



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Vidas Perkamas

TRIJŲ AŠIŲ SKAITMENINIO PROGRAMINIO VALDYMO
STAKLIŲ PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Alvydas Kondratas

Konsultantas

Prof. habil. dr. Vytautas Barzdaitis

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
GAMYBOS INŽINERIJOS KATEDRA

TRIJŲ AŠIŲ SKAITMENINIO PROGRAMINIO VALDYMO
STAKLIŲ PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Mechatronikos studijų programa (kodas 621H73001)

Vadovas

Prof. dr. Alvydas Kondratas

Konsultantas

Prof. habil. dr. Vytautas Barzdaitis

Recenzentas

Doc. dr. Inga Skiedraitė

Projektą atliko

Vidas Perkamas



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Vidas Perkmas

(Studento vardas, pavardė)

Mechatronika (kodas 621H73001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Trijų ašių skaitmeninio programinio valdymo staklių projektavimas ir tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. birželio 1 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Vido Perkamo** baigiamasis projektas tema „Trijų ašių skaitmeninio programinio valdymo staklių projektavimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Tvirtinu:

Gamybos inžinerijos

(parašas, data)

katedros vedėjas

Kazimieras Juzėnas

(vardas, pavardė)

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Studijų programa MECHATRONIKA

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

1. Projekto tema _____ Trijų ašių skaitmeninio programinio valdymo staklių projektavimas ir tyrimas

Patvirtinta 2016 m. gegužės mėn. 3 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-7

2. Projekto tikslas _____ Suprojektuoti skaitmeninio programinio valdymo (SPV) frezavimo stakles, pagaminti jas ir eksperimentiškai nustatyti pozicionavimo tikslumą ir greitaveiką.

3. Projekto struktūra: Įvadas; Literatūros apžvalga; Gaminio paskirtis ir projektavimas; Tyrimų dalis; Išvados; Literatūra

4. Reikalavimai ir sąlygos _____ Staklių darbinės eigos X –ašies kryptimi 500 mm, Y – ašies kryptimi 350 mm ir Z ašies kryptimi 250 mm. Apdirbimo tikslumas $\pm 0,1$ mm . Apdirbamos medžiagos iš aliuminio, plastiko medžio.

5. Projekto pateikimo terminas 2016 m. birželio mėn. 1 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis

Išduota studentui _____ Vidui Perkamui

Užduotį gavau _____ Vidas Perkamas

(studento vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas _____ Prof. dr. Alvydas Kondratas

(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

TURINYS

ĮVADAS	9
1. LITERATŪROS APŽVALGA	10
1.1 Vertikalių frezavimo staklių tipai	10
1.2 Programinio valdymo staklių pagrindiniai elementai	11
1.3 Frezavimas – gamybos technologija	14
1.4 Pjovimo dinaminių jėgų sukelti apdirbamo objekto netikslumai	16
2. GAMINIO PASKIRTIS IR PROJEKTAVIMAS	17
2.2 Pagrindinio suklio parinkimas	19
2.3 Žingsninio elektros variklio parinkimas	21
2.5 Principinė SPV staklių ŽEV jungimo schema	28
2.6 SPV staklių prototipo gamyba	29
3. TYRIMŲ DALIS	30
3.1 Kompiuteriu nustatomo matmens paklaidos tyrimas	30
3.1.1 Koordinatės paklaidos radimo metodika	30
3.1.2 Pozicionavimo paklaidos matavimai Y ašies kryptimi	31
3.1.3 Pozicionavimo paklaidos matavimai X ašies kryptimi	34
3.1.4 Pozicionavimo paklaidos matavimai bekontakčiu jutikliu X ašies kryptimi	37
3.1.5 Pozicionavimo paklaidos matavimai Z ašies kryptimi	40
3.2 Tvirtinimo stalo judesio X kryptimi dinamikos tyrimas	43
3.3 Stalo sraigto pavaros laisvojo galo radialinio mušimo nustatymas	49
3.4 ŽEV valdymo signalo matavimas	50
IŠVADOS	51
LITERATŪRA	52
PRIEDAI	55

SAVOKŲ IR SANTRUMPŲ PAAIŠKINIMAS

ŽEV – žingsninis elektros variklis;

VSP – veržlės sraigto pavara;

SPV – skaitmeninio programinio valdymo;

PV –programinio valdymo;

GFT – greita Furje transformacija;

PLV – programuojamas loginis valdiklis;

G – kodas – programavimo kalba

Perkamas, Vidas. Trijų ašių skaitmeninio programinio valdymo staklių projektavimas ir tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. Alvydas Kondratas; Kauno technologijos universitetas, mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Gamybos inžinerija, Technologijos mokslai.

Raktiniai žodžiai: Skaitmeninio valdymo staklės, frezavimas, projektavimas, judesio dinamika, pozicionavimas

Kaunas, 2016. 54 p.

SANTRAUKA

Baigiamajame darbe projektuojamos ir tiriamos skaitmeninio programinio valdymo frezavimo staklės (SPV). Darbe pateikta SPV staklių konstrukcijos literatūros apžvalga. Išanalizuoti pagrindiniai staklių konstrukciniai elementai ir naudojamų pavarų valdymas.

Projektuojamoje dalyje, pasirinkta staklių konstrukcija. Parengta techninė užduotis, projekto algoritmas. Apskaičiuota suklio reikalinga galia. Atlikti skaičiavimai Y ašies pavarai parinkti. Atlikta suklio poslinkių įvertinimas baigtinių elementų metodu, apkrovus jas pastovia jėga. sudaryta principinė staklių ŽEV valdymo schema.

Pagamintas prototipas SPV staklių, su kuriuo tiriamojoje dalyje atlikti tyrimai ašių , X Y, Z pozicionavimo paklaidoms nustatyti. Išmatuoti virpesiai tvirtinimo stalo X ašies kryptimi, nustatyta judesio dinamika. Nustatytas tvirtinimo stalo pavaros sraigto, laisvojo galo radialinis mušimas. Iširta ŽEV valdymo signalas.

Atlikus tyrimus, pagal matavimus įvertinta pagamintų staklių būklė, padarytos išvados

Perkamas, Vidas. Design and analysis of a 3-axis numerically controlled milling machine. *Master's Thesis* / advisor prof. Alvydas Kondratas; Kaunas University of Technology, faculty of Mechanical Engineering and Design.

Study area and field: Production and Manufacturing Engineering, Technological Sciences.

Keywords: Numerically controlled machine, milling, design, motion dynamics, positioning.

Kaunas, 2016. 54 p.

SUMMARY

This final project presents a design and analysis of a 3-axis numerically controlled milling machine (CNC). The thesis also includes literature review of CNC milling machine construction. The main machine construction elements and gear management have been analyzed.

The design part chooses construction type of the machine. The technical task has been completed and the algorithm of the project has been created. The power needed to the spindle has been calculated. The right gear of the Y-axis has been determined. The deformation of frame-supporting columns has been evaluated using the method of finite elements, by loading them with constant force. A fundamental controller scheme for a stepper motor has been created.

A prototype for CNC milling machine has been made and used to determine positioning errors of X, Y, and Z axis. Vibrations towards the X axis of the table have been measured; motion dynamics have been determined. The radial run-out of the table gear's lead screws open end has been determined. The controlling signal of the stepper motor has been analyzed.

After the analysis, the machine condition has been evaluated and conclusions have been drawn using the measurements.

IVADAS

Rankinio valdymo frezavimo staklės pradėtos naudoti XIX a. pirmoje pusėje. Vystantis Amerikos karo pramonei, reikėjo didesnio apdirbimo tikslumo, produktyvumo ir pakartojamumo muškietų bei šaunamųjų ginklų gamyboje. Pirmosios frezavimo staklės buvo dviejų ašių, įrankis pozicijuojamas dviejų ašių kryptimis, tai ribojo jų galimybes. 1861 metais Joseph Brown patobulino universalias frezavimo stakles iki trijų ašių. Tai didino apdirbimo galimybes besiformuojančiai mašinų pramonei [1].

XX-ajame amžiuje vystantis mašinų pramonei, masinėje mašinų gamyboje diegiamos staklės su valdomais sukliais ir automatinėmis pastūmos sistemomis [2].

Pirmos pramoninės skaitmeninio programinio valdymo staklės buvo sukurtos 1950 metais. Kuriami programavimo principai ir metodai kurie palengvintų programuotojo darbą. Visas programavimas rankinis, o gaminiai nesudėtingos formos. Elektroniniu požiūriu valdymo blokuose pagrindiniai elementai relės ir elektroninės lempos. O programa skaitoma iš perforuotų juostų. G-kodas universali programavimo kalba SPV staklėms, dar neegzistavo. Kiekvienas staklių gamintojas naudojo savo sukurtą kalbą SPV staklėms valdyti [3].

Puslaidininkių elementų atsiradimas padidino SPV staklių valdymo galimybes. Pradedamos diegti integralinės schemos, ir interpoliatoriai. Naudojami grįžtamojo ryšio jutikliai, greitaieigės pavaros, kompiuteriai kurie paspartina programavimo ir technologinę frezavimo operaciją. Gaminamos staklės kurios gali atlikti judesius 3–jų, 5–ių ašių kryptimis. Sukuriamos programavimo kalbos, palengvinančios programuotojo darbą su kompiuteriu rašant programos algoritmą pasirinktai detalei gaminti. Programa aprašomi pagrindiniai detalių parametrai, apdirbimo technologijos, režimai, ir įrankiai naudojami operacijoms atlikti. Parašyta programa siunčiama į programinio valdymo įrenginį [4].

Problema – sudėtingo ir neefektyvus kreivalinijinio 3D profilio frezavimas, rankinio valdymo frezavimo staklėmis.

Darbo tikslas – suprojektuoti skaitmeninio programinio valdymo (SPV) frezavimo stakles, pagaminti jas ir eksperimentiškai nustatyti pozicionavimo tikslumą ir greitaveiką.

