių skaičius nustatomas kreivės modelio šablonu. Tada poveikių laiko momentai apskaičiuojami taip, kad segmentai būtų sujungti sklandžiai. Taigi apibrėžtas bendrasis S-kreivės modelis sudarytas iš $2n-1$ trajektorijos segmentų. Taigi reikalingas suskaičiuoti laiko momentų skaičius yra $2n$ [16].

Remiantis bendruoju S-kreivės modelio apibrėžimu, jos kinematinės savybės gali būti aprašomos remiantis formulėmis 1.13, 1.14. Iš išraiškų matoma, kad linijinis greitis yra pagreičio integralas greitėjimo arba lėtėjimo metu, kuris trunka laiką t_a .

$$V = \int_0^{t_a} a(t) \cdot dt = a_{vid} \cdot t_a \quad (1.13)$$

$$a_{vid} = \frac{1}{t_a} \int_0^{t_a} a(t) \cdot dt \quad (1.14)$$

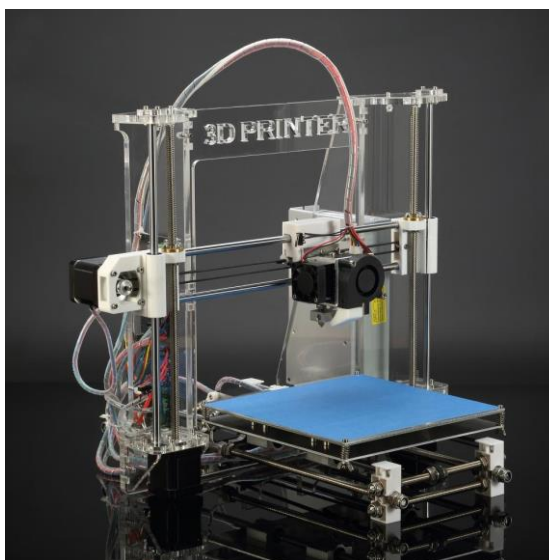
Pagreičių priklausomybė greitėjimo ir lėtėjimo metu atrodo taip: $a_{vid} \leq a_{max} \leq 2a_{vid}$.

1.3.7. Pasirinkti metodai virpesių mažinimui 3D spausdintuvo korpuse

Tyrimo atlikimui parinkami 3 metodai: greičių reguliavimas su grįžtamoju ryšiu, pagreičių reguliavimas su grįžtamoju ryšiu ir S-kreivės metodas. Parenkant metodą buvo atsižvelgiama į įvairių virpesių mažinimo metodų paplitimą CNC staklėse, naudojamo įrenginio konstrukciją, naudojamą programinę įrangą, bei galimybę realizuoti pasirinktą metodą tyrimo metu. Tiek greičių, tiek pagreičių su grįžtamoju ryšiu valdymo metodai buvo pasirinkti dėl palyginus nesudėtingos integracijos į tiriamąjį spausdintuvą, galimai didelės įtakos spausdinimo greičiui ir kokybei. S-kreivės metodas virpesių mažinimui jau yra naudojamas 3D spausdintuvuose, todėl rezultatai gauti naudojant šį metodą bus lyginami su prieš tai minėtais metodais.

2.PASIRENGIMAS TYRIMUI

Tyrimas atliekamas naudojant 3D spausdintuvą „Rep Rap Prusa i3“ (žr. 2.1 pav.) prie jo pritvirtinamas pjezokeraminis jutiklis virpesiams matuoti [7]. Vibracijų jutiklio vieta parenkama remiantis surinktais pradiniais duomenimis, kurie gaunami atlikus spausdintuvo korpuso vibracijų modeliavimą naudojant baigtinių elementų metodą (toliau-BEM) naudojančią programinę įrangą. Šiam tyrimui BEM programine įranga pasirinktas „Solid Works“ paketas. Duomenys gaunami atliekant virpesių ir deformacijų korpuse tyrimą ir randant vietą, kur virpesių amplitudė didžiausia, šioje vietoje ir tvirtinamas virpesių jutiklis.



2.1 pav. 3D spausdintuvas „Rep Rap Prusa i3“ [14]

Pats tyrimas vyksta spausdintuvui esant darbo režime, matuojami virpesiai parinktame taške. Visiems bandymas naudojama ta pati detalė, kuri suprojektuota taip, kad darbo metu spausdintuvo korpusą veiktų įvairiausių dažnių ir amplitudžių virpesiai, taipogi detalė pozicionuojama toje pačioje vietoje kiekvieno bandymo metu. Po kiekvieno tyrimo pridėti spausdintuvo greičio ir pagreičio reguliavimo algoritmai koreguojami siekiant padidinti greitaveiką esant priimtinioms spausdintuvo korpuso virpesių amplitudėms.

Spausdintuvo greičio ir pagreičio reguliavimo algoritmai pirmame etape sudaromi remiantis korpuso BEM analizių rezultatais. Vėliau atliekant praktinius eksperimentus šie algoritmai koreguojami siekiant gauti, kaip jau minėta maksimalią greitaveiką esant leistiniams spausdintuvo korpuso virpesiams. Pagrindiniai reguliuojami parametrai tai programos algoritme naudojamos virpesių pagreičio, ašių padavimo greičių ir pagreičių reikšmės, bei laiko konstantos.

2.1. Spausdintuvo konstrukcijos analizė naudojant BEM

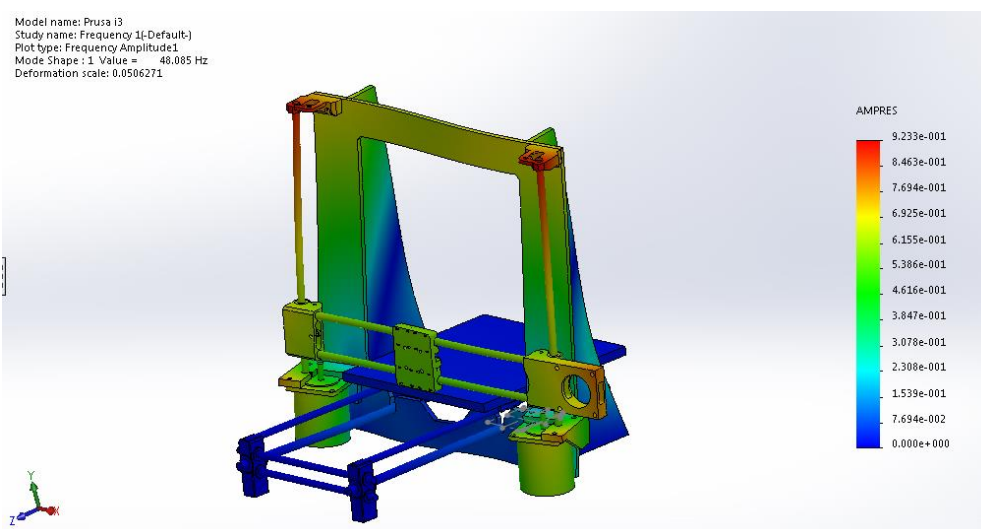
Virpesių analizė tiriamo 3D spausdintuvo korpuse pradama nuo deformacijų analizės naudojant baigtinių elementų metodą (toliau BEM). Naudojant „SolidWorks“ programinę įrangą sudaromas supaprastintas 3D spausdintuvo korpuso modelis, kuriame panaudojus „SolidWorks“ „Study“ paketą atliekama BEM analizė.

Ruošiant spausdintuvo modelį analizei, nurodomos korpuso įtvirtinimo vietos, iš pradinių duomenų, apie judančias spausdintuvo mases ir maksimalius pagreičius, apskaičiuojamos maksimalios inercinės jėgos veikiančios x ir y ašyse (žr. 2.1 lentelė). Z ašies inercinės jėgos nevertinamos, nes Z ašies pagreitis labai mažas ir atskiro sluoksnio spausdinimo metu Z ašis nejuda.

2.1 lentelė. Apkrovos x ir y ašimis

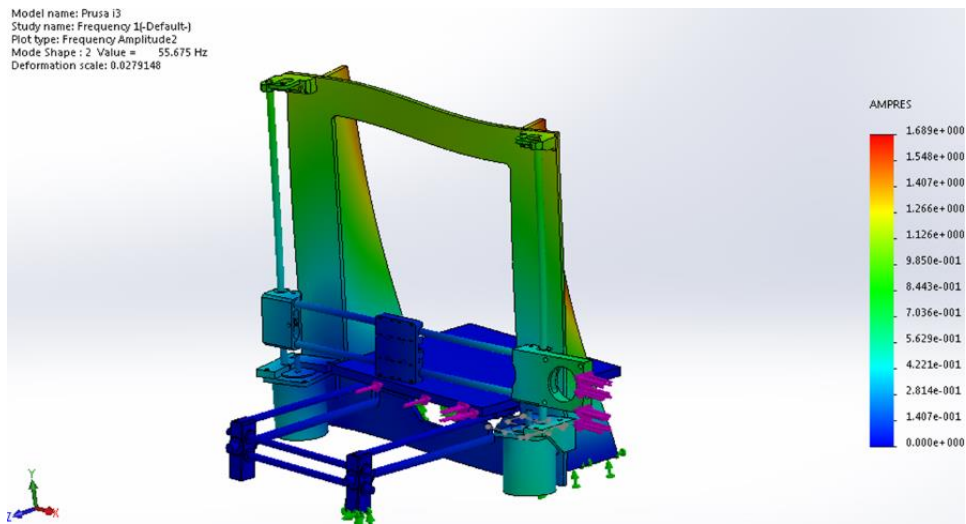
Ašis	Judančių komponentų masė, kg	Maksimalus pagreitis, mm/s ²	Inercinė jėga, N
x	0,21	3000	0,63
y	0,457	3000	1,38

Atlikus simuliaciją, gauti 5 pagrindiniai rezonansiniai dažniai su korpuso deformacijų schemomis ir maksimaliomis deformacijų amplitudėmis. Simuliacijų rezultatai pateikti 2.1-2.5 paveiksluose ir 2.2 lentelėje.



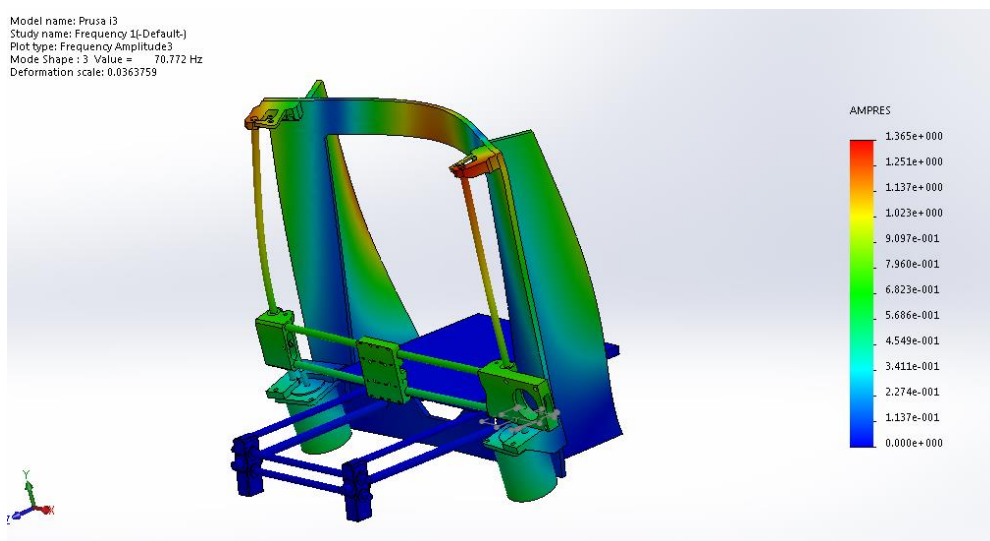
2.1 pav. Spausdintuvo deformacijos esant 48Hz rezonansiniam dažniui.

2.1 paveiksle pateiktos 3D spausdintuvo deformacijos, esant 1 rezonansiniam dažniui, kuris atsiranda ties 48 Hz. Tiesa, dėl konstrukcinių spausdintuvo ypatumų pirmo rezonansinio dažnio maksimali virpesių amplitudė yra tik 0,57 mm, o tai yra ženkliai mažiau, nei 2 rezonansinio dažnio, kurio virpesių amplitudė 1,69 mm.



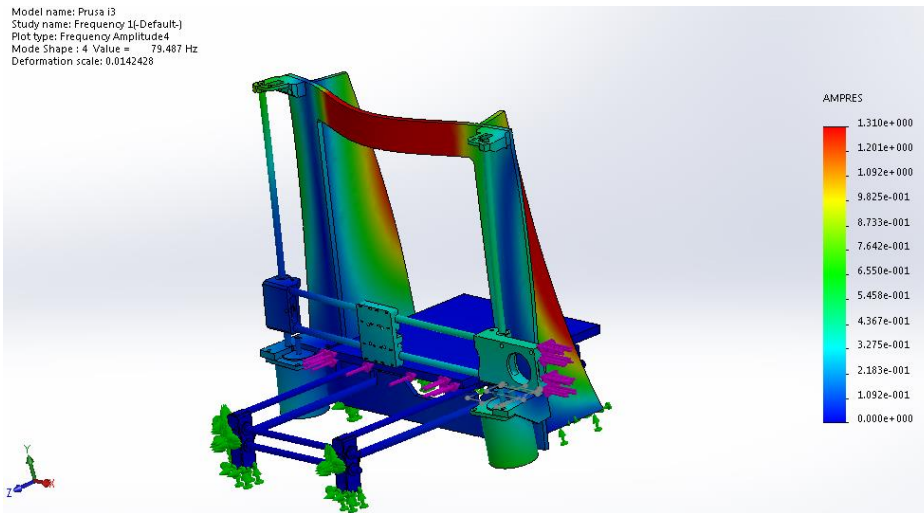
2.2 pav. Spausdintuvo deformacijos esant 56 Hz rezonansiniam dažniui.

2.2 paveiksle pateiktos 3D spausdintuvo deformacijos, esant rezonansiniam dažniui, kuris atsiranda ties 56 Hz. Tiesa, dėl konstrukcinių spausdintuvo ypatumų antro rezonansinio dažnio maksimali virpesių amplitudė yra 1,69 mm, kuri yra didžiausia lyginant deformacijas tarp visų 5 atvejų.