Uždaviniai:

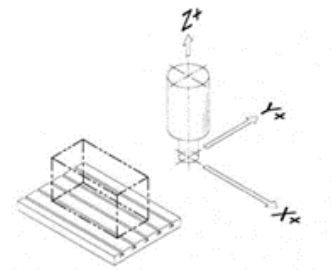
1. Suprojektuoti SPV frezavimo stakles su riedėjimo trinties pavaramis kurių eigos X ašimi – 500 mm, Y ašimi – 350 mm ir Z ašimi – 250 mm.
2. Atlikti staklių rėmo stipruminę analizę.
3. Išmatuoti suklio pozicionavimo paklaidas X, Y ir Z ašių kryptimis.
4. Iširti staklių tvirtinimo stalo judesio dinamiką.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Vertikalių frezavimo staklių tipai

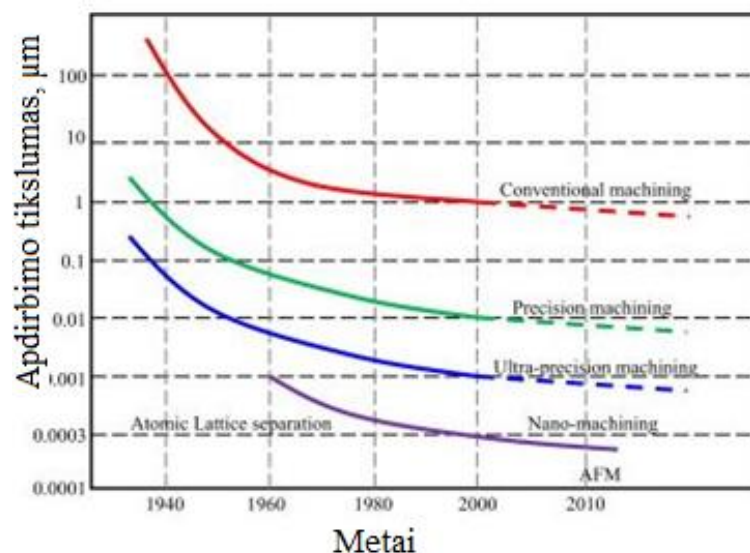
Frezavimo staklės užima antrą vietą pagal svarbą mašinų gamyboje ir medžiagų apdirbime po tekimo staklių. Frezavimo staklėmis formuojami įvairūs detalių paviršiai: plokšti, cilindriniai, kūginiai ir įvairūs nelinijiniai, t. y. horizontalūs, vertikalūs ir nuožulnūs detalių paviršiai, tiesūs arba sraigtiniai grioveliai, krumpliaračių krumpliai ir šampų kontūrai [5].

Vertikalių frezavimo staklių suklio Z ašis yra vertikali ir statmena stalo plokštumai (1.1 pav.) [6].



1.1 pav. Vertikalių frezavimo staklių ašių X, Y ir Z kryptis nurodytos rodyklėmis [7]

Skiriami pagrindiniai staklių tipai: universalios konsolinės ir horizontalios bei bekonsoles [8]. Pagal tikslumą skirstomos: paprastos, tikslios ir padidinto tikslumo (1.2 pav.).

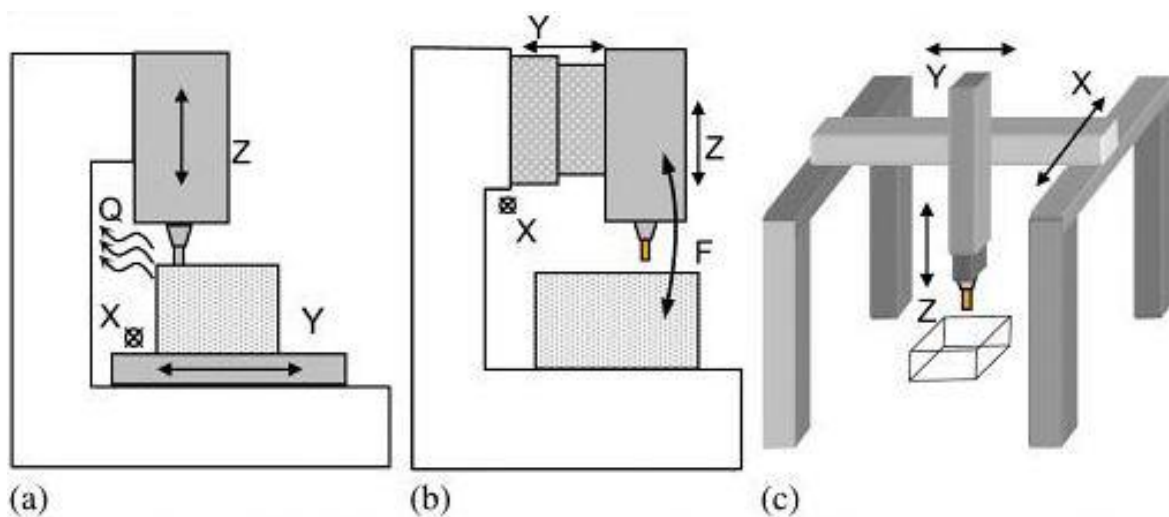


1.2 pav. Programinio valdymo staklių raida, pagal apdirbamo paviršiaus šiurkštumą [9]

Rėmas staklėse privalo laikyti mašinos komponentus, tuo pačiu atlaiko technologinio proceso metu atsirandančias jėgas. Išskiriami du pagrindiniai konstrukciniai tipai: Rėmas atviro tipo (konsolinis) ir rėmas uždaro tipo (tiltinės – portalinės) konstrukcijos. Atviro tipo konstrukcija yra silpnesnė, bet darbo zona didesnė ir patogesnė darbui (1.3 pav. a, b). Bet ši konstrukcija yra jautresnė,

sulinkimui, susisukimui. Įtvirtinta kolona (1.3 pav. a). Kitu atveju judantis suklys trijų ašių kryptimis X, Y, Z, mažesnis standumas, bet visada judanti masė vienoda, neįvertinant skirtingų įrankių masės. Kitas privalumas, tai leidžia apdirbti detalę, tuo metu kai kita detalė yra kitoje stalo zonoje ir tuo atveju kai stalas pakankamai ilgas [8].

Uždaro tipo konstrukcijos frezavimo staklės, vidutinėms arba didelių gabaritų detalėms gaminti. Dažnu atveju tiltas juda Y ir Z ašių kryptimis ir įtvirtintas ruošinys juda su stalu X ašies kryptimi [6] (1.3 pav. c).



1.3 pav. Staklių rėmo konstrukcijos tipai [8]

a – konsolinės atviro tipo; b – konsolinės uždaro tipo; c – tiltinės (portalinės) konstrukcijos

1.2 Programinio valdymo staklių pagrindiniai elementai

Rankomis valdomų staklių palyginimas su programinio valdymo staklėmis [6]:

1. PV įrenginiai dirba automatiškai, be operatoriaus pagalbos;
2. Didesnis PV staklių našumas.

Dažniausiai vertikaliuose apdirbimo centruose pastūmos judesiai XY plokštumoje vykdomi stalo judesiais. Tačiau yra grupė staklių kuriose judesiai pagal Y ir Z ašis atliekami suklio galvute, su joje įtvirtintu įrankiu [6]. Tokios staklės vadinamos portalinėmis (1.4pav.).

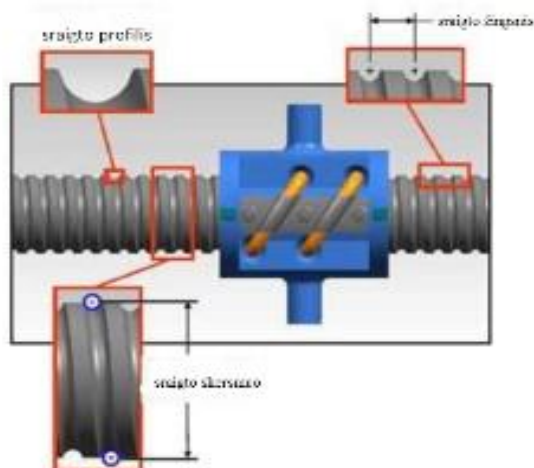
Šiuolaikinėse vertikaliuose SPV apdirbimo staklėse yra mažiausiai trys vienu metu valdomos ašys [6].



1.4 pav. Portalinio tipo SPV staklės [10]

Pagrindinės SPV staklių sudedamosios dalys:

Riedėjimo trinties sraigto veržlės pavaros – tai įrangos dalis paverčianti sukamuosius variklių judesius slenkamaisiais [6]. Pagrindiniai naudojami sraigtai, kurių diametras būna nuo (6–100 mm), su riedėjimo elementais, yra pranašesni už slydimo sraigto – veržlės pavaras, dėl mažos riedėjimo trinties. Sraigto pavara išvysto didelę pozicionavimo jėgą, tikslų pozicionavimą ir tikslų judesio atkartojimą (1.5 pav.). Pozicionavimo paklaida $\pm 0,003$ mm, 0,3 metro ilgyje [11]. Sraigto – veržlės su riedėjimo elementais naudingumo koeficientas siekia iki 90 % [12]. Šie sraigtai yra padengti su trinčiai atspariomis medžiagomis [13]. Šios pavaros plačiai naudojamos, staklių suportams pozicijuoti. Ir gali dirbti dideliais greičiais. Pavara susideda, iš sraigto ir veržlės su riedėjimo elementais. Sraigtui ar veržlei sukantis riedėjimo elementai rieda sraigto grioveliu (1.5 pav.). Sraigto apkrovimo jėga pasiskirsto ant visų riedėjimo elementų tolygiai, todėl vienam riedėjimo elementui tenka nedidelė apkrovos dalis. Kadangi yra mažas riedėjimo trinties koeficientas, todėl pasiekiamas didelis pavaros naudingumas. Sraigto sukimosi greičiui viršijus leistiną, sistemoje sužadinami harmoniai virpesiai [11].



1.5 pav. Sraigto parametrai [11]

SPV staklių pavarose dažniausiai naudojami, elektriniai varikliai. Vieni iš paprastesnių elektromechaninių pavarų valdomi ŽEV[6]. Variklis pasisuka tam tikru kampu, gavęs impulsą ir sustoja. Dažniausiai sutinkami žingsniniai varikliai kurių žingsnis yra $1,8^\circ$ [14]. Šie varikliai gali būti suderinti su PLV kuris generuoja impulsą, nereikia specialių sąsajų ar valdiklių, todėl šių variklių kaina nedidelė. Pagrindiniai trūkumai šių variklių, kad apkraunant didesnėmis jėgomis ŽEV pameta žingsnius ir negali veikti prie didelių apsukų [15].

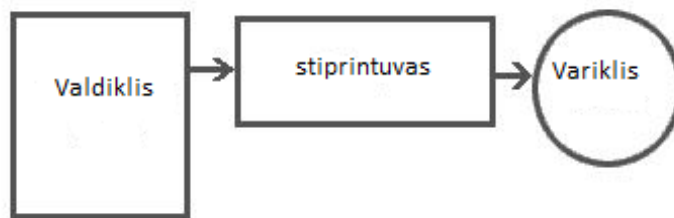
Plačiai pritaikomi šiuolaikinėse SPV staklėse servo varikliai, užtikrinantys staklėse tolygų judesį, o ne diskretinį kaip žingsniniai varikliai. Šių variklių greitis kontroliuojamas reguliuojant signalo stiprumą arba dažnį priklausomai nuo pavaros konstrukcijos. Anksčiau buvo naudojami nuolatinės srovės varikliai, bet dabar pereita prie kintamos srovės bešepetėlinių servo variklių, kurių elektromagnetai perjungiami elektroniniu būdu [6].

Kreipiančiųjų sistema išlaiko tikslų judėjimą ašių kryptimis. Kreipiančiosios tai tam tikros formos bėgiai, visame ilgyje tikslaus storio, strypai [12]. Forma ir dydis parenkamas priklausomai nuo veikiančios išorinės jėgos ir būtina sąlyga, kad nevyktų deformacija technologinio proceso metu. Standartiškai pastūmos greitis tenkantis kreipiančiosioms nesiekia 20 m/min, bet pozicionavimo metu greitis išauga iki 50 mm/min. Todėl SPV staklėse netinka slydimo trinties kreipiančiosios, kurios dirbant dideliais greičiais generuoja šilumą. Riedėjimo trinties kreipiančiosios pasižymi maža trintimi, atlaiko dideles apkrovimo jėgas ir pasiekiami dideli pozicionavimo greičiai. Galimas laisvumas kreipiančiosiose $\pm 5 \mu\text{m}$. Dažniausiai naudojamos dvi lygiagrečios kreipiančiosios, siekiant sumažinti išorines apkrovas. Kreipiančiosioms sudilus pasireiškia apdirbimo netikslumai [16].

Suklys tai frezavimo staklių mazgas, su įtaisais įrankiui tvirtinti. Dažniausiai naudojamas su kintamos srovės varikliu. Suklys yra vienas tiksliausių metalo pjovimo staklių mazgų, nes turi išlaikyti nustatytas veleno spindulio ašinio mušimo tolerancijas. Turi būti standus ir atsparus vibracijoms [17].

ŽEV kontrolės sistemos staklėse yra dviejų tipų: atviro tipo valdymas be grįžtamojo ryšio ir uždaro tipo su grįžtamoju ryšiu.

Staklių variklių valdymas atviro tipo, be grįžtamojo ryšio (1.6 pav.). Suprogramuotas kodas siunčiamas į valdiklį, per tinklo kabelį. Ten paverčiamas į tam tikro dažnio elektrinius impulsus (signalą), kuris siunčiamas į variklio stiprintuvą, kuris sujungtas su varikliu. Impulsų skaičius apsprendžia variklio pasisukimą, o impulsų dažnis, variklio sukimosi greitį [14]. Šis valdymo būdas neturi kontrolės realiame laike, dėl to sistema negali sekti pavaros darbo, atgaliniu ryšiu. Todėl mechaninio apdirbimo operacijos metu, padidėjus pjovimo jėgai, ar dėl per didelio pastūmos greičio sistema pameta pasisukimo kampą. Ši sistema pritaikoma, eroziniame pjovime su viela, kur neveikia pjovimo jėgos [13]. Panaudojama pozicionavimui iš taško į tašką [14]. Taip pat naudojama mėgėjiškose SPV staklėse dėl to, kad yra pigesnė nei uždaro tipo kontrolės sistema.

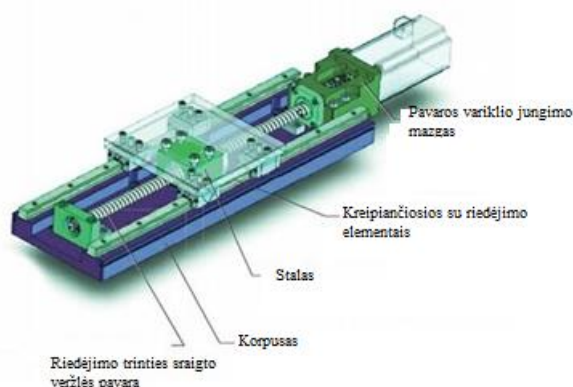


1.6 pav. Variklio kontrolės sistemos schema be grįžtamo ryšio [6]

Sistema su grįžtamoju ryšiu, vadinama uždara (1.7 pav.). Variklio pasisukimas ir greitis matuojamas, siunčiamais signalais į valdiklį, ir jei yra neatitikimas signalo, pagal užduotą eigą, sistema atlieka korekciją realiaame laike.[13] Analoginėje sistemoje matuojama pozicija ir greitis pagal signalo įtampą. Skaitmeninėje sistemoje, matuojamas variklio pasisukimas pagal elektrinio impulso vidurkį [14]. Taip pasiekiamas didelis sistemos tikslumas kuris gali siekti iki $\pm 0,0002 \mu\text{m}$. Ši kontrolės sistema su uždaru ryšiu pranašesnė nei atviro tipo. Šiandien daugumoje pramoninių SPV mašinų naudojamos šios sistemos [13]. Šiai sistemai valdyti reikalinga daugiau greičio kontrolės, valdymo prietaisų, tai padaro šią sistemą žymiai brangesnę nei sistemą be grįžtamojo ryšio [14].



1.7 pav. Variklio kontrolės sistemos schema su grįžtamoju ryšiu [6]



1.8 pav. Tipinė elektromechaninė sraigtinė pavara [16]

1.3 Frezavimas – gamybos technologija

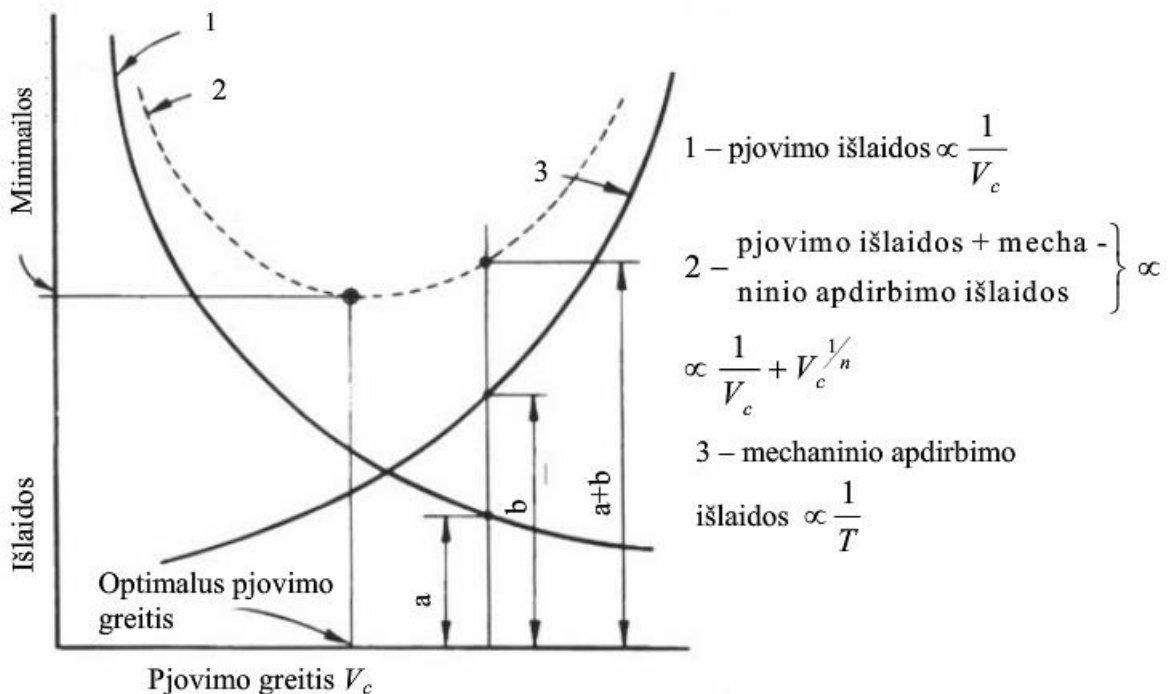
Programinio valdymo frezavimo staklių optimizavimo pagrindiniai veiksniai: ciklo atlikimo laikas, įrankio eksploatavimo laikas, kuris priklauso nuo pasirinktų apdirbimo režimų, greičių,

pastūmos ir veikiančių pjovimo jėgų [12]. Yra keletas variantų kaip išmatuoti šiuos kintamuosius pasitelkiant dinamometrus ir kita reikalingą matavimo įrangą [18].

Pjovimo jėgos yra viena iš pagrindinių priežasčių įvertinti įrankio eksploatavimo laiką. Pernelyg didelės pjovimo jėgos: sukelia aukštą temperatūrą dėl trinties tarp ruošinio ir įrankio, vibracijas, greitą įrankio dilimą ir prarandamas tikslumas. SPV programuotojai parenka skirtingas pjovimo jėgas įvertindami ruošinio medžiagą, frezos diametrą, pagal tai nustato suklio apsisukimo greitį, pastūmą ir pjovimo gylį [12].