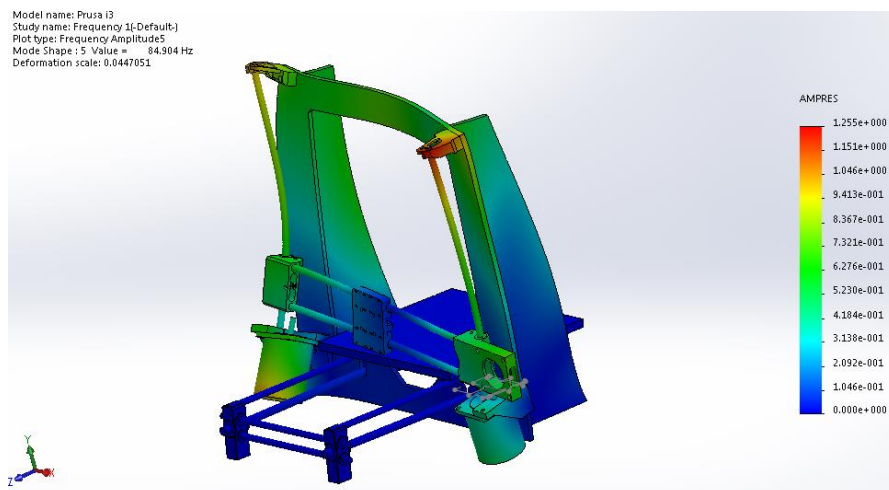
2.3 pav. Spausdintuvo deformacijos esant 71 Hz rezonansiniam dažniui

2.3 paveiksle pateiktos 3D spausdintuvo deformacijos, esant rezonansiniam dažniui, kuris atsiranda ties 71 Hz. Šiuo atveju spausdintuvo korpuso virpesių maksimali amplitudė yra 1,36 mm, kuri yra mažesnė, nei 2 rezonanso virpesių amplitudė.



2.4 pav. Spausdintuvo deformacijos esant 80 Hz rezonansiniam dažniui

2.4 paveiksle pateiktos 3D spausdintuvo deformacijos, esant rezonansiniam dažniui, kuris atsiranda ties 80 Hz. Šiuo atveju spausdintuvo korpuso virpesių maksimali amplitudė yra 1,31 mm, kuri yra mažesnė, nei 3 rezonanso virpesių amplitudė.



2.5 pav. Spausdintuvo deformacijos esant 85 Hz rezonansiniam dažniui.

2.5 paveiksle pateiktos 3D spausdintuvo deformacijos, esant rezonansiniam dažniui, kuris atsiranda ties 85 Hz. Šiuo atveju spausdintuvo korpuso virpesių maksimali amplitudė yra 1,26 mm, kuri yra mažesnė, nei 4 rezonansinio dažnio virpesių amplitudė.

Remiantis visų 5 rezonansinių dažnių deformacijų schemomis ir maksimalių virpesių amplitudžių reikšmėmis galima teigti, jog turimi pagrindiniai spausdintuvo korpuso rezonansiniai dažniai, o reikšmingiausias rezonansinis dažnis būtų 56 Hz. Pagal minėto rezonansinio dažnio deformacijų schemą parenkama piezo keraminio virpesių jutiklio tvirtinimo vieta (kur matoma didžiausia deformacija). Apibendrinti simuliacijų rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Spausdintuvo korpuso rezonansiniai dažniai.

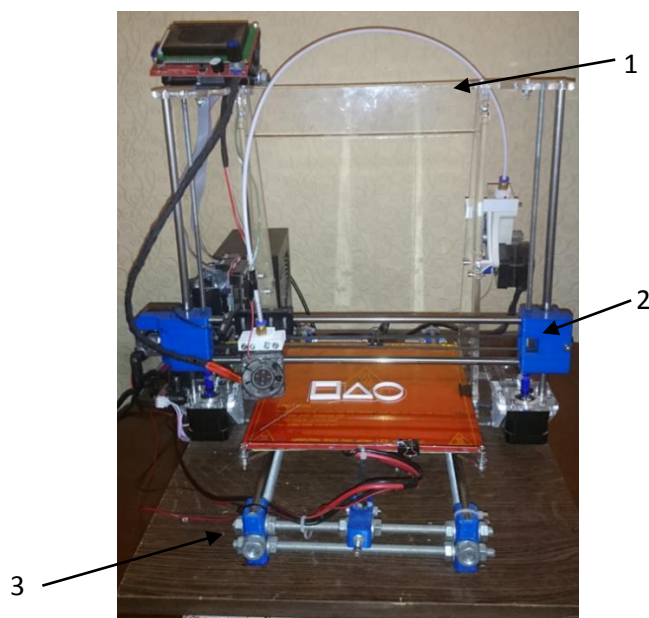
Dažnis, Hz	48	56	71	80	85
Amplitudė, mm	0,57	1,69	1,36	1,31	1,26

3. REALAUS OBJEKTO TYRIMAS. VIRPESIŲ ANALIZĖ 3D SPAUSDINTUVE

Siekiant gauti pradinius duomenis greičio ir pagreičio reguliavimo programoms, bei duomenis pagal kuriuos vėliau galima būtų palyginti bandomus virpesių slopinimo metodus, atliekami virpesių greičio amplitudės ir virpesių dažnių matavimai 3D spausdintuve, kai nenaudojami jokie virpesių slopinimo algoritmai. Taipogi matavimai atliekami siekiant patikrinti teorinių skaičiavimų teisingumą.

3.1 Pasirengimas virpesių matavimui spausdintuve

Tyrimas atliekamas matuojant virpesius 3D spausdintuve „Rep Rap Prusa i3“ [14] (žr. 16 pav.). Virpesiai matuojami 3 taškuose, kurie parenkami remiantis BEM analize. Virpesių matavimo vietas pateiktos 6 paveiksle.



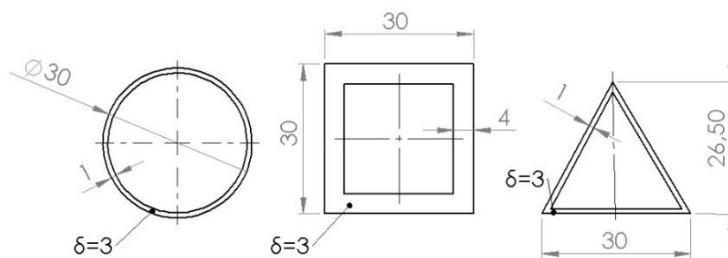
3.1 pav. Tiriamas 3D spausdintuvas

Virpesių matavimo vietų (žr. 3.1 pav.) aprašymai:

1. Virpesių jutiklio tvirtinimo vieta. Šioje vietoje naudojamas bendriems, visų ašių sukeltiems korpuso virpesiams matuoti, vieta nustatyta remiantis BEM analize;
2. Virpesių x-ašies kryptimi matavimo vieta;
3. Virpesių y ašies kryptimi matavimo vieta.

Matuojant virpesius, reikalingos vienodos judėjimo trajektorijos. Šiam tikslui nubraižomos detalės, kurios leistų pamatuoti virpesius trimis atvejais: esant tangentiniams judesiams (apskritimas), esant linijiniams judesiams naudojant vieną ašį judėjimui (kvadratas), esant linijiniams judesiams naudojant dvi ašis judėjimui (trikampis). Šių figūrų (žr. 3.2 pav.) spausdinimo trajektorijos yra pagrindinės trajektorijos, spausdinant bet kokią kitą detalę, todėl jos

puikiai tinka siekiant gauti vienodas spausdinimo sąlygas (trajektorijų atžvilgiu) visų bandymų metu ir leidžia tiksliai išmatuoti virpesius, kadangi virpesiai kiekvienos trajektorijos atveju atskirti pakankamu laiko tarpu.



3.2 pav. Detalės spausdinimui

Virpesių greičio ir dažnio matavimui naudojamas kontaktinis virpesių analizatorius „Vibrotip VIB 8.630“ (žr. 3.3 pav.), kurio matavimo galvutė spausdinimo metu priglaudžiama prie vieno iš matavimo taškų [15].



3.3 pav. Virpesių signalų analizatorius „Vibrotip VIB 8.630“

Virpesių matavimas atliekamas remiantis prielaidomis ir pradiniais duomenimis.

Prielaidos ir pradiniai duomenys:

- Virpesių matavimas pradedamas nuo 50 mm/s ašinių greičių;
- Ašinių greičių didinimo žingsnis 10 mm/s;
- Pagreitis x,y ašimis 2500 mm/s²;
- Pjezo keraminio jutiklio tvirtinimo vietos parenkamos remiantis BEM modeliavimo rezultatais;
- Visiems bandymams naudojamos vienodos detalės spausdinimui;
- Išjungti spausdinimo proceso optimizavimo algoritmai.

3.2 Virpesių matavimo rezultatai

Gauti matavimų rezultatai pateikti 3.1-3.3 lentelėse. 3.1 lentelėje pateiktos virpesių greičių amplitudės matuojant virpesius sukeltus abiejų ašių (x ir y).

3.1 lentelė. Virpesių greičiai, matuojant aukščiausios virpesių amplitudės taške.

Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,5	0,7	0,6	0,9	0,9
Sukamūjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,4	0,6	0,8	1	1
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9
Spausdinimo laikas, min	14:40	12:57	11:47	11:10	10:51	10:36

3.2 lentelėje pateikti virpesių matavimo rezultatai matuojant virpesių greitį x ašies kryptimi. 3.1 lentelėje pateikti virpesių matavimo rezultatai matuojant virpesių greitį y ašies kryptimi. Lyginant gautus duomenis, aiškiai matome, jog dėl sunkesnių nei x ašies, y ašies judančių komponentų atsiranda didesnės inercinės jėgos, dėl kurių virpesių greitis y ašies kryptimi yra didesnis.

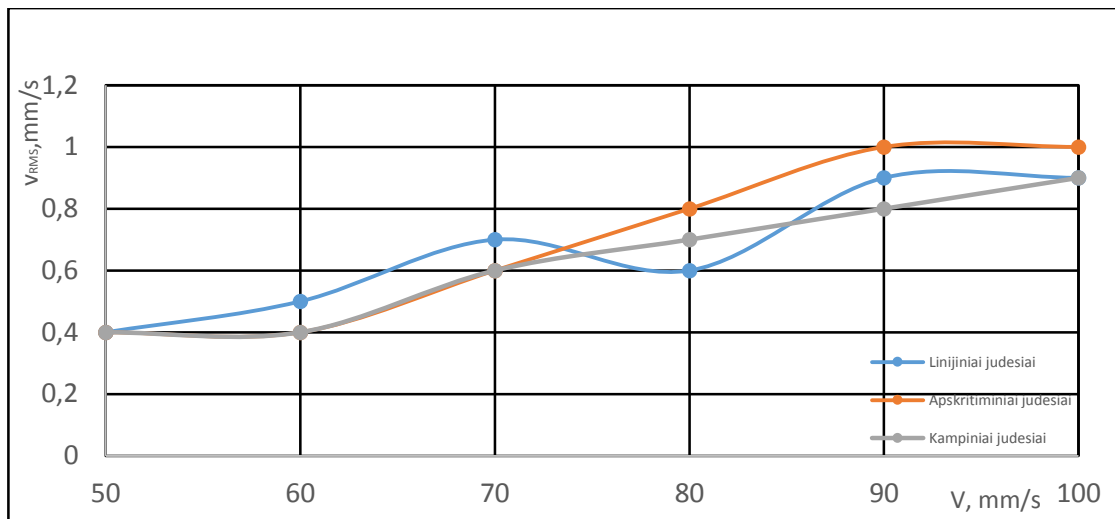
3.2 lentelė. Virpesių greičiai x ašies kryptimi.

Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,6	0,5	0,8	0,8	1
Sukamūjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8
Spausdinimo laikas, min	14:40	12:57	11:47	11:10	10:51	10:36

3.3 lentelė. Virpesių greičiai y ašies kryptimi.

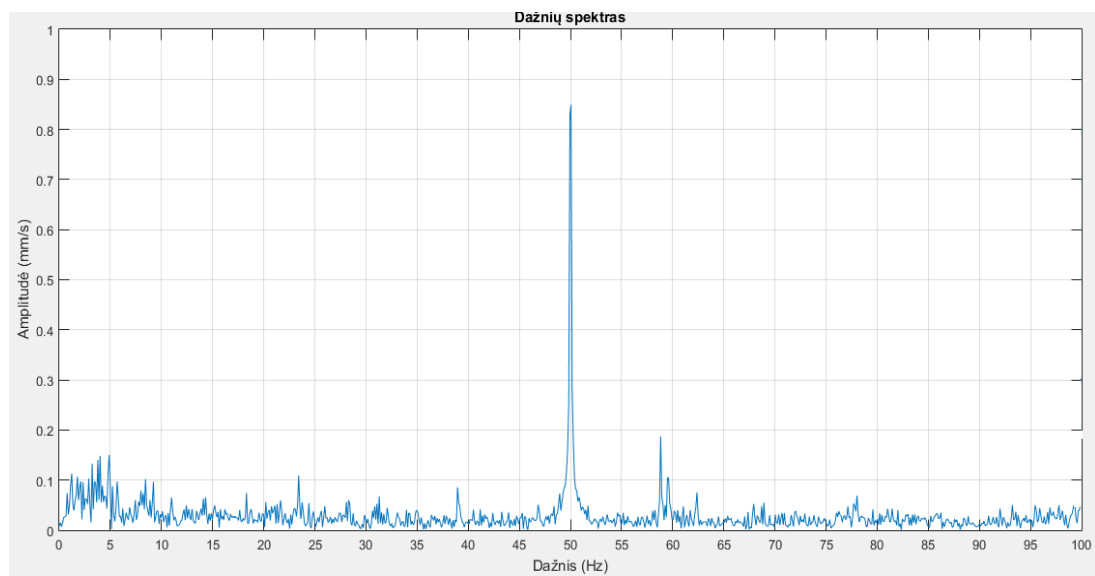
Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,6	0,6	0,8	1,10	1,1
Sukamūjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,4	0,5	0,6	0,9	1
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,3	0,3	0,5	0,8	1	1
Spausdinimo laikas, min	14:40	12:57	11:47	11:10	10:51	10:36

Virpesių greičio grafikas esant skirtingoms trajektorijoms pateiktas 3.4 paveiksle. Jame matoma, jog virpesių greičiai mažai skiriasi esant skirtingoms trajektorijoms, išskyrus tangentinę trajektoriją, kada esant daugiau nei 80 mm/s ašių greičiams ženkliai padidėja virpesių greitis, lyginant su linijiniais ir kampiniais judesiais.