Frezos – įrankio apsisukimai turi būti parenkami iš įrankių katalogo pagal frezos diametrą, tipą ir frezuojamos detalės medžiagą, siekiant išvengti greito įrankio dilimo [12]. Padidintas įrankio apsisukimų skaičius, neįtakoja spartesnio ciklo atlikimo laiko. Gamybos greitis priklauso nuo ciklo metu atliktų sustojimų (1.9 pav.). Padidinus pastūmą padidėja frezavimo operacijos greitis, tačiau dėl padidinto greičio greičiau dyla įrankiai, jiems pakeisti sugaišamas laikas ir ciklas užtrunka. Jeigu įrankius reikia keisti labai dažnai, išauga gamybos kaštai dėl įrankių kainos. Todėl pjovimo režimai turi būti optimizuojami, kad vienos detalės kaina būtų mažiausia, ir tuo pačiu su pasirinktais nustatymais būtų pagaminta kuo daugiau detalių per tam tikrą laiko tarpą iki įrankio nusidėvėjimo [19].

Programinėmis staklėmis dažnai apdirbamos detalės kurių matmenys turi būti 6–8 kvaliteto tikslumo [5].



1.9 pav. Ekonomiškas pjovimo greitis [12]

1.4 Pjovimo dinaminių jėgų sukeliama apdirbamo objekto netikslumai

Technologinės sistemos virpesiai turi didelę įtaką apdirbamos medžiagos pjovimo procesui. Padidėja apdirbamo paviršiaus šiurkštumas, banguotumas, atsiranda skerspjūvio formos paklaidos: ovališkumas ir briaunuotumas. Virpesių amplitudė, pasiekusi tam tikrą dydį sustiprėja dėl pjovimo jėgų nestabilumo įrankiui įsigilinaant. Be to sistemai virpant, pasikeičia tikrieji įrankio pjovimo kampai. Dėl tų priežasčių pasikeičia pjovimo jėga ir nuo jos priklausantys poslinkiai [23].

Dinamika kompiuterizuotose skaitmeninio valdymo staklėse, sukelia vibracijas ir pozicionavimo netikslumus. Tai įtakoja gaminamos detalės formos netikslumus, todėl būtina mažinti šias atsitiktines paklaidas ir pasiekti aukštą staklių apdirbimo tikslumą. Sistemos inercijos, greičio ir padėties matavimai būtini norint pagerinti frezavimo operacijos efektyvumą. Dinamika apdirbimo procese priklauso nuo keleto faktorių: nuo frezavimo staklių konstrukcijos, nuo ruošinio ir pjovimo parametrų, pagal tai svarbu parinkti tinkamus frezavimo operacijos technologinius parametrus: frezos apsisukimus, pagreitį, pastumą, pjovimo gylį, siekiant išvengti didelių vibracijų darbo metu [20]. Reikalingas šių parametrų nuolatinis stebėjimas atliekant staklių valdymo pakeitimus, ypač tai svarbu švariam paviršių apdirbimui, kuriam svarbus didelis tikslumas. Mažinamas pjovimo greitis, pagreitis ir pastūma siekiant pašalinti trikdžius, nenutraukiant interpoliacijos [12]. Nustatymas geometrinių paklaidų galėtų būti tikslesnis panaudojus lazerinius pozicijos nustatymo jutiklius, linijinius enkoderius [21].

Dinaminiai staklių tyrimai daryti, neuroniniais tinklais, ir baigtiniais elementais. Remiantis klaidos prognozavimu parenkami pjovimo režimai kurie pagerintu detalių apdirbimą. Tokių metodų įgyvendinimas sukelia problemų: kaip signalo uždelsimas. Pagrindinis privalumas siūlomo algoritmo yra daviklių skaičius, įvertinant dinamikos parametrus. Nereikia naudoti papildomus jutiklius greičiui, pagreičiui ir vibracijoms stebėti. Gaunamos santykinės paklaidos 5 % nuo greičio ir pagreičio, atsižvelgus į paklaidas jos gali būti kiek per didelės precizinio tikslumo įrenginiuose, bet pilnai pakankamos standartiniams SPV įrenginiams [22].

2. GAMINIO PASKIRTIS IR PROJEKTAVIMAS

2.1 Mechaninė dalis

Staklių paskirtis, atlikti mechaninio apdirbimo operacijas, frezavimą ir gręžimą.

Techninė užduotis (2.1 pav.):

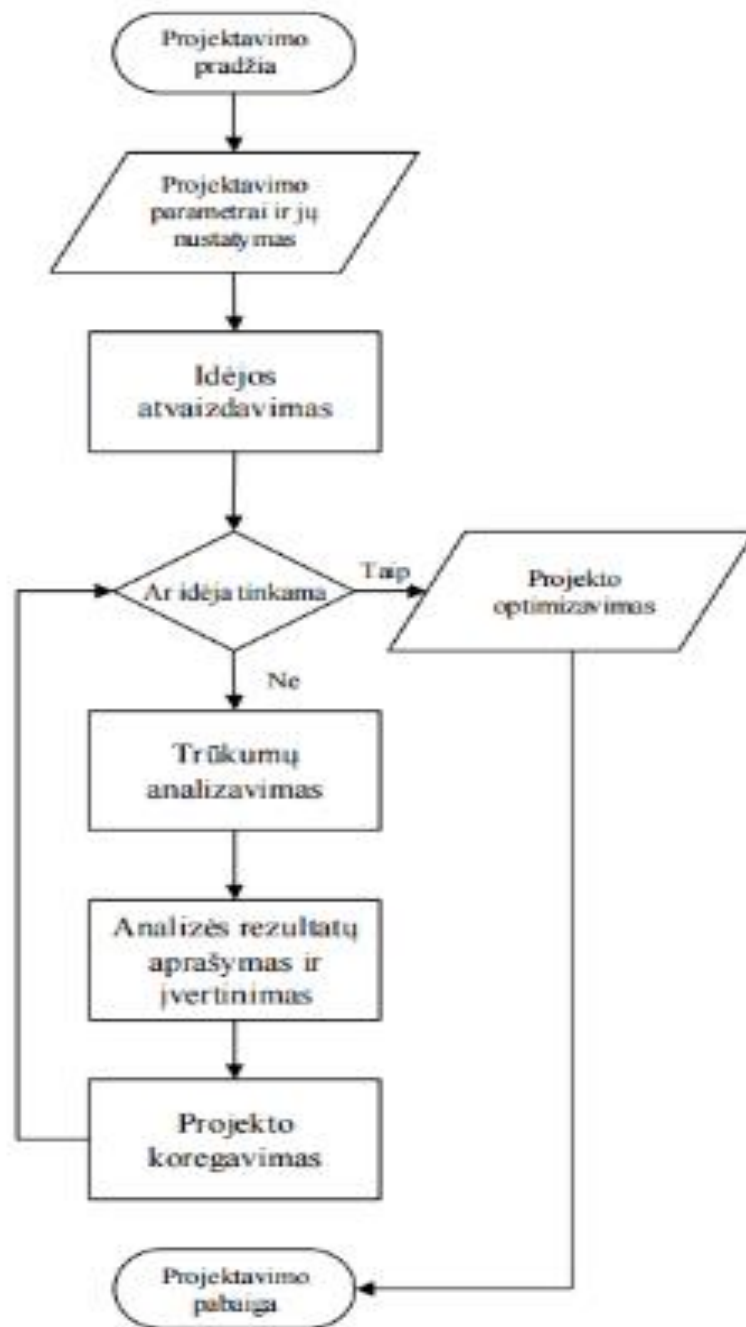
- Suprojektuoti stakles kurių, darbinė eiga: X – ašies kryptimi 500 mm, Y – ašies kryptimi 350 mm, Z – ašies kryptimi 250 mm.
- Apdirbimo tikslumas $\pm 0,1$ mm.
- Pritaikymas apdirbti ruošinius iš plastiko, medžio ir aliuminio.
- Įrenginio projektavimas vykdomas „Solidworks„ programa.
- Standartinių detalių parinkimas.
- Nestandartinių detalių konstravimas ir gamyba.
- Įrenginio mechaninės – elektrinės – elektroninės pasistemių surinkimas.
- Mechaninės – elektrinės – elektroninių pasistemių suderinimas.
- Eksperimentinių bandymų – tyrimų atlikimas, rezultatų analizė, stalų X, Y ir Z poslinkių paklaidų matavimas.
- Matavimo konstrukcinių trūkumų analizavimas.
- Projekto koregavimas.
- Projekto pabaiga.

Staklių ašių eigos X ašies kryptimi 400 mm, Y ašies kryptimi eiga 250 mm ir Z ašies kryptimi 200 mm ašių eigos, kurios buvo pasirinktos pagal norimo apdirbti ruošinio gabaritus. Projektuojamas prototipinis modelis, kuris bus naudojamas nedidelėms detalėms apdirbti, iš medžio, plastiko ir aliuminio.

Tiltinė (portalinė) staklių rėmo konstrukcija priimta atsižvelgus į atliktą literatūros analizę, kurioje aprašoma ši konstrukcija kaip viena iš standžiausių vertikalinių frezavimo staklių rėmo konstrukcijų [8].

SPV staklėms parinktos pavaros išnagrinėjus pramonėje ir buityje naudojamas pozicionavimo pavaras, pastebėta, kad vežimėlių pozicionavimui naudojama krumpliaštinė pavara, bet plačiausiai paplitusi SPV staklių pavara yra sraigto – veržlės su riedėjimo elementais, kuri pasižymi dideliu naudingumu koeficientu, sukuria didelę pozicionavimo jėgą. Svarbus parametras sraigto žingsnis kuris nusako pozicovavimo tikslumą ir sraigto diametrą. Parinktas sraigto diametras 16 mm, žingsnis 5 mm, šio tipo sraigčiai dažniausiai naudojami mėgėjiškose staklėse. Šių sraigtų trūkumas, kad jie neturi įveržimo veržlės kuri pašalintų laisvumą pavaroje (laisvumas iki 0,01 mm) [12].