3.4 pav. Virpesių greičiai esant skirtingoms judėjimo trajektorijoms

Taipogi pasinaudojus naudojamu virpesių signalų analizatoriaus funkcija įrašyti matuojamų virpesių greičių reikšmes, jos perkeliamos į kompiuterį ir panaudojus „Matlab“ programinę įrangą sudaromas 3D spausdintuvo virpesių spektras, kuris pateiktas 3.5 paveiksle. Spektre matomas rezonansinis dažnis, kai turima aukščiausia virpesių amplitudė yra 51Hz, ši reikšmė yra mažesnė, nei gauta korpuso BEM analizės metu.



3.5 pav. Spausdintuvo virpesių spektras

Atspausdinus detales visais pasirinktais greičiais, jos išmatuojamos ir detalių išorinių matmenų nuokrypiai surašomi į lenteles 3.4, 3.5, 3.6. Taipogi apskaičiuojamos nuokrypio procentinės išraiškos. Remiantis gautomis detalių išorinių nuokrypių reikšmėmis galima teigti, jog detalių spausdinimo kokybė pradeda greitai prastėti viršijus 70mm/s padavimo greitį, tai pastebima ir vizualiai vertinat atspausdintų detalių kokybę.

3.4 lentelė. Išorinių apvalios detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Skersmuo, mm	Nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	30	0,15	0,50
2	60		0,15	0,50
3	70		0,22	0,73
4	80		0,40	1,33
5	90		0,46	1,53
6	100		0,49	1,63

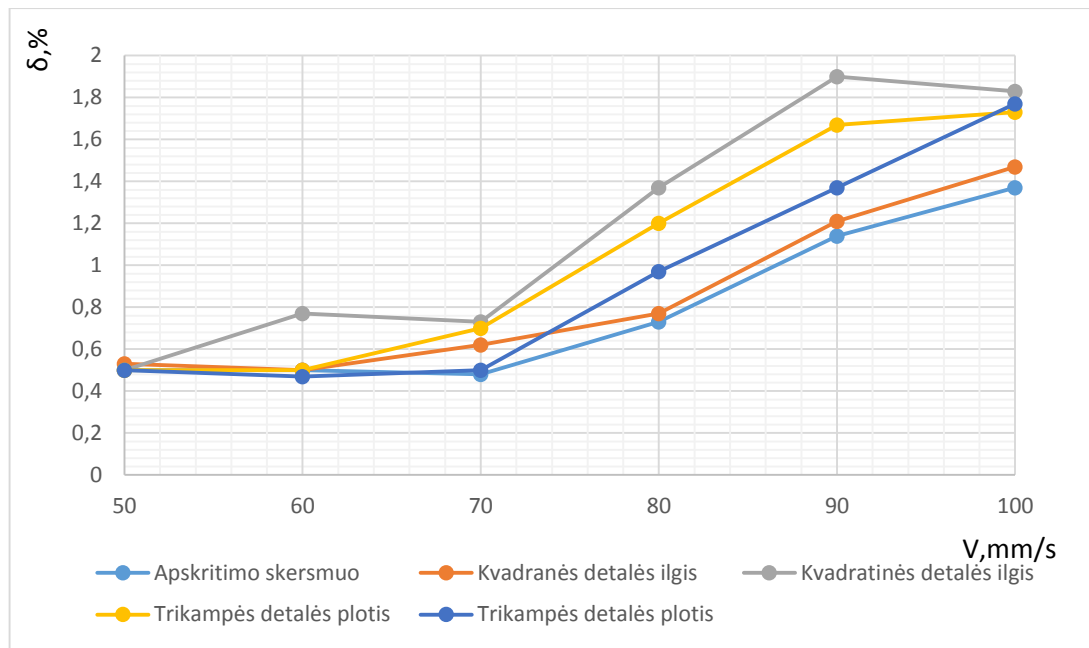
3.5 lentelė. Išorinių kvadratinės detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Ilgio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %	Pločio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	0,16	0,53	0,15	0,50
2	60	0,15	0,50	0,15	0,50
3	70	0,25	0,82	0,22	0,73
4	80	0,36	1,20	0,41	1,37
5	90	0,55	1,83	0,43	1,43
6	100	0,63	2,10	0,47	1,57

3.6 lentelė. Išorinių trikampės detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Ilgio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %	Pločio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	0,13	0,50	0,15	0,50
2	60	0,13	0,50	0,14	0,47
3	70	0,17	0,63	0,21	0,70
4	80	0,35	1,33	0,35	1,17
5	90	0,42	1,57	0,46	1,53
6	100	0,47	1,77	0,52	1,73

Spausdinamų detalių nuokrypių priklausomybė nuo spausdinimo greičio matoma 3.6 paveiksle. Joje matome, kad didžiausi nuokrypiai yra kvadratinės ir trikampės detalės paviršiuose, taip atsitinka dėl staigaus judėjimo krypties pokyčio spausdinant šių detalių kampus. Taipogi pastebėta, jog tiek kvadratinės detalės, tiek trikampės detalės ilgių nuokrypiai yra didesni, nei pločio. Spėjama, jog taip atsitinka dėl sunkesnės y ašies kariatės, kas nulemia didesnių inercinių jėgų atsiradimą.



3.6 pav. Bandinių matmenų nuokrypių priklausomybė nuo spausdinimo greičio

3.3 Matavimo rezultatų apibendrinimas

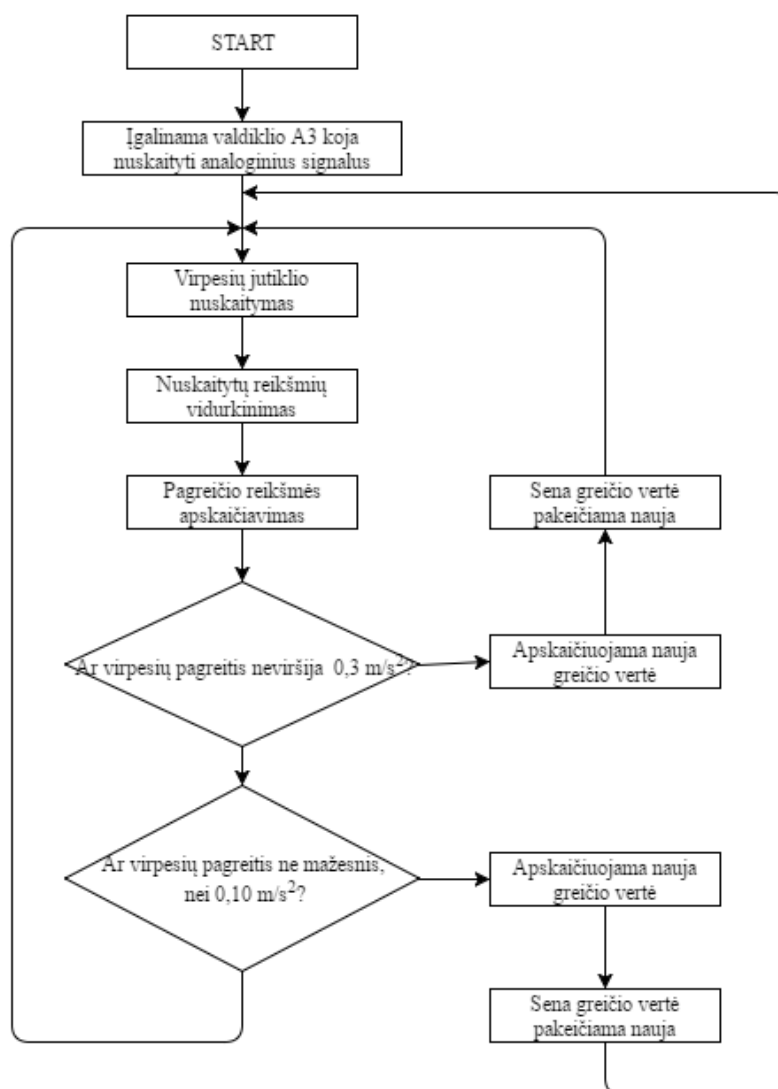
Remiantis virpesių greičio ir dažnio matavimo rezultatais, galima teigti, jog:

- Gautas spausdintuvo korpuso rezonansinis dažnis, kai virpesių amplitudė didžiausia yra 51 Hz;
- Kompiuterinio modelio ir praktinio tyrimo rezonansinių dažnių neatitikimas galimai atsirado dėl: modelio supaprastinimo, matavimo netikslumų;
- Ribinis spausdintuvo x,y ašių greitis yra 90 mm/s;
- Didesnis, nei 70mm/s x,y ašių greitis ženkliai suprastina spausdinamų detalių kokybę;
- Y ašies pavaros sukeltas virpesių greitis yra didesnis nei x ašies, nes y ašies judančių komponentų masė yra didesnė nei x ašies;

4.VIRPESIŲ SLOPINIMO ALGORITMAI

Pasirinkti du virpesių slopinimo metodai realizavimui spausdintuve: greičių reguliavimas ir pagreičių reguliavimas.

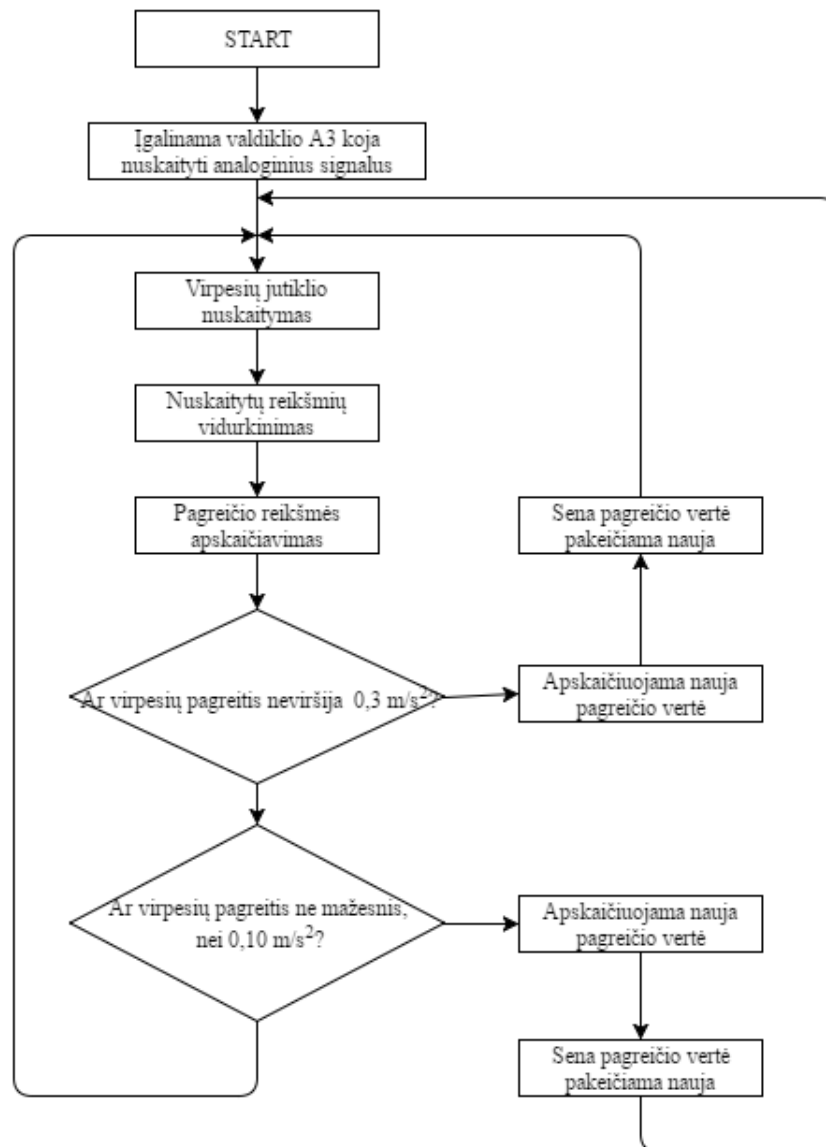
Pirmasis metodas veikia matuodamas 3D spausdintuvo korpuso vidutinį virpesių pagreitį ir lygindamas gautas reikšmes su įrašytomis leidžiamomis vertėmis (remiantis praktinių matavimų rezultatais šios vertės yra intervale tarp $0,1 \text{ m/s}^2$ ir $0,3 \text{ m/s}^2$), jei išmatuota vertė viršija $0,3 \text{ m/s}^2$ tada ašių linijiniai greičiai perskaičiuojami ir nustatomas paskaičiuotas greitis ašių pavaroms. Jei išmatuota virpesių vidutinė pagreičio vertė mažesnė, nei $0,1 \text{ m/s}^2$, tada perskaičiuojamas naujas didesnis greitis, kuris nustatomas kaip „naujas“ spausdintuvo ašių greitis. Programos struktūrogra pateikta 4.1 paveiksle.



4.1 pav. Greičių valdymo algoritmo struktūrogra

Antrasis metodas (žr. 4.2 pav.) veikia matuodamas 3D spausdintuvo korpuso virpesių pagreitį ir lygindamas išmatuotas vertes su įrašytomis leidžiamomis vertėmis (remiantis praktinių matavimų rezultatais šios vertės yra intervale tarp $0,1 \text{ m/s}^2$ ir $0,3 \text{ m/s}^2$), jei išmatuota vertė viršija

0,3 m/s² tada ašių pagreičiai perskaičiuojami ir nustatomas paskaičiuotas pagreitis ašių pavaroms. Jei išmatuota vidutinė virpesių pagreičio vertė yra mažesnė, nei 0,1 mm/s, tada perskaičiuojamas naujas didesnis pagreitis, kuris nustatomas kaip „naujas“ spausdintuvo x,y ašių pagreitis.