Sraigtams sukimo momentą perduodantys hibridinis ŽEV 1,8° žingsnio, pasirinktas dėl didelio tikslumo, ir sąlyginai nedidelės kainos.



2.1 pav. Projekto įgyvendinimo algoritmas

Riedėjimo trinties kreipiančios parenkamos, atsižvelgus į jų nedidelį riedėjimo trinties koeficientą. Pagrindiniai kreipiančiųjų elementai, bėgelis ir kariatėlė, neturi laisvumo radialine kryptimi.

Rėmo konstrukcijai panaudoti aliuminiai profiliai, nes juos technologiškai lengva jungti.

Staklių suklio variklis pasirenkamas su skysčio aušinimu, tai apsaugo variklį nuo perkaitimo.

Tvirtinimo stasas parenkamas, su T formos grioveliais, kad būtų patogų tvirtinti ruošinį, panaudojant tvirtinimo kaladėles, su T formos varžtais.

ŽEV laikikliai kartu projektuojami su guoliavetėmis atraminiais radialiniais guoliams, kurie įtvirtina sraigatą nejudamai ašine kryptimi. Taip pat neapkrauna, ŽEV rotoriaus ašine jėga, kas sutrumpintų ŽEV variklių guolių tarnavimo laiką ir įtakotų pozicionavimo netikslumus.

Z ašies pozicionavimui numatyta panaudoti du ŽEV, kurių vienas yra pagrindinis, o kitas seka pagrindinio ŽEV pasisukimą, taip užtikrinant tolygų Z suporto darbą.

Y ašies kryptimi sukli pozicijuoti numatyta panaudoti du ŽEV, vietoje vieno galingesnio, kad būtų paskirstytas tolygiai svoris, ant Z suporto abiejuose suporto galuose.

X ašimi, numatyta panaudoti viena ŽEV variklių stalui pozicijuoti X ašies kryptimi.

Staklių valdiklis parinktas suderinamas su „Mach3“ programa. Panaudojant šį programinį paketą įdiegtą į personalinį kompiuterį, kuriuo galima valdyti ŽEV, per valdymo plokštę. Ši programa turi daugeli technologinių funkcijų, kurios naudojamos pramoninių SPV staklių valdyme.

2.2 Pagrindinio suklio parinkimas

Staklėmis bus apdirbami ruošiniai iš plastiko, medžio ir aliuminio. Didžiausia pjovimo jėga reikalinga apdirbti aliuminiui ir jo lydiniams. Pagal šios medžiagos charakteristikas, atliekami skaičiavimai, kad nustatyti pjovimo parametrus ir reikalingą suklio galią.

Pagrindinės charakteristikos medžiagos AL MG 3:

Stiprumas gniuždant pjovimo režimu $k_{c1,1} = 780 \text{ N/mm}^2$

Stiprumo riba $\sigma_{sr} < 200 \text{ N/mm}^2$

Iš „GARANT“ katalogo [24] parenkame įrankį, pagal medžiagą ir frezavimo tipą. Parinkta freza yra 10 mm diametro skirta grioveliui frezuoti. Galinės frezos numeris pagal „GARANT“ katalogą yra: 202243 (2.2.1 pav.)

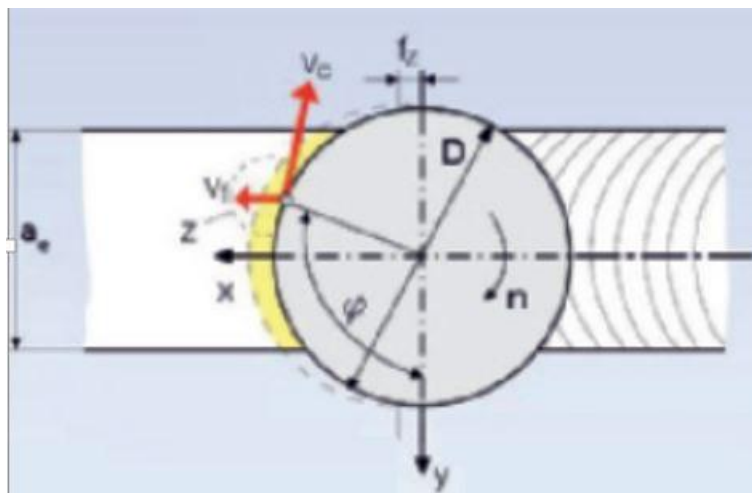
Aprašymas: Ekscentrinis pjovimo dantų užgalandinimas. Papildomai **poliruoti** drožlių grioveliai, kuriais **puikiai pasižalina** ilgos aliuminio drožlės.

Tinka/ v _c [m/min]	Al	Al	Al	PMMA	PEEK	AFK	PVDF	PA 66	PEEK	PTFE	Hibridas	Korinė	MMC	GFK	CFK	Ti	Inconel®	GJS	ADI	max	min	Oras	
	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	K				
ISO-kodas:	20 2243 / 2244	190	150	120	180	130	110																

Ø h6 D _C	h ₁	h ₂	D ₄	L _{ges}	h ₆	Koto forma	f _z	f _z
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10	22	16	30	58	9,2	72	100	10

2.2.1 pav. galinės frezos pagrindiniai parametrai [25].

Skaičiuojame pjovimo jėgas (2.2.2 pav.).



2.2.2 pav. Technologinės frezavimo operacijos schema [24]

Pastūma skaičiuojama (1)

$$S_m = f_z \cdot z \cdot n \quad (1)$$

$$S_m = 0,04 \cdot 3 \cdot 6051 = 726 \text{ mm/min}$$

čia danties pastūma frezuojant griovelį $f_z = 0,04 \text{ mm}$

frezos dantų skaičius $z = 3$

pastūmos greitis $n = 6051 \text{ aps/min}$

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 190}{\pi \cdot 10} = 6051 \text{ aps/min}$$

čia $v_c = 190 \text{ m/min}$ [25]

frezos skersmuo, $d=10 \text{ mm}$

Patiksliname pjovimo jėga, formulė

$$k_c = \frac{k_{c1,1}}{h_m^m} = \frac{780}{0,018^{0,23}} = 1965,09 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

Čia m gradientas liestines, $m = 0,23$

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s^\circ} \cdot f_z \cdot \sin \kappa \cdot \frac{a_e}{D} = 0,018$$

Čia φ_s° kampas, tarp apdirbamo ruošinio ir frezos, freza dirba visu darbiniu pločiu, tai pjovimo kampas $\varphi_s^\circ = 180^\circ$

κ – frezos priekinis kampas, $\kappa = 45^\circ$

a_e dirbančios frezos plotis $a_e = 10 \text{ mm}$

Pagrindinė pjovimo jėga randama, formulė [24]

$$F_{cmz} = b \cdot h_m \cdot k_c \cdot K_y \cdot K_v \cdot K_{ver} = 230,64 \text{ N/mm}^2$$

čia drožlės plotis, $b = \frac{a_p}{\sin \kappa} = 5,67 \text{ mm}$

pjovimo gylis parenkamas iš katalogo $a_p = 4 \text{ mm}$ [24]

korekcinis koeficientas įvertinantis frezos darbinio kampo nukrypimą $K_y = 1$ [24]

koeficientas korekcinis pjovimo greičiui $K_v = 1,15$ [24]

koeficientas korekcinis įvertinantis įrankio dilimą $K_{ver} = 1$ [24]

Pjovimo galią apskaičiuojame pagal formulę (3):

$$P = \frac{F_{cmz} \cdot v_c \cdot Z_i}{60000} \quad (3)$$

$$P = \frac{230,64 \cdot 190 \cdot 1,5}{60000} = 1,1 \text{ kW}$$

Čia frezos dantų, kurie tiesiogiai kontaktuoja frezavimo metu, skaičius apskaičiuojamas, formulė:

$$z_{iE} = \frac{\phi_{s-z}}{360^\circ} = 1,5$$

Apskaičiuota galia = 1,1 kW

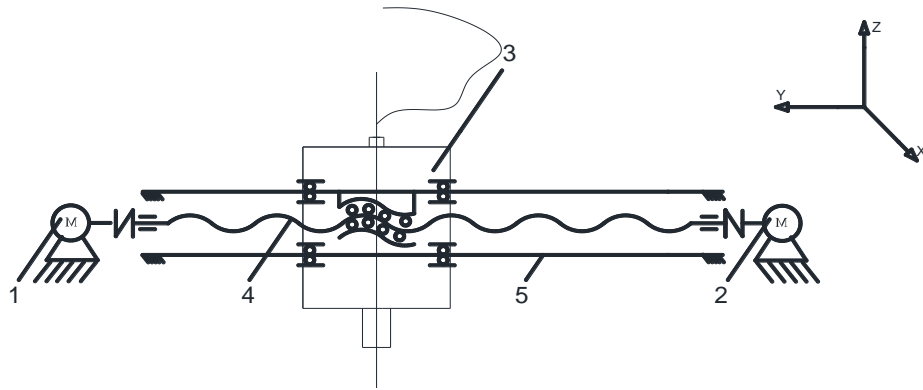
Parinktas suklio variklis SK 80–1,50 LC–24K Ø 80 x 220 pagrindiniai parametrai:

- galia 1,5 kW;
- įtampa 220 V;
- srovė 7 A;
- dažnis iki 400 Hz;
- maksimalus sukimosi greitis 24000 aps/min.

2.3 Žingsninio elektros variklio parinkimas

Labiausiai paplitę hibridiniai žingsniniai elektros varikliai, kurių žingsnio kampas $1,8^\circ$, dėl efektyvumo, didelio rotoriaus pasukimo tikslumo ir mažų gabaritų. Sraigtinė pavara su ŽEV yra aukšto patikimumo posistemė [26].

Skaičiuojame ŽEV Y ašies kryptimi sūklio pozicionavimui reikiamą sukimo momentą. Pavaros pagrindiniai elementai (2.3.1 pav.).



2.3.1 pav. Pagrindiniai vertikalaus Z suporto elementai.

1 ir 2 – ŽEV, 3 – suklys, 4 – VSP su riedėjimo elementais, 5 – riedėjimo trinties kreipiančiosios.

Riedėjimo sraigto veržlės pavaros inercijos momentas apskaičiuojamas pagal formulę (4):

$$J_1 = \frac{1}{8} \cdot m_1 \cdot D_1^2 \quad (4)$$

čia sraigto skersmuo $D_1 = 16 \text{ mm}$

sraigto masė, $m_1 = 1,5 \text{ kg}$

$$J_1 = \frac{1}{8} \cdot 0,71 \cdot 0,16^2 = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Suklio masės inercijos momentas redukuotas prie variklio, apskaičiuojamas pagal formulę [5]:

$$J_2 = m_2 \cdot \left(\frac{p_s}{2 \cdot \pi} \right)^2 \quad (5)$$

$$J_2 = 10 \cdot \left(\frac{0,005}{2 \cdot 3,14} \right)^2 = 6,34 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Redukuotas suminis inercijos momentas, lygus [27].

$$J_L = J_1 + J_2$$

$$J_L = 4,8 \cdot 10^{-5} + 6,34 \cdot 10^{-6} = 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

suklio su laikikliu masė, $m_2 = 10 \text{ kg}$

Čia sraigto žingsnis, parinktas pagal projektavimo duomenis: per vieną pilną apsisukimą $2 \pi \text{ rad}$ ŽEV rotorius padaro 3200 mikrožingsnių. Sraigto žingsnis $p_s = 5 \text{ mm}$.

Projektuojant kvazioptimalią pavarą, sraigto žingsninis skaičiuojamas pagal formulę [28].

$$P_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{J_l + J_m}} \approx 9 \text{ mm} \quad (6)$$

Pagal staklių funkcinę paskirtį, priimtas sraigto žingsnis $p_s = 5\text{mm}$.

Per vieną žingsnį, poslinkis apskaičiuojamas

Čia J_m dviejų ŽEV masės inercijos momentas, $J_m = 16,2 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ [29]

J_L judančio suporto su sukliu ir sraigto masių inercijos momentų suma, J_L

Pagal staklių funkcinę paskirtį, priimtas sraigto žingsnis $p_s = 5\text{mm}$.

Žingsninis variklis per vieną apsisukimą padaro 3200 žingsnius. Kai toks ŽEV prijungtas prie sraigto kurio žingsnis $p_s = 5 \text{ mm}$. Tai suklys pasisukus ŽEV per vieną žingsnį pajudės atstumu skaičiuojamu pagal formulę:

$$l_1 = \frac{p_s \cdot 3200}{360^\circ}$$

$$l_1 = \frac{5 \cdot 3200}{360^\circ} \approx 0,05\text{mm}$$

Apkrovos momentas laiku $t_1 = t_2 = 0,05 \text{ s}$ (2.3.2 pav.), greitėjimo metu, neįvertinus apkrovos trinties momento, dėl mažo trinties koeficiento $\mu = 0,005$ [27]:

$$T_{a1} = J_L \cdot \frac{\omega_a}{t_1} \quad (7)$$
$$T_{a1} = 5,4 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{420}{0,05} = 0,43\text{N} \cdot \text{m}$$

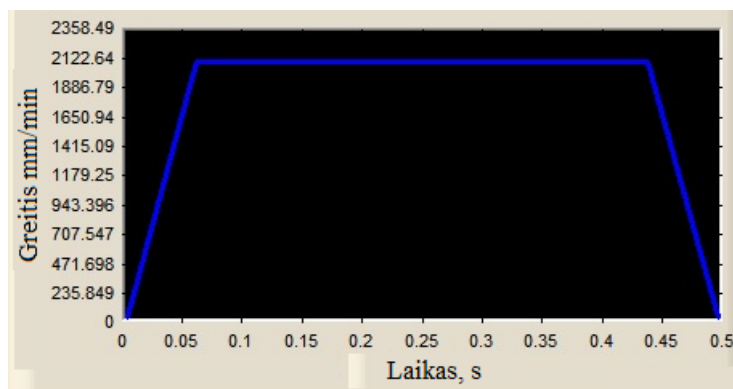
čia kampinis greitis $\omega = \frac{v_1}{p_s} = \frac{2100}{5} = 420 \text{ aps/min}$

Apkrovos momentas laiku $t_1 = t_2 = 0,05\text{s}$, lėtėjimo metu, neįvertinus apkrovos trinties momento, dėl mažo trinties koeficiento $\mu = 0,005$ [27]:

$$T_{a2} = J_L \cdot \frac{\omega_a}{t_2}$$
$$T_{a2} = -5,4 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{420}{0,05} = -0,43\text{N} \cdot \text{m}$$

čia kampinis greitis $\omega = \frac{v_2}{p_s} = \frac{2100}{5} = 420 \text{ aps/min}$

Pavaroje parenkami du vienodi ŽEV „WANTAI 57BYGH115–003“ kurių bendras sukimo momentas $6 \text{ N} \cdot \text{m}$.



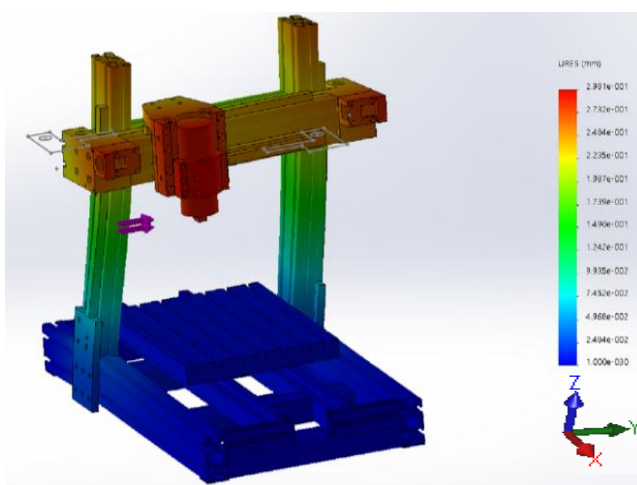
2.3.2 pav. ŽEV rotoriaus greičio kitimo laike grafikas (trapezinis valdymo dėsnis), paimta iš „Mach3“ valdymo programos.

2.4 Rėmo kolonų stipruminė analizė

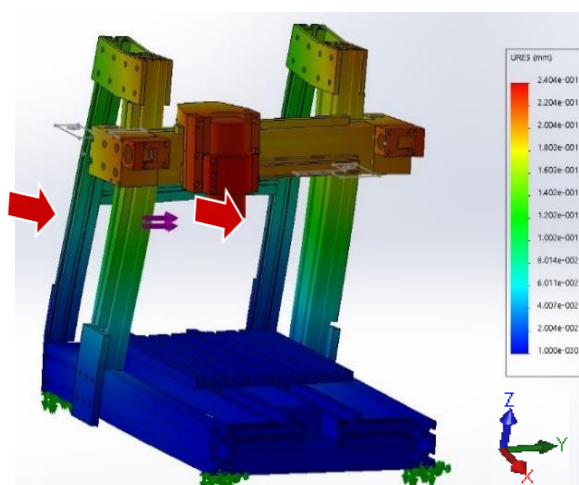
Technologinės sistemos standumu vadinamas sistemos pasipriešinimas tampriajam poslinkiui veikiant apkrovos jėgoms[6].

Pasirinkta tiltinė staklių rėmo konstrukcija, nes ji yra standesnė, lyginant su konsolinio tipo rėmine konstrukcija. Sukurtas SPV staklių modelis. Sukurtam modeliui pridedama jėga 1200 N prie pjovimo įrankio Y ašies kryptimi, (jėga pasirinkta iš laboratorinių darbų metodikos, naudojamos rankinio valdymo staklių standumui nustatyti). [30]. Stebima kaip deformuojasi konstrukcija, įvertinta kuriose vietose atsiranda didžiausi poslinkiai, į tai atsižvelgus atliekamas konstrukcijos sutvirtinimas. Staklių deformaciją matuojame statiškai. [6].

Pirmame etape pasirinkta konstrukcija, su dviem kolonomis Antrame etape siekiant sumažinti dviejų kolonų poslinkius nuo apkrovos, kolonos buvo sutvirtinamos papildomai pridedant dvi atramas. Sumodeliuota ir atlikta statinė analizė dviem atvejais, rezultatai matomi (2.4.1 pav., 2.4.2 pav.).