4.2 pav. Pagreičių valdymo algoritmo struktūrograma

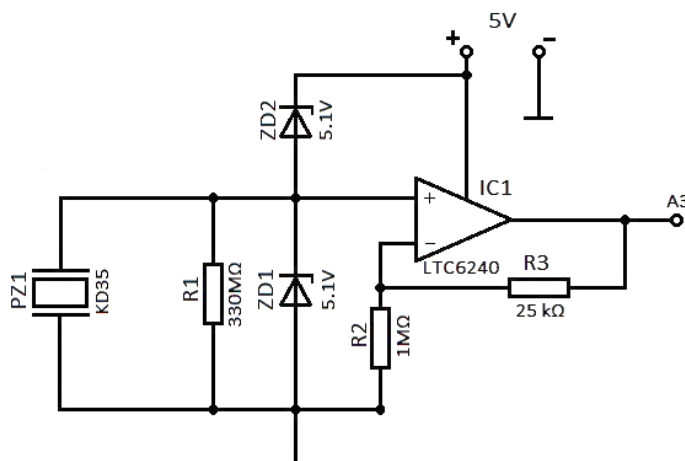
Realizuotų spausdintuve greičių ir pagreičių valdymo algoritmų programų kodai pateikti prieduose: Nr.1 ir Nr.2.

5.SPAUSDINTUVO KORPUSO VIRPESIŲ TYRIMAS NAUDOJANT VIRPESIŲ SLOPINIMO ALGORITMUS

5.1. Spausdintuvo korpuso virpesių matavimas

Spausdintuvo korpuso virpesiai matuojami naudojant pjezo keraminį jutiklį MMF KD35 (techninės charakteristikos pateiktos 3 priede), kuris prijungtas prie stiprintuvo, kurio schema pateikta 5.1 paveiksle, o šis prijungtas prie spausdintuvo valdiklio analoginio į skaitmeninį signalą keitiklio įėjimo.

Matavimo sistema veikia mechaniniams virpesiams žadinant pjezo efektą virpesių jutiklyje, dėl to susidaro elektros krūvis, kuris kinta tokiu pat dažniu, kaip ir mechaniniai virpesiai, be to krūvio dydis (amplitudė) tiesiogiai priklauso nuo virpesių pagreičio, taip jutiklio išėjime galime stebėti elektrinį signalą, kurio dažnis atitinka mechaninių virpesių dažnį, o amplitudė atitinka virpesių pagreitį. Tam, kad gautas elektrinis signalas būtų teisingai nuskaitomas spausdintuvo valdiklio, jo amplitudė turi būti pakeičiama į tinkama valdiklio įėjimo įtampą, valdiklio analoginio įėjimo signalo įtampa yra 0-5V ruože, o norint gauti neiškraipytą dažninę charakteristiką žemuose dažniuose, jutikliui reikalinga didelė įėjimo varža. Siekiant suderinti jutiklio išėjimo įtampą ir varžą su valdiklio įėjimo įtampa ir varža naudojamas operacinis stiprintuvas LTC6240 (4 priedas) [17], kuris veikia kaip įtampos kartotuvas, schema pateikta 5.1 paveiksle.



5.1 pav. Signalų stiprintuvas

5.1 paveiksle matomoje schemoje rezistoriumi R1 suderinama kartotuvo įėjimo varža, o rezistoriais R2 ir R3 nustatomas stiprinimas [18]. Papildomai schemoje naudojami stabilizatoriai ZD1 ir ZD2, kurie naudojami apsaugoti schemą nuo įtampos viršijimo įėjime, leistina maksimali įtampa įėjime 5V.

5.2 Spausdintuvo virpesių mažinimo reguliuojant pastūmų greitį algoritmo bandymas

Greičio valdymo algoritmo bandymo metu spausdintuvo programinė įranga papildoma greičio valdymo algoritmu (1 priedas), kuris naudojant pjezo akcelerometrą matuoja korpuso virpesių pagreitį ir perskaičiuoja nauja x, y ašių greitį spausdinimui. Bandymų rezultatai pateikti 5.1, 5.2 ir 5.3 lentelėse.

5.1 lentelė. Virpesių greičiai, naudojant greičio valdymo algoritmą didžiausių virpesių taške

Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	1
Sukamųjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,6	0,7	0,6	0,8	0,9
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,5	0,6	0,7	0,9	0,9
Spausdinimo laikas, min	13:46	12:43	11:33	11:06	10:47	10:38

5.2 lentelėje pateikti virpesių matavimo rezultatai matuojant virpesių greitį x ašies kryptimi. 5.3 lentelėje pateikti virpesių matavimo rezultatai matuojant virpesių amplitudinį greitį y ašies kryptimi. Lyginant gautus duomenis, aiškiai matome, jog kaip ir nereguliuojamo x,y ašių greičio atveju, dėl sunkesnių, nei x ašies, y ašies judančių komponentų atsiranda didesnės inercinės jėgos, dėl kurių virpesių greitis y ašies kryptimi yra didesnis.

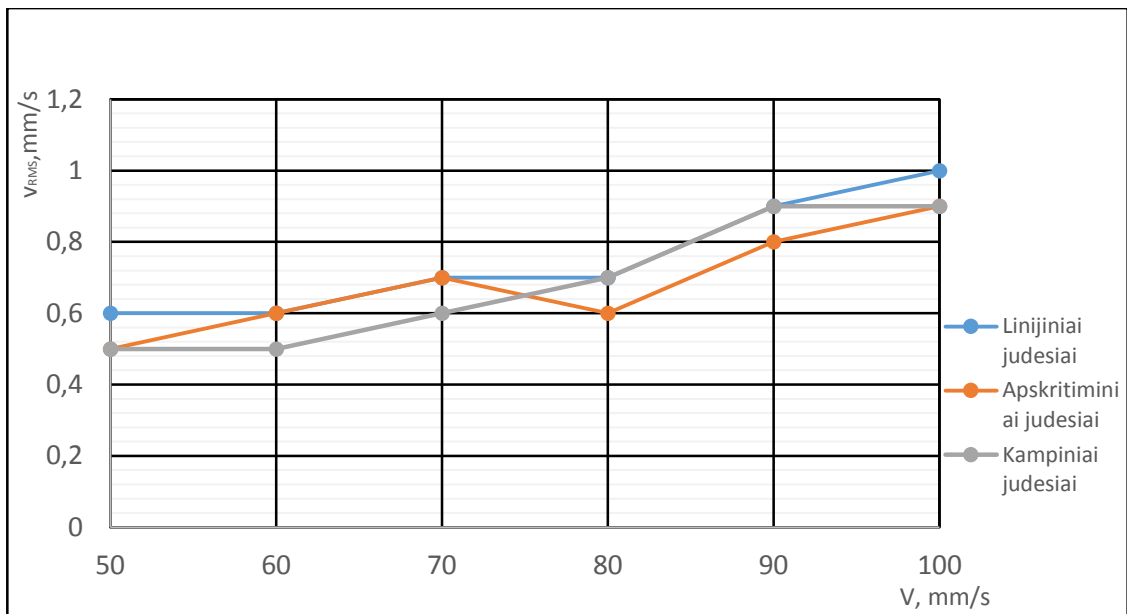
5.2 lentelė. Virpesių greičiai, naudojant greičio valdymo algoritmą x ašies kryptimi

Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9
Sukamųjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8
Spausdinimo laikas, min	13:46	12:43	11:33	11:06	10:47	10:38

5.3 lentelė. Virpesių greičiai, naudojant greičio valdymo algoritmą y ašies kryptimi

Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,6	0,6	0,8	0,9	1
Sukamųjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,6	0,7	0,8	0,7	0,9
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,5	0,7	0,8	0,8	1
Spausdinimo laikas, min	13:46	12:43	11:33	11:06	10:47	10:38

Remiantis virpesių greičio matavimo rezultatų lentele 5.1, sudarytas grafikas esant skirtingoms trajektorijoms pateiktas 5.2 paveiksle. Jame matoma, jog korpuso virpesių greičiai mažai skiriasi lyginant su virpesių greičiais išmatuotais nenaudojant x,y ašių padavimo greičių valdymo algoritmo. Ženklus virpesių padidėjimas matomas tik esant 50-60 mm/s spausdinimo greičiams, taip atsitinka dėl greičio valdymo algoritmo, kuris didina x,y ašių greitį, kadangi virpesių greitis buvo mažesnis, nei maksimalus leistinas 0,7 mm/s. Toks padavimo greičių padidinimas sutrumpino spausdinimo laikus.



5.2 pav. Virpesių greičiai esant skirtingoms judėjimo trajektorijoms naudojant x,y ašių greičio valdymo algoritmą

Atspausdinus detales, naudojant spausdintuvo greičių valdymo algoritmą visais pasirinktais greičiais, jos išmatuojamos ir detalių išorinių matmenų nuokrypiai surašomi į lenteles 5.4, 5.5, 5.6. Taipogi apskaičiuojamos nuokrypio procentinės išraiškos. Remiantis gautomis detalių išorinių nuokrypių reikšmėmis galima teigti, jog detalių spausdinimo kokybė pagerėjo lyginant su detalėmis spausdintomis nenaudojant greičio valdymo algoritmo. Detalių kokybė ženkliai suprastėja viršijus 70mm/s padavimo greitį, ties 70mm/s detalių kokybė suprastėjo ir nenaudojant virpesių slopinimo algoritmų.

5.4 lentelė. Išorinių apvalios detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Skersmuo, mm	Nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	30	0,16	0,53
2	60		0,23	0,77
3	70		0,27	0,90
4	80		0,40	1,33
5	90		0,52	1,73
6	100		0,53	1,75

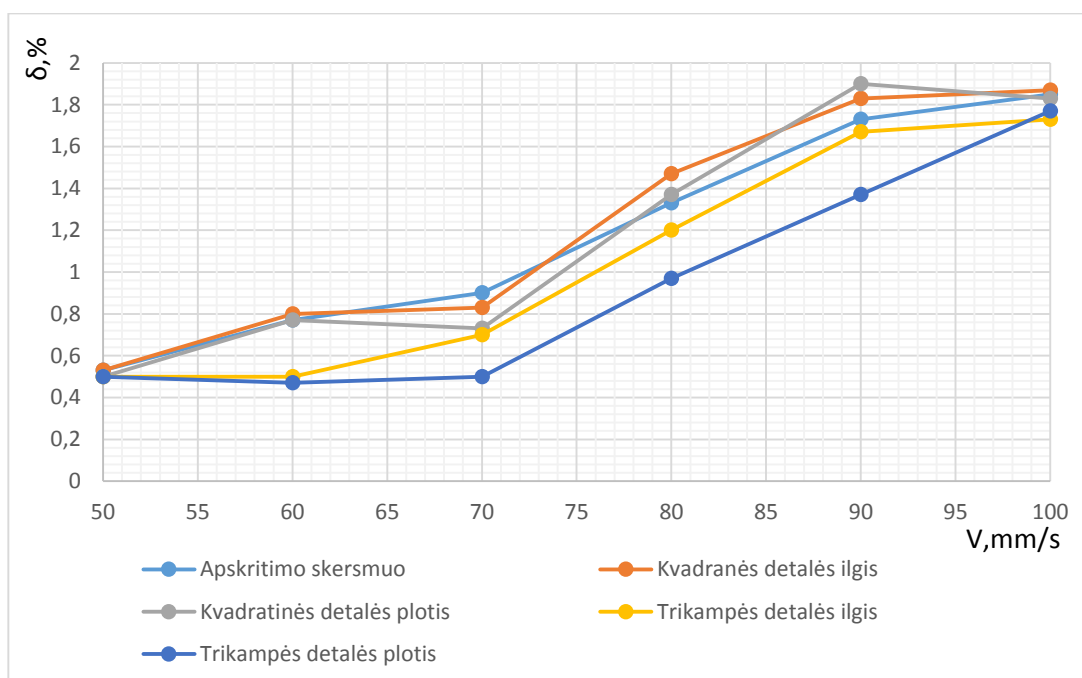
5.5 lentelė. Išorinių kvadratinės detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Ilgio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %	Pločio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	0,16	0,53	0,15	0,50
2	60	0,24	0,80	0,23	0,77
3	70	0,25	0,83	0,22	0,73
4	80	0,44	1,47	0,41	1,37
5	90	0,55	1,83	0,50	1,67
6	100	0,54	1,80	0,53	1,75

5.6 lentelė. Išorinių trikampės detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Ilgio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %	Pločio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	0,13	0,50	0,15	0,50
2	60	0,13	0,50	0,14	0,47
3	70	0,19	0,70	0,15	0,50
4	80	0,32	1,20	0,29	0,97
5	90	0,44	1,67	0,41	1,37
6	100	0,46	1,73	0,53	1,77

Bandinių nuokrypių priklausomybė nuo spausdinimo greičio matoma 5.3 paveiksle. Joje matome, kad didžiausi nuokrypiai yra kvadratinio bandinio paviršiuose, tą patį matome ir kai nenaudojami virpesių slopinimo algoritmai, taip atsitinka dėl staigaus judėjimo krypties pokyčio spausdinant šių detalių kampus. Taipogi pastebėta, kad šiuo atveju trikampės detalės matmenų nuokrypiai mažesni, nei nenaudojant virpesių slopinimo algoritmų.



5.3 pav. Bandinių nuokrypių priklausomybė nuo spausdinimo greičio, naudojant greičių valdymo algoritmą

5.3 Spausdintuvo virpesių mažinimo reguliuojant pastūmų pagreitį algoritmo bandymas

Pagreičio valdymo algoritmo bandymo metu spausdintuvo programinė įranga papildoma pagreičio valdymo algoritmu (2 priedas), kuris naudojant pjezo akcelerometrą matuoja korpuso virpesių pagreitį ir perskaičiuoja nauja x, y ašių greitį spausdinimui. Bandymų rezultatai pateikti 5.7, 5.8 ir 5.9 lentelėse.

5.7 lentelė. Virpesių greičiai, naudojant pagreičių valdymo algoritmą didžiausių virpesių taške

Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100	110
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8
Sukamųjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7
Spausdinimo laikas, min	13:51	12:51	11:49	11:03	10:39	10:34	10:31

5.8 lentelėje pateikti virpesių matavimo rezultatai matuojant virpesių greitį x ašies kryptimi. 5.9 lentelėje pateikti virpesių matavimo rezultatai matuojant virpesių greitį y ašies kryptimi. Lyginant gautus duomenis, aiškiai matome, jog kaip ir nereguliuojamo x,y ašių greičio atveju, dėl sunkesnių, nei x ašies, y ašies judančių komponentų atsiranda didesnės inercinės jėgos, dėl kurių virpesių greitis y ašies kryptimi yra didesnis, bet lyginant su spausdintuvo programine įranga, kuri nekoreguoja x,y ašių pagreičių (3.1, 3.2, 3.3 lentelės), virpesių greitis sumažėja ir net esant 110 mm/s greičiui spausdintuvo korpuso virpesių greitis yra mažesnis, nei spausdinant maksimaliu 100 mm/s greičiu nenaudojant virpesių slopinimo algoritmą .