2.4.1 pav. Kolonų statinė analizė

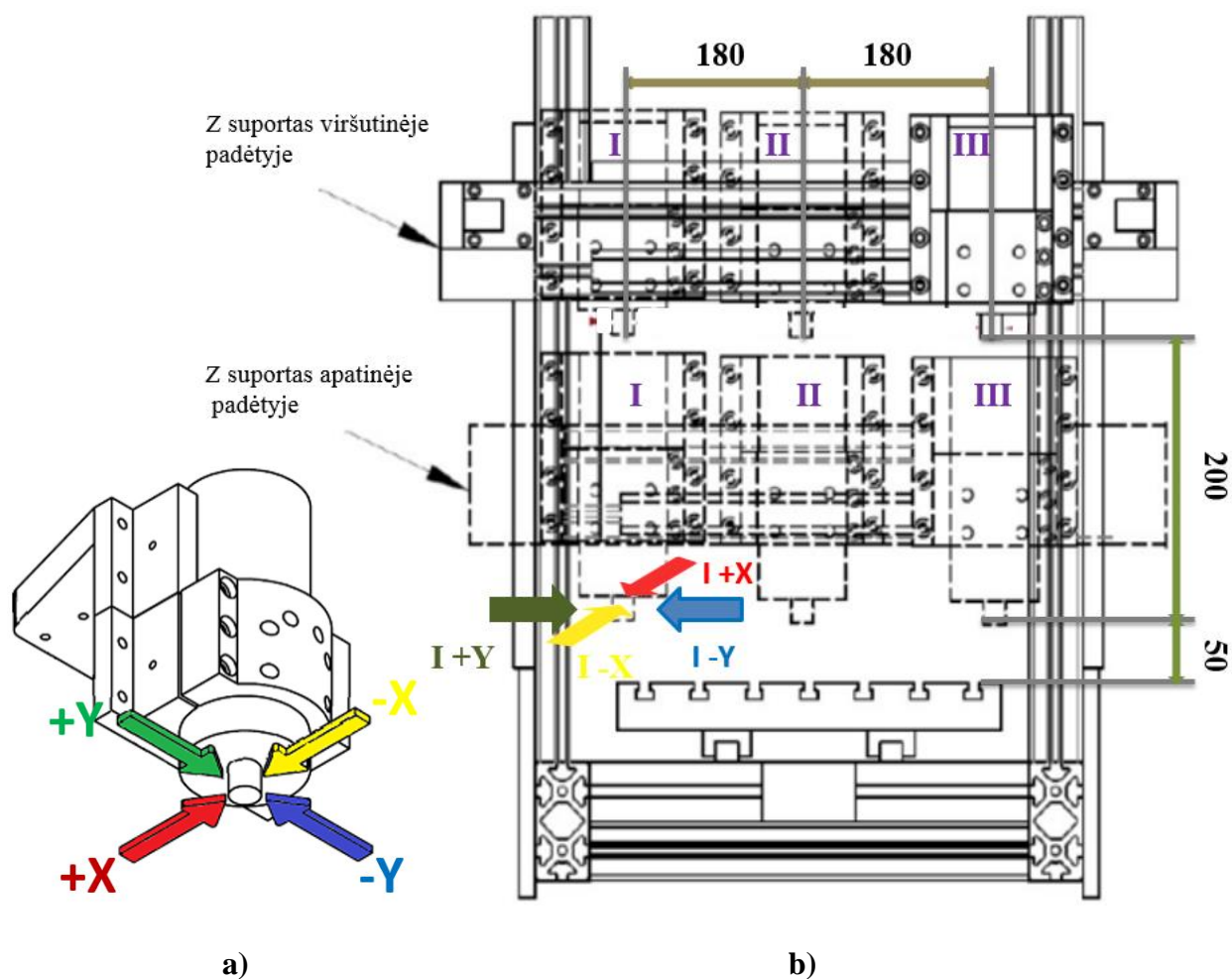


2.4.2 pav. Kolonų su atramomis statinė analizė

Staklių kolonos be atramų pridėta jėga Y ašies kryptimi suklio didžiausias poslinkis 0,29 mm. Sutvirtinus kolonas, papildomai pridėdant dvi atramas, suklio poslinkis sumažėja iki 0,24 mm.

Tiriant staklių suklio poslinkius, suklys buvo apkraunamas XY plokštumoje 1200 N jėga keturiomis skirtingomis kryptimis. Taip suklys buvo apkraunamas 6–ose skirtingose padėtyse ir sumodeliuoti 24 skirtingi stipruminės analizės atvejai.

Suklys perstumiamas kas 180 mm Y ašies kryptimi, trimis padėtimis, ir atitinkamai keliant Z ašies kryptimi 200 mm, dviem padėtimis. (jėgų pridėjimo atvejai parodyti 2.4.3 pav.).

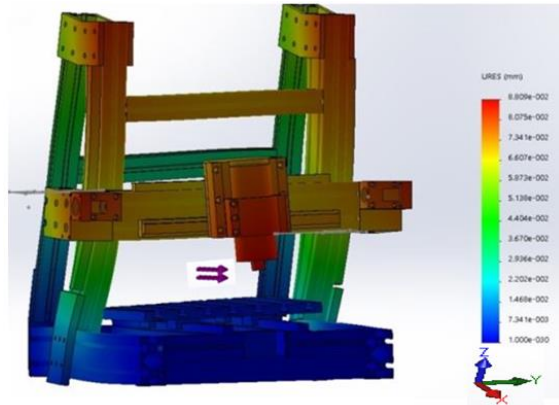


2.4.3 pav. Pavaizduotos 6 suklio pozicijos:

a) – prie suklio pridėtos jėgos kryptys, pažymėti 4 skirtingi atvejai; b) – suklio pastatymo atvejai (staklių vaizdas iš priekio)

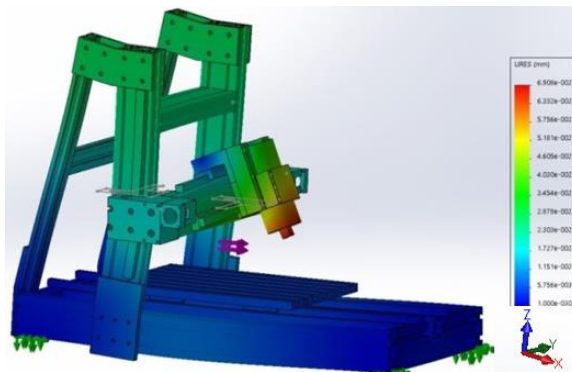
Paveikslėliuose pateikti modeliavimo atvejai (2.4.4–2.4.7 pav.), kai Z suportas yra žemutinėje padėtyje, o suklys yra vidurinėje stalo padėtyje, jėgos pridėjimo kryptis pavaizduota rodykle. Kiti atvejai pateikti (1 Priede).

Jėgos veikimo kryptis +Y, didžiausias suklio poslinkis 0,088 mm (2.4.4 pav.).



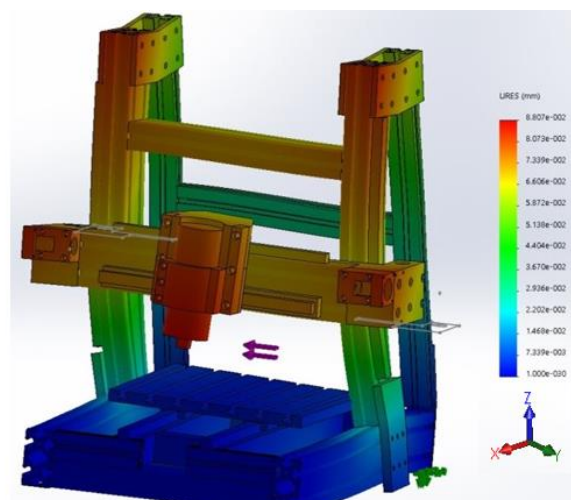
2.4.4 pav. Kolonų su atramomis statinė analizė (II +Y)

Jėgos veikimo kryptis + X, didžiausias suklio poslinkis 0,069 mm (2.4.5 pav.).



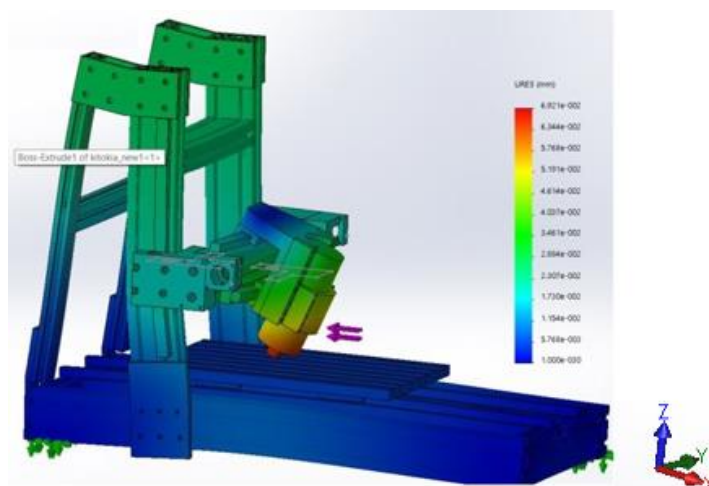
2.4.5 pav. Kolonų su atramomis statinė analizė (II +X)

Jėgos veikimo kryptis -Y, didžiausias suklio poslinkis 0,088 mm (2.4.6 pav.).



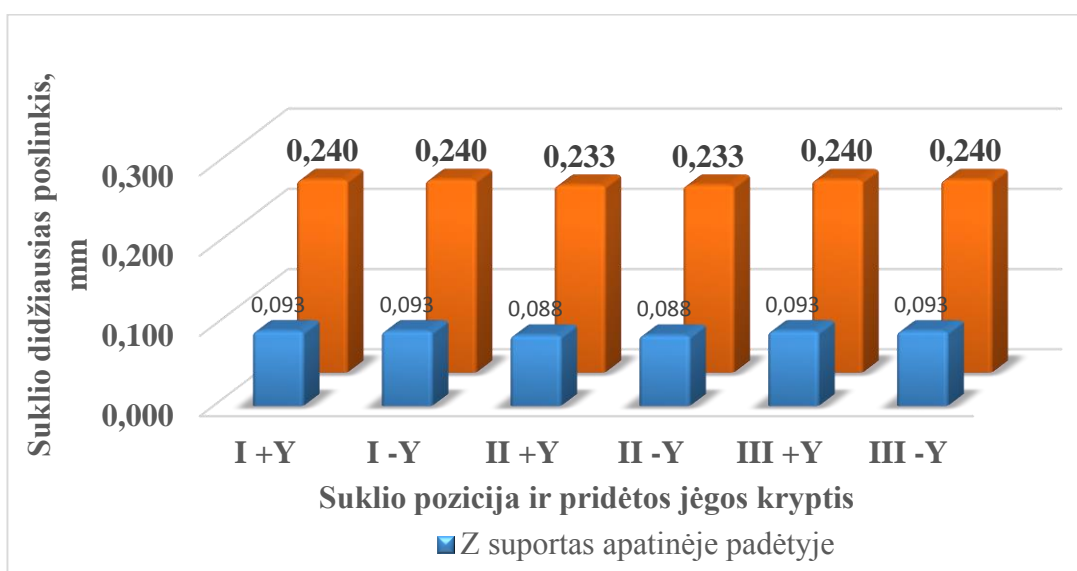
2.4.6 pav. Kolonų su atramomis statinė analizė (II -Y)

Jėgos veikimo kryptis - X, didžiausias suklio poslinkis 0,069 mm (2.4.7 pav.).