5.8 lentelė. Virpesių greičiai, naudojant pagreičių valdymo algoritmą x ašies kryptimi

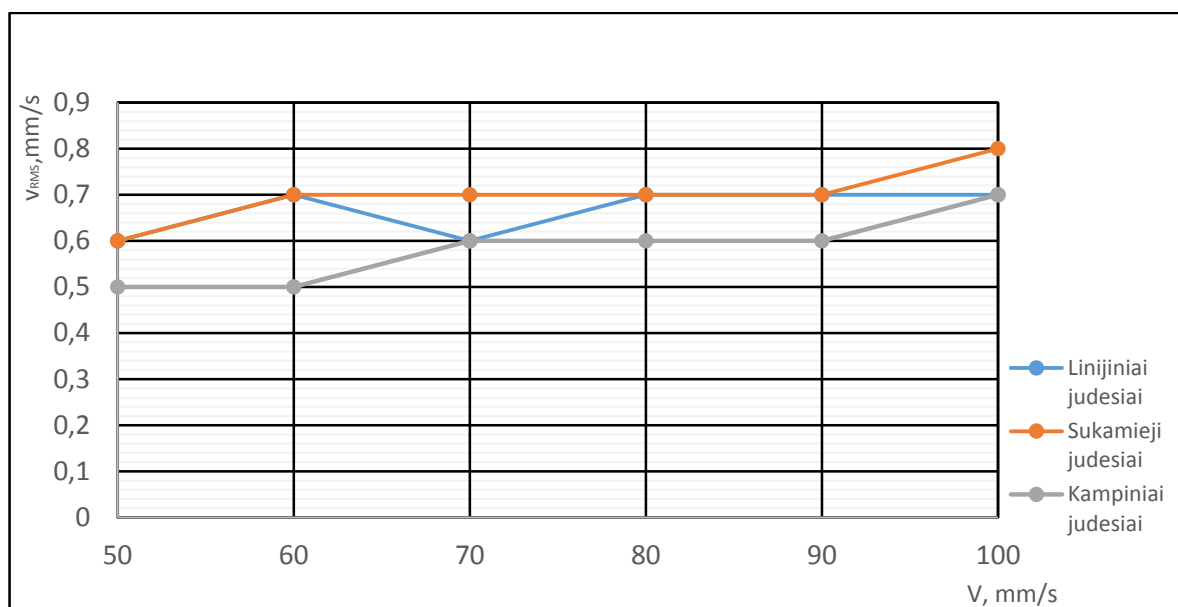
Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100	110
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8
Sukamųjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7
Spausdinimo laikas, min	13:51	12:51	11:49	11:03	10:39	10:34	10:31

5.9 lentelė. Virpesių greičiai, naudojant pagreičių valdymo algoritmą y ašies kryptimi

Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100	110
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8
Sukamųjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
Spausdinimo laikas, min	13:51	12:51	11:49	11:03	10:39	10:34	10:31

Remiantis virpesių greičio matavimo rezultatų lentele 5.7 sudarytas grafikas esant skirtingoms trajektorijoms pateiktas 5.4 paveiksle. Jame matoma, jog korpuso virpesių greičiai yra mažesni lyginant su virpesių greičiais išmatuotais nenaudojant x,y ašių padavimo pagreičių valdymo algoritmo. Ženklus virpesių greičių sumažėjimas, lyginant su virpesių greičiais nenaudojant virpesių slopinimo algoritmą, pastebimas esant 80-110 mm/s spausdinimo greičiams,

tai reiškia, jog algoritmas veikia ir pasiekus neleistinus spausdintuvo korpuso virpesių greičius, mažina x,y ašių padavimo pagreičius. Toks padavimo pagreičių valdymas sutrumpino spausdinimo laikus ir leido išlaikyti leistinus virpesių greičius ($\leq 0,7\text{mm/s}$).



5.4 pav. Virpesių greičiai esant skirtingoms judėjimo trajektorijoms naudojant x,y ašių pagreičio valdymo algoritmą

Atspausdinus detales, naudojant spausdintuvo greičių valdymo algoritmą visais pasirinktais greičiais, jos išmatuojamos ir detalių išorinių matmenų nuokrypiai surašomi į lenteles 5.10, 5.11, 5.12. Taipogi apskaičiuojamos nuokrypio procentinės išraiškos. Remiantis gautomis detalių išorinių nuokrypių reikšmėmis galima teigti, jog detalių spausdinimo kokybė pagerėjo lyginant su detalėmis spausdintomis nenaudojant pagreičio valdymo algoritmo. Detalių kokybė ženkliai suprastėja viršijus 90mm/s padavimo greitį, tuo tarpu nenaudojant pagreičių valdymo algoritmo detalių kokybė ženkliai suprastėja jau esant 70mm/s.

5.10 lentelė. Išorinių apvalios detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Skersmuo, mm	Nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	30	0,14	0,47
2	60		0,15	0,5
3	70		0,16	0,52
4	80		0,20	0,66
5	90		0,26	0,85
6	100		0,36	1,2
7	110		0,46	1,53

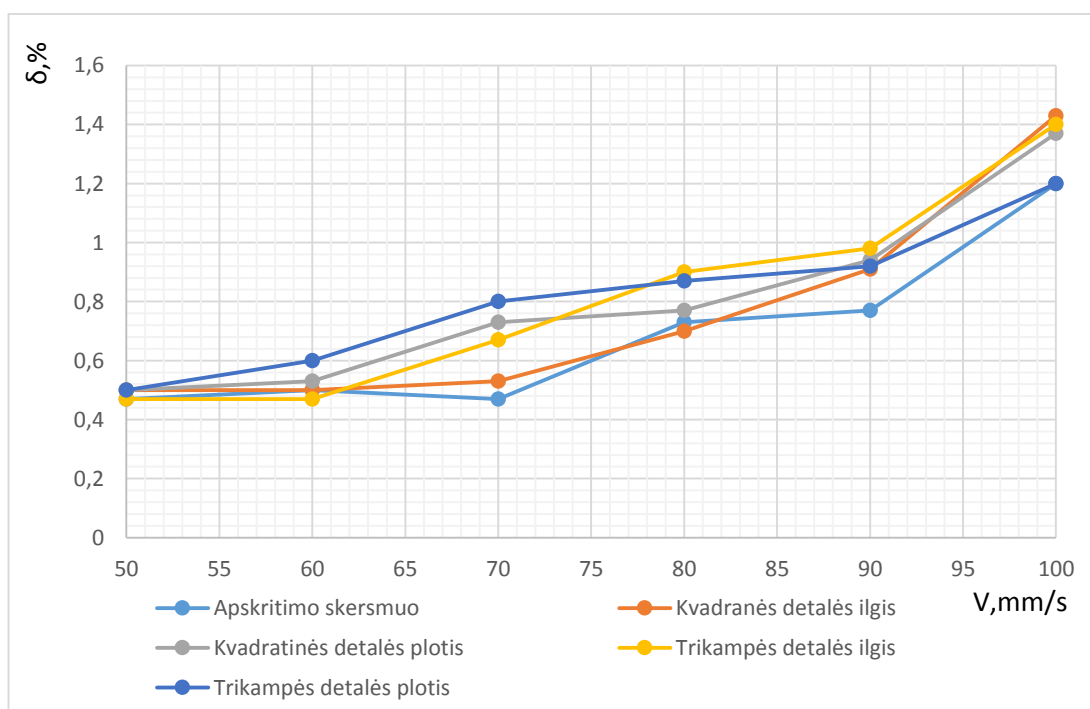
5.11 lentelė. Išorinių kvadratinės detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Ilgio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %	Pločio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	0,15	0,50	0,15	0,50
2	60	0,15	0,50	0,16	0,53
3	70	0,16	0,53	0,22	0,73
4	80	0,21	0,70	0,23	0,77
5	90	0,27	0,91	0,28	0,94
6	100	0,43	1,43	0,41	1,37
7	110	0,49	1,63	0,52	1,73

5.12 lentelė. Išorinių trikampės detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Ilgio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %	Pločio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	0,12	0,47	0,15	0,50
2	60	0,12	0,47	0,18	0,60
3	70	0,18	0,67	0,24	0,80
4	80	0,24	0,90	0,26	0,87
5	90	0,27	0,98	0,28	0,92
6	100	0,37	1,40	0,36	1,21
7	110	0,44	1,67	0,53	1,77

Bandinių nuokrypių priklausomybė nuo spausdinimo greičio matoma 5.5 paveiksle. Joje matome, kad didžiausi nuokrypiai yra kvadratinės ir trikampės detalių paviršiuose, kaip ir atveju kai nenaudojami virpesių slopinimo algoritmai. Taipogi pastebėta, kad šiuo atveju tiek trikampės, tiek kvadratinės detalių ilgių nuokrypiai yra didesni nei pločio. Tą patį matome ir nenaudojant virpesių slopinimo algoritmu, kaip ir minėta taip atsitinka dėl sunkesnių y ašies komponentų.



5.5 pav. Bandinių nuokrypių priklausomybė nuo spausdinimo greičio, naudojant pagreičių valdymo algoritmą

5.4 Spausdintuvo virpesių mažinimo bandymas naudojant planavimo į priekį algoritmą

„Planavimo į priekį“ algoritmas (angl. Plan-ahead) yra atviro kodo programa naudojama „RepRap“ ir „Ultimaker“ spausdintuvuose [19]. Šis algoritmas sudaro spausdintuvo judesių „planą“ į priekį tam tikrą judesių skaičių aprašant judesių koordinates, judesių greičius ir pagreičius. Šis algoritmas spausdintuvo ašių greičiams ir pagreičiams valdyti naudoja S trajektorijas, taipogi optimizuoja judėjimo trajektorijas.

Planavimo į priekį valdymo algoritmo bandymo metu spausdintuvo programinė įranga papildoma planavimo į priekį valdymo algoritmu ir atliekami tokie pat matavimai kaip greičių ar pagreičių valdymo algoritmų atveju. Bandymų rezultatai pateikti 5.13, 5.14 ir 5.15 lentelėse.

5.13 lentelė. Virpesių greičiai, naudojant planavimo į priekį algoritmą didžiausių virpesių taške

Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100	110
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	1
Sukamųjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,3	0,5	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1
Spausdinimo laikas, min	14:43	13:11	12:03	11:23	10:59	10:54	10:51

5.14 lentelėje pateikti virpesių matavimo rezultatai matuojant virpesių greitį x ašies kryptimi. 5.15 lentelėje pateikti virpesių matavimo rezultatai matuojant virpesių greitį y ašies kryptimi. Lyginant gautus duomenis, aiškiai matome, jog kaip ir prieš tai bandytų algoritmų atvejų dėl sunkesnių, nei x ašies, y ašies judančių komponentų atsiranda didesnės inercinės jėgos, dėl kurių virpesių greitis y ašies kryptimi yra didesnis. Virpesių greitis visam spausdinimo greičių ruože, yra mažesnis, nei naudojant, jokio papildomo greičių ar pagreičių valdymo algoritmo ar greičių valdymo algoritmo.

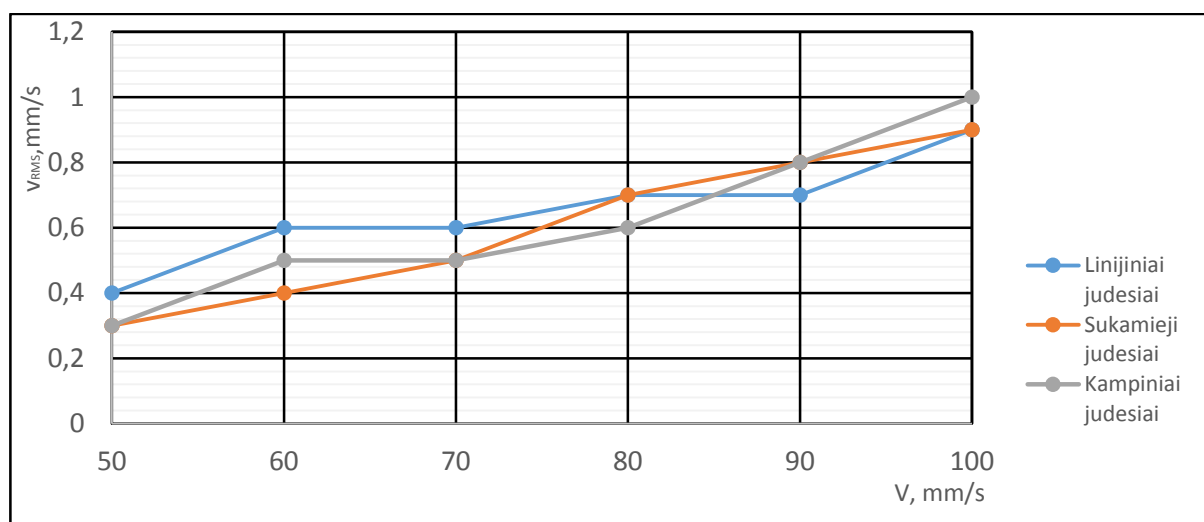
5.14 lentelė. Virpesių greičiai, naudojant planavimo į priekį algoritmą x ašies kryptimi

Spausdinimo greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100	110
Linijinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Sukamųjų judesių virpesių greitis, mm/s	0,5	0,5	0,7	0,6	0,7	0,8	0,9
Kampinių judesių virpesių greitis, mm/s	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9
Spausdinimo laikas, min	14:43	13:11	12:03	11:23	10:59	10:54	10:51

5.15 lentelė. Virpesių greičiai, naudojant planavimo į priekį algoritmą y ašies kryptimi

Greitis, mm/s	50	60	70	80	90	100	110
Linijinių judesių virpesių amplitudė, m/s	0,4	0,6	0,7	0,8	0,7	1,0	1,1
Apskritiminių judesių virpesių amplitudė, m/s	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9
Kampinių judesių virpesių amplitudė, m/s	0,4	0,6	0,6	0,7	0,8	1,0	1,0
Spausdinimo laikas	14:43	13:11	12:03	11:23	10:59	10:54	10:51

Remiantis virpesių greičio matavimo rezultatų lentele 5.13 sudarytas grafikas esant skirtingoms trajektorijoms pateiktas 5.6 paveiksle. Jame matoma, jog korpuso virpesių greičiai yra mažesni lyginant su virpesių greičiais išmatuotais nenaudojant x,y ašių padavimo pagreičių valdymo algoritmo, esant spausdinimo greičiams nuo 50mm/s iki 90mm/s. Tiesa naudojant šį algoritmą ir nenaudojant jokio virpesių mažinimo algoritmo spausdinimo laikai mažai skiriasi.



5.6 pav. Virpesių greičiai esant skirtingoms judėjimo trajektorijoms naudojant planavimo į priekį algoritmą

Atspausdinus detales, naudojant spausdintuvo greičių valdymo algoritmą visais pasirinktais greičiais, jos išmatuojamos ir detalių išorinių matmenų nuokrypiai surašomi į lenteles 5.16, 5.17, 5.18. Taipogi apskaičiuojamos nuokrypio procentinės išraiškos.

5.17 lentelė. Išorinių apvalios detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Skersmuo, mm	Nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	30	0,16	0,51
2	60		0,14	0,48
3	70		0,14	0,48
4	80		0,22	0,73
5	90		0,26	0,86
6	100		0,37	1,22
7	110		0,51	1,71

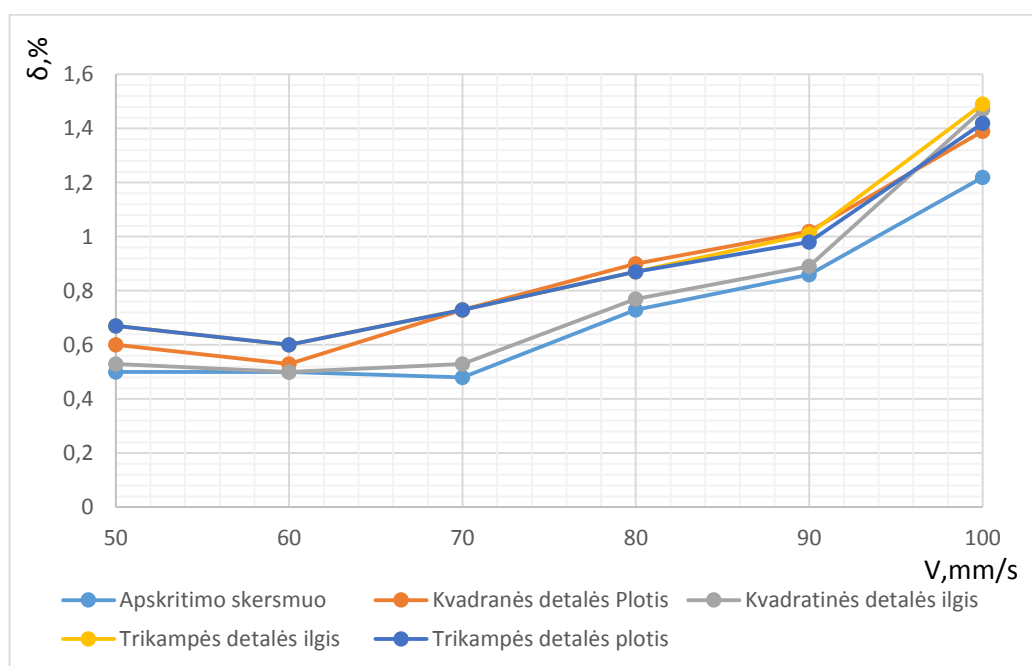
5.18 lentelė. Išorinių kvadratinės detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Ilgio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %	Pločio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	0,16	0,53	0,18	0,6
2	60	0,15	0,50	0,16	0,53
3	70	0,16	0,53	0,22	0,73
4	80	0,23	0,77	0,27	0,9
5	90	0,27	0,89	0,31	1,02
6	100	0,44	1,47	0,43	1,39
7	110	0,48	1,60	0,44	1,48

5.19 lentelė. Išorinių trikampės detalės matmenų nuokrypiai esant skirtingiems greičiams

Nr.	Spausdinimo greitis, mm/s	Ilgio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %	Pločio nuokrypis, mm	Nuokrypis, %
1	50	0,18	0,67	0,20	0,67
2	60	0,16	0,6	0,18	0,6
3	70	0,19	0,73	0,22	0,73
4	80	0,23	0,87	0,26	0,87
5	90	0,27	1,01	0,3	0,98
6	100	0,39	1,49	0,43	1,42
7	110	0,40	1,50	0,45	1,49

Remiantis gautomis detalių išorinių nuokrypių reikšmėmis galima teigti, jog detalių spausdinimo kokybę pagerėjo lyginant su detalėmis spausdintomis nenaudojant planavimo į priekį algoritmo. Detalių kokybę ženkliai suprastėja viršijus 90mm/s padavimo greitį, tuo tarpu nenaudojant planavimo į priekį valdymo algoritmo detalių kokybę ženkliai suprastėja jau esant 70mm/s.



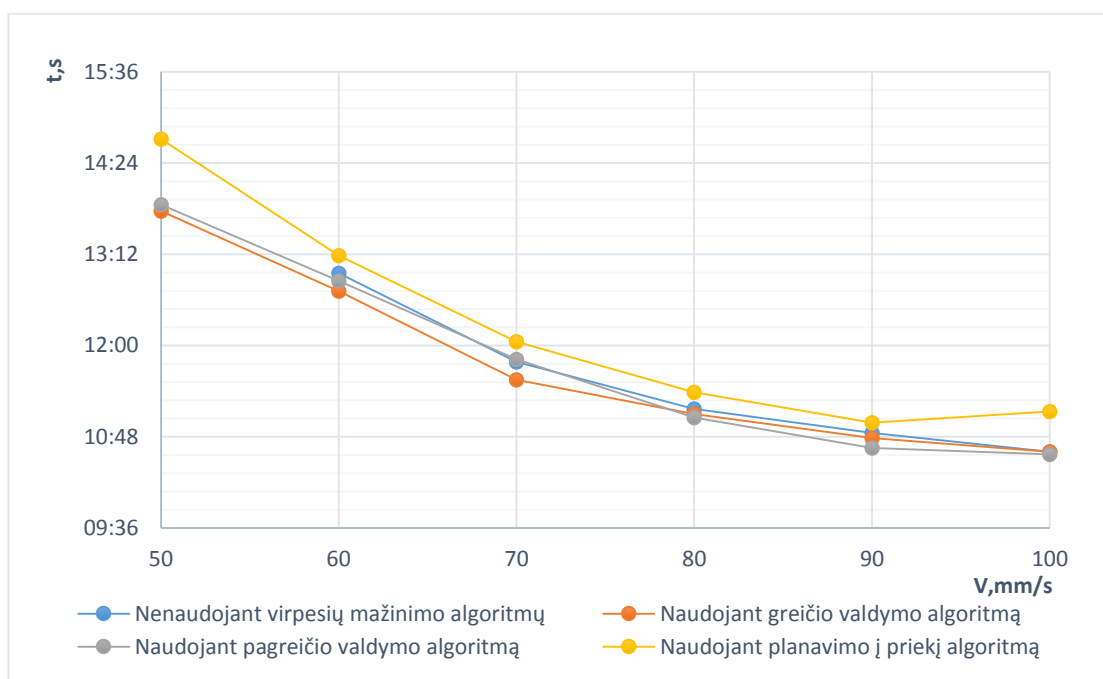
5.7 pav. Bandinių nuokrypių priklausomybė nuo spausdinimo greičio, naudojant planavimo į priekį algoritmą

Bandinių nuokrypių priklausomybė nuo spausdinimo greičio matoma 5.7 paveiksle. Joje matome, kad didžiausi nuokrypiai yra kvadratinės ir trikampės detalių paviršiuose, kaip ir atveju kai nenaudojami virpesių slopinimo algoritmai. Taipogi pastebėta, kad šiuo atveju tiek trikampės tiek, tiek kvadratinės detalių ilgių nuokrypiai yra didesni, nei pločio. Tą patį matome ir nenaudojant virpesių slopinimo algoritmų.

5.5 Spausdinimo greičių ir spausdinių matmenų nuokrypių palyginimas

Remiantis atliktais spausdintuvo virpesių slopinimo sistemų tyrimų duomenimis, palyginami tarpusavyje visi virpesių slopinimo algoritmai ir sistema nenaudojant jokio virpesių slopinimo algoritmo.

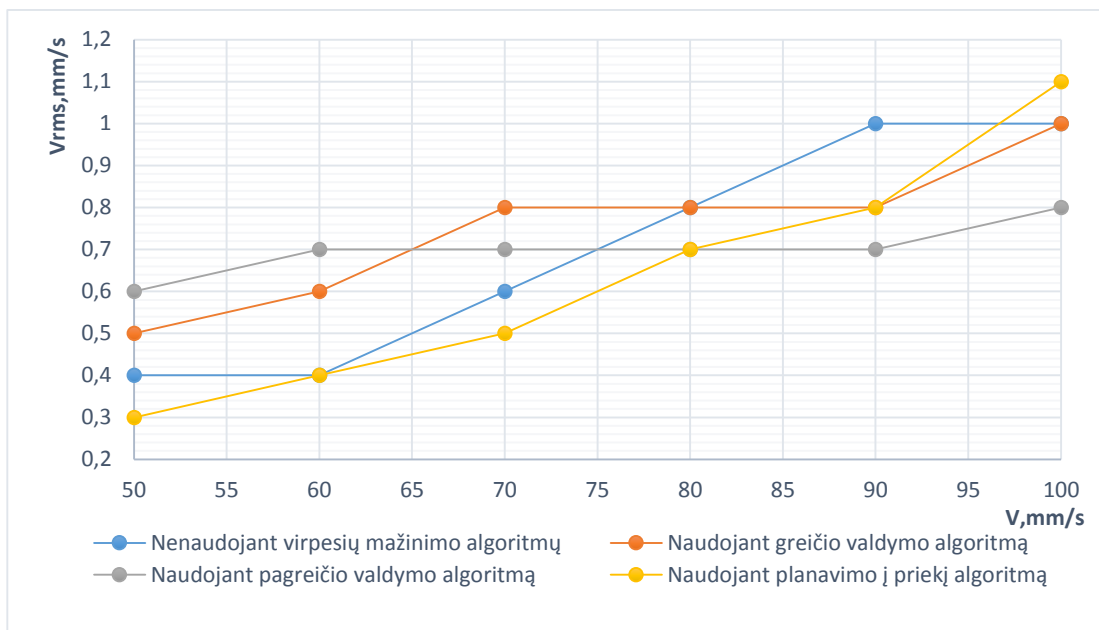
Palyginus spausdinimo laikus (žr. 5.8 pav.), aiškiai matoma, jog reguliuojant x, y pastūmų pagreitį spausdinimo laikas yra trumpiausias 10min 39s ir pasiekiamas didžiausias spausdinimo našumas išlaikant pakankamai gerą spausdinių kokybę. Nuo pagreičio valdymo algoritmo mažai atsilieka planavimo į priekį algoritmas, jo spausdinimo laikas, išlaikant pakankamai gerą spausdinių kokybę yra 10min 49s. Naudojant greičių valdymo algoritmą spausdinimo laikas yra 11min 36s kas mažai skiriasi nuo spausdinimo laiko (11min 47s) nenaudojant virpesių slopinimo algoritmų.



5.8 pav. Spausdinimo laikų palyginimo grafikas naudojant ir nenaudojant virpesių slopinimo algoritmus

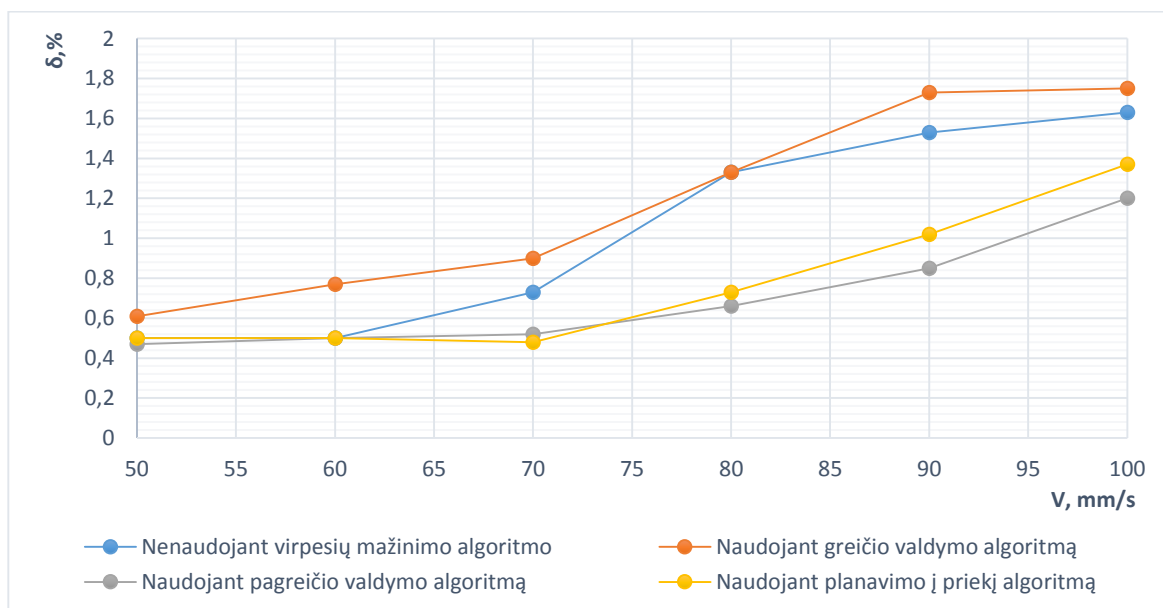
Palyginus didžiausiu spausdintuvo virpesių greičius, kurie pateikti 5.9 paveiksle esančiame grafike, aiškiai matoma, jog naudojant x,y pastūmų pagreičio valdymą arba planavimo į priekį algoritmą spausdintuvo korpuso virpesių greitis esant 90 mm/s spausdinimo greičiui sumažėjo 0,2 mm/s lyginant su spausdintuvo virpesiais nenaudojant virpesių slopinimo. Nors esant

90 mm/s spausdinimo greičiui ir greičio valdymo algoritmas sumažino virpesių greitį, bet esant kitiems spausdinimo greičiams virpesius tik padidino.



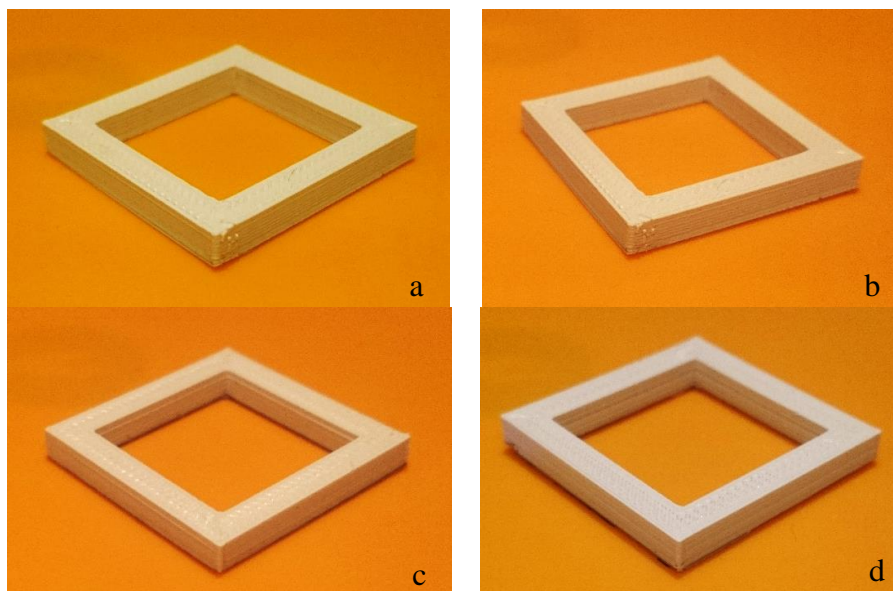
5.9 pav. Virpesių greičių palyginimas naudojant ir nenaudojant virpesių slopinimo algoritmų

Kaip ir tikėtasi esant mažesniems virpesiams detalių kokybė ženkliai pagerėja, mažiausias procentiniai bandinių matmenų nuokrypiai yra naudojant pagreičių valdymo algoritmą. Pakankamai nedideli nuokrypiai esti ir naudojant planavimo į priekį algoritmą. Naudojant greičio valdymo algoritmą, kokybė prie tam tikrų greičių netgi suprastėja lyginant su bandiniais spausdintais naudojant greičio valdymo algoritmą. Nuokrypių palyginimo grafikas pateiktas 5.10 paveiksle.



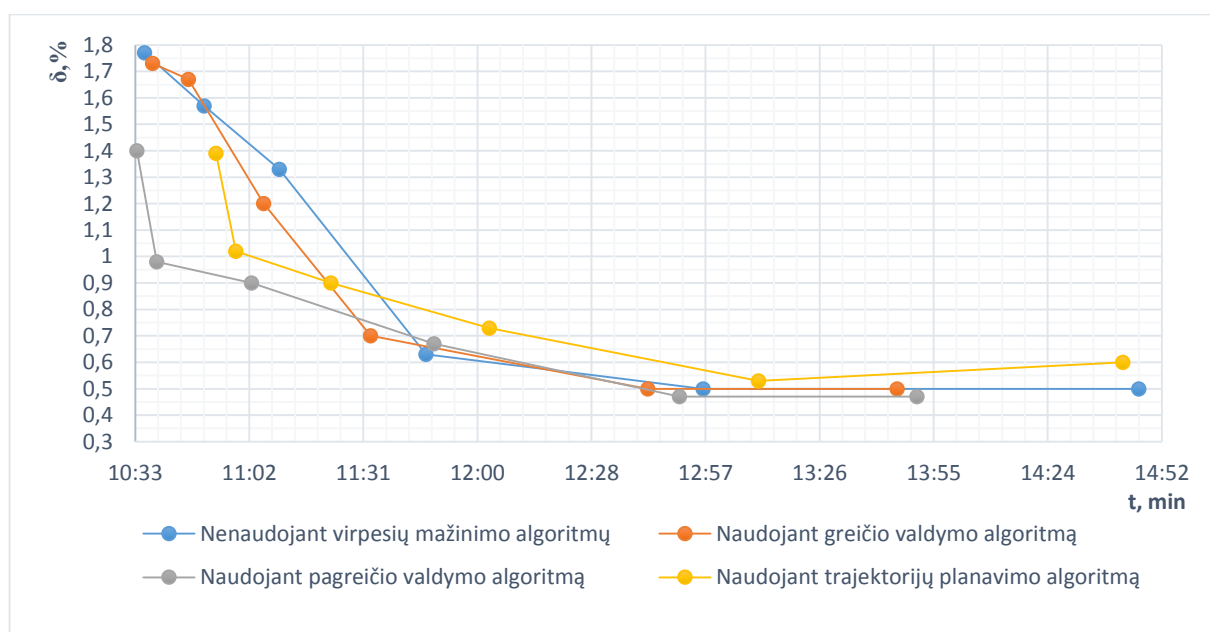
5.10 pav. Apskrito bandinio nuokrypių palyginimo grafikas naudojant ir nenaudojant virpesių slopinimo algoritmų

Detalės taip pat įvertintos vizualiai, 5.11 paveiksle pateiktos kvadratinė bandinių nuotraukos palyginimui. Iš nuotraukų matyti, kad kokybiškiausiai (nėra deformacijų, status kampai, lygūs paviršiai) atspausdinti bandiniai naudojant pagreičio valdymo algoritmą, mažai nusileidžia ir naudojant planavimo į priekį algoritmą atspausdinta detalė.



5.11 pav. Vizualus kvadratinių detalių kokybės palyginimas spausdinant 90mm/s greičiu. (a- nenaudojant virpesių slopinimo algoritmą, b-naudojant greičių valdymą, c-naudojant pagreičių valdymą, d-naudojant planavimo į priekį algoritmą)

5.12 paveiksle pateiktas grafikas kuriame pateikta bandinių kokybės priklausomybė nuo spausdinimo laiko, iš kurios kaip ir prieš tai matoma, jog geriausius rezultatus parodė pagreičio valdymo algoritmas. Tuo tarpu greičio valdymo algoritmas turėjo palyginus labai mažą įtaką spausdinimo laikui ar kokybei.



5.12 pav. Bandinių matmenų nuokrypių priklausomybė nuo spausdinimo laiko

Apibendrinti rezultatai pateikti 5.20 lentelėje, kur matomi virpesių mažinimo metodų palyginimai esant didžiausiems spausdinimo greičiams išlaikant pakankamą spausdinimo kokybę.

5.20 lentelė. Spausdinimo charakteristikų palyginimas esant leistiniams bandinių matmenų nuokrypiams

	Nenaudojant virpesių slopinimo algoritmų	Naudojant greičių valdymą	Naudojant pagreičių valdymą	Naudojant planavimo į priekį algoritmą
Didžiausias virpesių greitis, mm/s	0,7	0,7	0,7	0,8
Didžiausias matmenų nuokrypis, %	0,82	0,83	0,98	1,02
Spausdinimo greitis, mm/s	70	70	90	90
Spausdinimo laikas, min	11:47	11:36	10:39	10:59
Spausdinimo našumo padidėjimas*, %	0	1,56	9,6	6,8

*Spausdinimo našumo padidėjimas įvertinamas lyginant naudojamo virpesių algoritmo spausdinimo laiką su spausdinimo laiku nenaudojant jokio virpesių slopinimo algoritmo.

IŠVADOS IR REZULTATAI

1. Atlikus literatūros analizę ir apžvelgus virpesių mažinimo metodus robotikoje ir CNC įrenginiuose parinkti greičių, bei pagreičių reguliavimo virpesiams mažinti metodai.

2. Sumodeliuoti 3D spausdintuvo korpuse atsirandantys virpesiai, modelio adekvatumas ir modeliavimo rezultatai patikrinti praktiškai. Išmatuotas 3D spausdintuvo korpuso rezonansinis dažnis 51 Hz, maksimalus virpesių greitis (V_{rms}), kuriam esant išlaikoma gera spausdinamų detalių kokybė yra 0,7 mm/s.

3. Realizuota grįžtamojo ryšio sistema spausdintuvo korpuso virpesių pagreičiui matuoti. Parašyti programų kodai x,y ašių greičio ir pagreičio valdymui.

4. Atliktas virpesių mažinimo metodų tyrimas. Naudojant x,y ašių pastūmų pagreičio valdymo metodą gautas trumpiausias bandinių spausdinimo laikas, kuris buvo 10min 39s, t.y. 9,6% trumpiau, nei nenaudojant jokio spausdintuvo korpuso virpesių mažinimo algoritmo. Naudojant planavimo į priekį metodą spausdinimo laikas sutrumpėjo 6,8% , o naudojant x,y ašių pastūmų greičio valdymo metodą spausdinimo laikas sutrumpėjo 1,56% lyginant su spausdinimo laiku nenaudojant jokio virpesių slopinimo metodo.

5. Remiantis gautais tyrimo rezultatais galima teigti, kad didžiausias spausdinimo našumas pasiektas naudojant x,y ašių pagreičių valdymo algoritmą. Gerus rezultatus parodė ir planavimo į priekį metodas. Prasčiausius rezultatus parodė ir beveik nesumažino spausdinimo laiko x,y ašių greičio valdymo algoritmas.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. BARZDAITIS Vytautas. *Mechatroninės sistemos: tyrimai ir diagnostika*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. ISBN 9789955202936
2. ALTINTAS Yusuf. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. ISBN 9780521172479
3. ŽILIUKAS Pranas, BARAUSKAS Rimantas. *Mechaniniai virpesiai*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. ISBN 9789955202752.
4. KIEF B. Helmut, ROSCHIVAL A. *CNC Handbook*. New York: McGraw-Hill Education, 2012. ISBN 9780071799485.
5. PNEUMONT A. *Vibration Control of Active Structures– An Introduction* [interaktyvus]. Dordrecht: Springer Netherlands 2011 [žiūrėta: 2015-11-10]. ISBN 978-94-007-2033-6. Prieiga per: Springer Link.
6. GEČYS Steponas, SMOLSKAS Pranas. *Elektros mašinų triukšmai ir vibracijos*. Kaunas: Technologija, 2012. ISBN 9786090207055.
7. *How Adaptive Systems unlock big productivity gains* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta: 2015-12-01]. Prieiga per: https://dc-us.resource.bosch.com/media/us/trends_and_topics_2/technical_papers/motion_control_technology/bos3088-01antislosh-1.pdf
8. MOHANRAM P.V. , MOHAN KUMAR G. , ABUTHAKEER S. S. Prediction and Control of Cutting Tool Vibration in CNC Lathe with Anova and Ann. *International Journal of Lean Thinking* [interaktyvus]. 2011 vol. 2, no. 1, pp. 1-23 [žiūrėta: 2015-05-07]. Prieiga per: <http://www.thinkinglean.com/ijlt/articles/vol2/issue1/020201m.pdf>.
9. KAZEM Bahaa Ibraheem, ZANGANA Nihad F. H. A Neural Network Based Real Time Controller for Turning Process. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* [interaktyvus]. Zarqa: Hashemite University, 2007, vol. 1, no. 1, pp. 43-55 [žiūrėta: 2015-05-15]. ISSN 1995-6665. Prieiga per: <http://jjmie.hu.edu.jo/files/006.pdf>.
10. GELEŽEVIČIUS V., KRIKŠČIŪNAS K., KUBILIUS V. *Elektros pavarų valdymo sistemos*. Vilnius: Mokslas, 1990. ISBN 5420002884.
11. NAGAOKA Kotaro, SATO Tomonori. Feedforward controller for continuous path control of cnc machine tools. *I.J of SIMULATION* [interaktyvus]. Viena: DAAAM International Vienna, 2006, vol. 7, no. 8, pp. 39-46 [žiūrėta: 2015-12-01]. ISSN 1473-8031 Prieiga per: <http://ijssst.info/Vol-07/No-8/paper4.pdf>.
12. BEAREE Richard, BARRE Pierre-Jean, HAUTIER Jean-Paul. Vibration reduction abilities of some jerk-controlled movement laws for industrial machines. *IFAC World Congress*

[interaktyvus]. Prague, 2005 [žiūrėta: 2015-12-10]. ISBN 978-3-902661-75-3. Prieiga per: <http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/27814.html>.

13. NGUYEN Kim Doang; NG Teck-Chew and CHEN I-Ming. On Algorithms for Planning S-curve Motion Profiles. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [interaktyvus]. Rijeka : InTech Europe , 2008. vol. 5, no.1, pp. 99-106 [žiūrėta: 2016-02-10]. ISSN 1729-8806. Prieiga per: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/4267.pdf>.

14. SMILGIN Valdemar, ŠTRIMAITIS Mantas, JUREVIČIUS Mindaugas. Prototipų mechaninio apdirbimo pramoninių robotų tyrimai. *Mokslas – Lietuvos Ateitis* [interaktyvus]. Vilnius: Technika, 2012, 4(6), 573–578 [žiūrėta: 2015-05-07]. eISSN 2029-2252. Prieiga per: <http://www.mla.vgtu.lt/index.php/mla/article/viewFile/mla.2012.95/pdf>.

15. *Rep Rap: Prusa i3* [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta: 2015-12-14]. Prieiga per: http://reprap.org/wiki/Prusa_i3.

16 *PRÜFTECHNIK , Catalog: VIBROTIP® VIBTOOL® Machine diagnostics Data collection* [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta: 2015-12-16]. Prieiga per: <http://www.pruftechnik.com/>.

17. *LTC6240/LTC6241/LTC6242 Single/Dual/Quad 18MHz,Low Noise, Rail-to-Rail Output, CMOS Op Amps* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta:2016-02-05]. Prieiga per: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/624012fe.pdf>.

18. BARTKEVIČIUS Vaclovas, DOSINAS Alvydas. *Taikomoji elektronika*. Kaunas: Technologija, 2012. ISBN 9786090203002.

19. *Marlin firmware: Marlin*. 2016 [žiūrėta: 2016-04-09]. Prieiga per: <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin/tree/RC/Marlin>.

PRIEDAI

1 priedas. Greičio valdymo programa.

```
// *Greičio valdymo programa*

// Inicializuojamos bibliotekos;
#include "temperature.h"
#include "ultralcd.h"
#ifdef ULTRA_LCD
#include "Marlin.h"
#include "language.h"
#include "cardreader.h"
#include "temperature.h"
#include "stepper.h"
#include "ConfigurationStore.h"

// Aprašomi kintamieji;
int vibration_max=0.3; // Didžiausias leistinas spausdintuvo korpuso virpesių pagreitis;
int vibration_min=0.1; // Mažiausias leistinas spausdintuvo korpuso virpesių pagreitis;
int min_feedrate =60; // Mažiausi leistini x,y ašių greičiai;
int max_feedrate =500; // Didžiausi leistini x,y ašių greičiai;
int vib; // Virpesių momentinio pagreičio kintamasis;
int avg_vib; // Virpesių pagreičio vidutinė reikšmė;
int vib_sense; //Kintamasis skirtas kaupti nuskaitytoms virpesių jutiklio reikšmėms;
int delsa; //Kintamasis uždelsimui įrašyti;
int plaPreheatHotendTemp;
int plaPreheatHPBTemp;
int plaPreheatFanSpeed;

int absPreheatHotendTemp;
int absPreheatHPBTemp;
int absPreheatFanSpeed;

#ifdef FILAMENT_LCD_DISPLAY
  unsigned long message_millis = 0;
#endif

#ifdef ULTIPANEL
  static float manual_feedrate[] = MANUAL_FEEDRATE;
#endif // ULTIPANEL

...
// X,Y ašių pastūmų greičių reguliavimo kodo dalis, pridedama prie valdymo panelio dalies skirtos rankiniu
//būdu keisti parametrus;
void lcd_status_screen() {
// Nuskaitytos virpesių jutiklio reikšmės perskaičiavimas į pagreitį;
vib_sense=analogRead(A3);
vib=0,5*5*vib_sense/1023;
// Virpesių pagreičio vidurkio apskaičiavimas;
avg_vib=avg_vib+vib;
i++;
if (i==5){
avg_vib=avg_vib/5;
i=0;
}
}

//Tikrinama ar ašių greitis ne mažesnis nei minimalus leistinas ir jei mažesnis, reikšmė pakeičiama į leistiną;
if (max_feedrate[X_AXIS]< min_feedrate){
  max_feedrate[X_AXIS]= min_feedrate;
}
```



```

    max_feedrate[Y_AXIS]= min_feedrate;
}
//Tikrinama ar ašių greitis ne didesnis nei minimalus leistinas ir jei didesnis, reikšmė pakeičiama į leistiną;
else if (max_feedrate[X_AXIS]> max_feedrate){
    max_feedrate[X_AXIS]= max_feedrate;
    max_feedrate[Y_AXIS]= max_feedrate;
}

//Tikrinama ar virpesių vidutinis pagreitis ne didesnis nei maksimalus leistinas ir jei didesnis, spausdintuvo
//x,y ašių greičių reikšmė perskaičiuojama ir pakeičiama;
if (avg_vib>= vibration_max && max_feedrate[X_AXIS]> min_feedrate){
    max_feedrate[X_AXIS]= max_feedrate[X_AXIS]* vibration_max/avg_vib;
    max_feedrate[Y_AXIS]= max_feedrate[Y_AXIS]* vibration_max/avg_vib;
}
if (avg_vib<= vibration_min){
delsa++;
}
//Tikrinama ar virpesių vidutinis pagreitis ne mažesnis nei minimalus leistinas ir jei mažesnis, spausdintuvo
//x,y ašių greičių reikšmė perskaičiuojama ir pakeičiama;
if (avg_vib<= vibration_min && max_feedrate[X_AXIS]< max_feedrate && delsa>20){
    max_feedrate[X_AXIS]= max_feedrate[X_AXIS]* avg_vib/vibration_min;
    max_feedrate[Y_AXIS]= max_feedrate[Y_AXIS] * avg_vib/vibration_min;
}
...

```

2 priedas. Pagreičio valdymo programa.

```
// *Pagreičio valdymo programa*

// Inicializuojamos bibliotekos;
#include "temperature.h"
#include "ultralcd.h"
#ifdef ULTRA_LCD
#include "Marlin.h"
#include "language.h"
#include "cardreader.h"
#include "temperature.h"
#include "stepper.h"
#include "ConfigurationStore.h"

// Aprašomi kintamieji;
int vibration_max=0.3; // Didžiausias leistinas spausdintuvo korpuso virpesių pagreitis;
int vibration_min=0.1; // Mažiausias leistinas spausdintuvo korpuso virpesių pagreitis;
int min_acceleration =1000; // Mažiausi leistini x,y ašių pagreičiai;
int max_acceleration =7000; // Didžiausi leistini x,y ašių pagreičiai;
int vib; // Virpesių momentinio pagreičio kintamasis;
int avg_vib; // Virpesių pagreičio vidutinė reikšmė;
int vib_sense; //Kintamasis skirtas kaupti nuskaitytomis virpesių jutiklio reikšmėms;
int delsa; //Kintamasis uždelsimui įrašyti;
int plaPreheatHotendTemp;
int plaPreheatHPBTemp;
int plaPreheatFanSpeed;

int absPreheatHotendTemp;
int absPreheatHPBTemp;
int absPreheatFanSpeed;

#ifdef FILAMENT_LCD_DISPLAY
  unsigned long message_millis = 0;
#endif

#ifdef ULTIPANEL
  static float manual_feedrate[] = MANUAL_FEEDRATE;
#endif // ULTIPANEL

...
// X,Y ašių pastūmų pagreičių reguliavimo kodo dalis, pridedama prie valdymo panelio
//dalis skirtos rankiniu būdu keisti parametrus;
void lcd_status_screen() {
// Nuskaitytos virpesių jutiklio reikšmės perskaičiavimas į pagreitį;
vib_sense=analogRead(A3);
vib=0,5*5*vib_sense/1023;
// Virpesių pagreičio vidurkio apskaičiavimas;
avg_vib=avg_vib+vib;
i++;
if (i==5){
avg_vib=avg_vib/5;
i=0;
}

//Tikrinama ar ašių pagreitis ne mažesnis nei minimalus leistinas ir jei mažesnis, reikšmė pakeičiama į
leistiną;
if (max_acceleration_units_per_sq_second[X_AXIS]< min_acceleration){
```

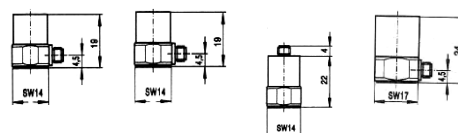
```

    max_acceleration_units_per_sq_second[X_AXIS]= min_acceleration;
    max_acceleration_units_per_sq_second[Y_AXIS]= min_acceleration;
}
//Tikrinama ar ašių pagreitis ne didesnis nei minimalus leistinas ir jei didesnis, reikšmė pakeičiama į
//leistiną;
else if (max_acceleration_units_per_sq_second[X_AXIS]> max_acceleration){
    max_acceleration_units_per_sq_second[X_AXIS]= max_acceleration;
    max_acceleration_units_per_sq_second[Y_AXIS]= max_acceleration;
}

//Tikrinama ar virpesių vidutinis pagreitis ne didesnis nei maksimalus leistinas ir jei didesnis, spausdintuvo
//x,y pagreičių reikšmė perskaičiuojama ir pakeičiama;
if (avg_vib>= vibration_max && max_acceleration_units_per_sq_second[X_AXIS]> min_acceleration){
    max_acceleration_units_per_sq_second[X_AXIS]= max_acceleration_units_per_sq_second[X_AXIS]*
vibration_max/avg_vib;
    max_acceleration_units_per_sq_second[Y_AXIS]= max_acceleration_units_per_sq_second[Y_AXIS]*
vibration_max/avg_vib;
}
if (avg_vib<= vibration_min){
    delsa++;
}
//Tikrinama ar virpesių vidutinis pagreitis ne mažesnis nei minimalus leistinas ir jei mažesnis, spausdintuvo
//x,y pagreičių reikšmė perskaičiuojama ir pakeičiama;
if (avg_vib<= vibration_min && max_acceleration_units_per_sq_second[X_AXIS]< max_acceleration &&
delsa>20){
    max_acceleration_units_per_sq_second[X_AXIS]= max_acceleration_units_per_sq_second[X_AXIS]*
avg_vib/vibration_min;
    max_acceleration_units_per_sq_second[Y_AXIS]= max_acceleration_units_per_sq_second[Y_AXIS]*
avg_vib/vibration_min;
}
...

```

3 priedas. Virpesių jutiklio MMF KD35 parametrai.



Virpesių pagreičio matavimo keitlio techniniai duomenys			KD32	KD33	KD34	KD35
Krūvio jautrumas	B_{qa}	$\text{pC/m}\cdot\text{s}^2$	1,2	0,6	0,5	4
Įtampos jautrumas	B_{ua}	$\text{mV/m}\cdot\text{s}^2$	$2\pm 2\%$	$1\pm 2\%$	0,6%	$5\pm 2\%$
Elektrinė talpa	C_i	nF	0,6	0,6	0,8	0,8
Rezonansinis dažnis	F_R	kHz	≥ 30	≥ 45	≥ 50	≥ 20
Apatinis rezonansinis dažnis	f_u	Hz	-	-	-	-
Matuojamų skersinių virpesių koeficientas	$\Gamma_{90\text{max}}$	%	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Naudojamas srovės stipris	I	mA	-	-	-	-
Didžiausias matuojamas pagreitis						
Teigiamas pagreitis	a_+	1000 m/s^2	25	50	100	3
Neigiamas pagreitis	a_-	1000 m/s^2	25	50	50	3
Skersinis pagreitis	a_q	1000 m/s^2	15	25	30	1
Darbinių temperatūrų diapazonas	$T_{\text{min}}/T_{\text{max}}$	$^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$	-35/150			

4 priedas. Operacinio stiprintuvo LTC6240 elektrinės charakteristikos.

LTC6240/LTC6241/LTC6242

ELEKTRINĖS CHARAKTERISTIKOS (LTC6240HVH/LTC6241HVH/LTC6242HVH) Žymė „1“ pažymėtos charakteristikos kurioms galioja -40°C iki 125°C darbinė temperatūra, kitais atvejais galioja $T_A = 25^{\circ}\text{C}$. $V_S = \pm 5\text{V}$, $V_{CM} = 0\text{V}$, jei nepažymėta kitaip.

SIMBOLIS	PARAMETRAS	SĄLYGOS	MIN.	NOM.	MAKS.	VNT.
V_{OS}	Įėjimo Įtampos Pokytis (Pastaba 1)	LTC6241 S8	1	50	175	μV
					400	μV
		LTC6242 GN	1	60	200	μV
					400	μV
		LTC6240	1	60	250	μV
					450	μV
	V_{OS} Suderinimas Kanalo į Kanalą	LTC6241 S8	1	50	200	μV
					400	μV
		LTC6242 GN	1	60	225	μV
					400	μV
$TC V_{OS}$	Įtampos Pokyčio Nukrypimas (Pastaba 2)		1	0.7	2.5	$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
I_B	Įėjimo Ryšio Srovė (Pastaba 1)	LTC6241, LTC6242	1	0.5	1.5	pA nA
		LTC6240	1	0.5	1	pA
					2.5	nA
I_{OS}	Įėjimo Srovės Pokytis (Pastaba 1)	LTC6241, LTC6242	1	0.2	150	pA
		LTC6240	1	0.2	1	pA
					750	pA
V_{CM}	Įėjimo Įtampos Intervalas	Garantuojamas CMRR	1	-5	3.5	V
CMRR	Normalaus Režimo Atmetimas	$-5\text{V} \leq V_{CM} \leq 3.5\text{V}$	1	80		dB
		CMRR Kanalo su Kanalu Suderinimas	1	76		dB
	Aukšto Lygio Signalo Įtampos Stiprinimas	$R_L = 10\text{k}$	1	775	2700	V/mV
		$-5\text{V} \leq V_{CM} \leq 3.5\text{V}$	1	350		V/mV
		$R_L = 1\text{k}$	1	150	360	V/mV
					60	V/mV
V_{OL}	Neigiamos Išėjimo įtampos šuolis	Be apkrovos	1		30	mV
		$I_{SINK} = 1\text{mA}$	1		85	mV
		$I_{SINK} = 10\text{mA}$	1		600	mV
V_{OH}	Teigiamos Išėjimo įtampos šuolis	Be apkrovos	1		30	mV
		$I_{SALTINIO} = 1\text{mA}$	1		85	mV
		$I_{SALTINIO} = 10\text{mA}$	1		600	mV
PSRR	Maitinimo Šaltinio Atmetimas	$V_S = 2.8-11\text{V}$, $V_{CM} = 0.2\text{V}$	1	83		dB
		PSRR Kanalo į Kanalą Suderinimas	1	82		dB
		Minimali Maitinimo Įtampa	1	2.8		V
I_{SC}	Trumpo Jungimo Srovė		1	15		mA
I_S	Maitinimo Srovė Stiprintuvui	LTC6241, LTC6242	1	2.5	3.2	mA
					3.7	mA
		LTC6240	1	2.7	3.3	mA
					3.8	mA
GBW	Stiprinamos Juostos Produktas	Dažnis= 20kHz, $R_L = 1\text{k}\Omega$	1	12		MHz
SR	Kilimo Greitis	$A_V = -2$, $R_L = 1\text{k}\Omega$	1	5		V/ μs
FPBW	Paralaidumo Juosta Esant Pilnai Galiai	$V_{OUT} = 3V_{P-P}$, $R_L = 1\text{k}\Omega$	1	0.53		MHz

Pastaba 1: Elektrostatiniam laukui jautrus įtaisas. Nors LTC6240/LTC6241/LTC6242 naudoja apsaugos priemones nuo elektrostatinio lauko, bet elektrostatinio lauko iškvos vis tiek gali pažeisti įtaisą, todėl naudojant ir dirbant su minėtais įtaisais, reikia naudoti papildomas apsaugos priemones.

Pastaba 2: Charakteristika nėra pilnai išbandyta.

5 priedas. Spausdintuvo valdiklio Arduino MEGA 2560 schema.