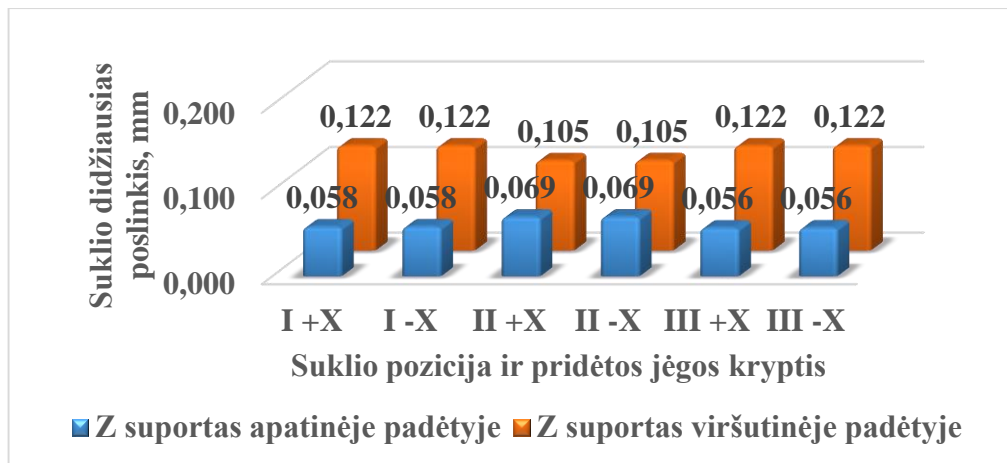
2.4.7 pav. Kolonų su atramomis statinė analizė (II –X)

Modeliuoti 24 skirtingi atvejai ir nustatytos didžiausi suklio poslinkiai, duomenys pavaizduoti grafiškai, romėniški skaičiai abscisių ašyje nusako suklio pozicija, o jėgos pridėtos prie suklio kryptį nusako simboliai+Y; -Y ir +X; -X (2.4.8 pav. ir 2.4.9 pav.). Iš duomenų histogramų nustatyta, kai 1200 N jėga pridėta prie suklio Y ašies kryptimi, kad didžiausias suklio poslinkis yra 0,24 mm (2.4.8 pav.), kai Z suportas nustatytas viršutinėje padėtyje (aukštyje nuo stalo 250 mm) ir suklys randasi kraštinėse padėtyse (180 mm nuo stalo centro).



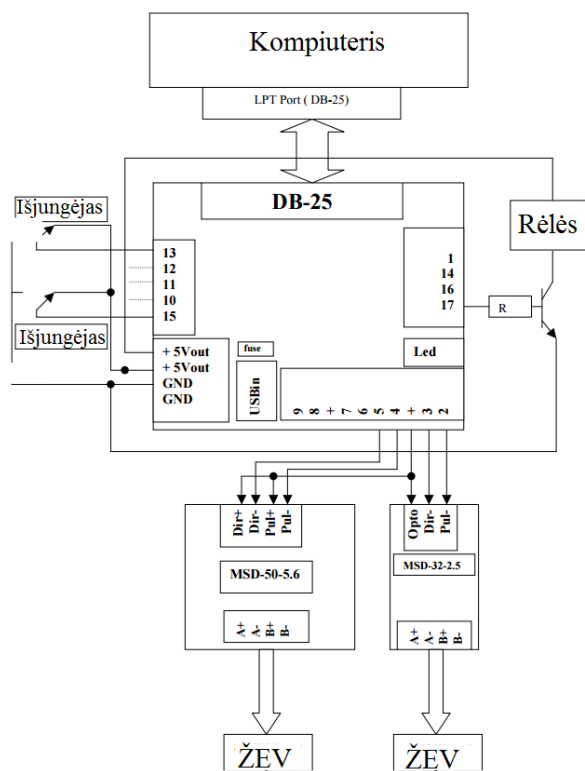
2.4.8 pav. Suklio poslinkio priklausomybė, nuo pridėtos jėgos pozicijos Y ašimi.

Iš duomenų histogramų nustatyta, kai 1200 N jėga pridėta prie suklio X ašies kryptimi kad mažiausias suklio poslinkis yra 0,056 mm (2.4.9 pav.), kai Z suportas nustatytas apatinėje padėtyje (aukštyje nuo stalo 50 mm) ir suklys randasi dešininėje stalo padėtyje (180 mm nuo stalo centro).



2.4.9 pav. Suklio poslinkio priklausomybė, nuo pridėtos jėgos pozicijos, X ašimi

2.5 Principinė SPV staklių ŽEV jungimo schema



2.5.1 pav. ŽEV principinė valdymo schema [31]

Pagrindiniai elementai (2.5.1 pav.):

- Led – valdymo plokštės maitinimo indikatorius (žmogus mašina sąsaja).
- DB – 25 jungtis – jungianti PLV esantį LPT išėjimą.
- Įėjimo kontaktai – jungiami plokštėje, kontaktuose pažymėtose skaičiais 10, 11, 12, ir 15.
- Žingsnių skaičiaus reguliavimo ir rotoriaus krypties jungtys – sujungiami su ŽEV valdikliais, kontaktai pažymėti skaičiais nuo 2–9 valdymo plokštėje.
- Rėliniai išėjimai – skirti valdyti, ŽEV fazių komutaciją.

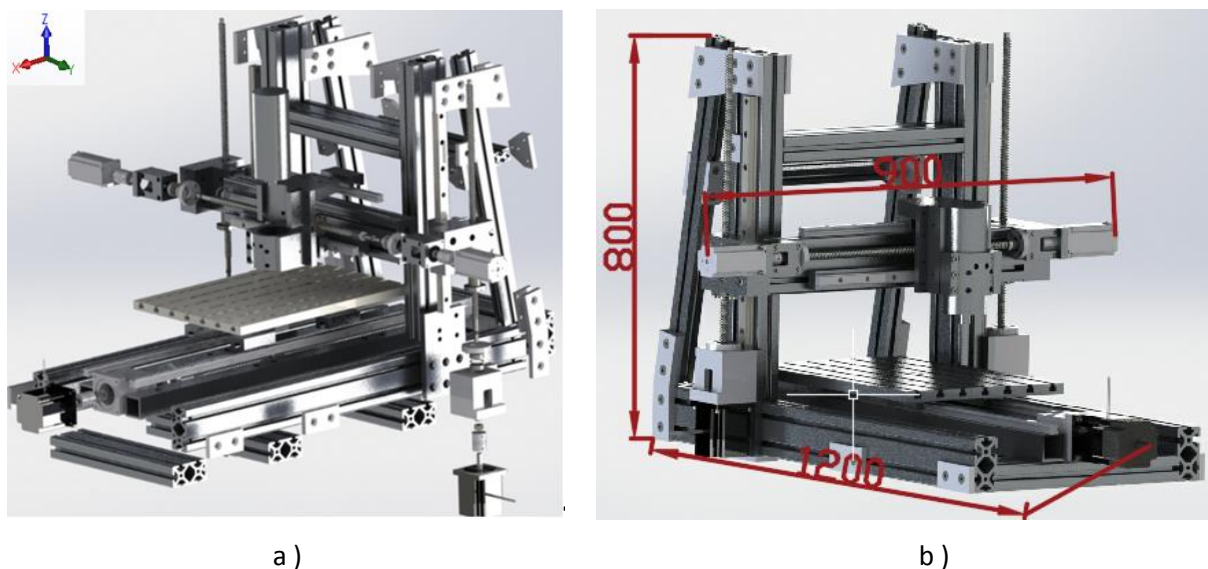
2.6 SPV staklių prototipo gamyba

Projektavimas ir realaus prototipo gamyba pradėta vykdyti 2014 metų vasarą ir truko apie du metus.

Išskirti keturi staklių gamybos etapai:

1. Standartinių detalių pirkimas: aliuminiai profiliai, stalas su T – formos grioveliais, ŽEV, movos, guoliai, kreipiančiosios, riedėjimo sraigtinės pavaros ir kt.
2. Nestandartinių detalių gamyba: rėmo tvirtinimo elementai, ŽEV laikikliai, suklio laikiklis ir kitos nestandartinės dalys.
3. Mechaninės dalies surinkimas (2.6.1 pav.): Rėmo profiliai tarpusavyje jungiami varžtais, staklių mazgai ir detalės tvirtinamos prie rėmo naudojant varžtus.
4. Elektrinės dalies montavimas: Laidų pajungimas staklėse į suklij, į ŽEV, į galinės padėties daviklius ir į valdymo bloką.

Staklių masė 120 kg., įrenginio matmenys: aukštis 800 mm, plotis 900 mm, ilgis 1200 mm.



2.6.1 pav. Staklių vaizdas

a – surinkimo vaizdas; b – bendras vaizdas su gabaritinais matmenimis

Atlikus ekonominius skaičiavimus buvo įvertinta pasigamintų staklių kaina apie 3000 eur. Didžiąją dalį staklių kainos sudaro, aliuminio profiliai iš kurių surinktas visas staklių rėmas, taip pat kreipiančiųjų sistemos su sraigto varžlės pavaromis, žingsniniai elektros varikliai su valdymo blokais, ir suklys su dažnio keitikliu.

Rinkoje panašių SPV staklių, su panašiomis mechaninėmis sistemomis kaina siekia 4500 eur.

3. TYRIMŲ DALIS

3.1 Kompiuteriu nustatomo matmens paklaidos tyrimas

3.1.1 Koordinatės paklaidos radimo metodika

Sistemos dėsniai kintančios paklaidos gali veikti apdirbimo tikslumą nuolatos arba periodiškai. Nuolatinės paklaidos pavyzdžiu gali būti apdirbamosios detalės matmens paklaida dėl nustatyto pjovimo įrankio matmens dilimo. Periodinės dėsniai kintančios paklaidos pavyzdžiu gali būti šiluminės įrankio įtaiso ar staklių deformacijos, veikiančios įšilimo laikotarpiu, kol nusistovi pastovi temperatūra. Jeigu yra žinomas sistemos dėsniai kintančios paklaidos dėsnis, jo veikimo periodas ir aplinkybės, tokią paklaidą galima sumažinti, arba visai jos išvengti. [23].

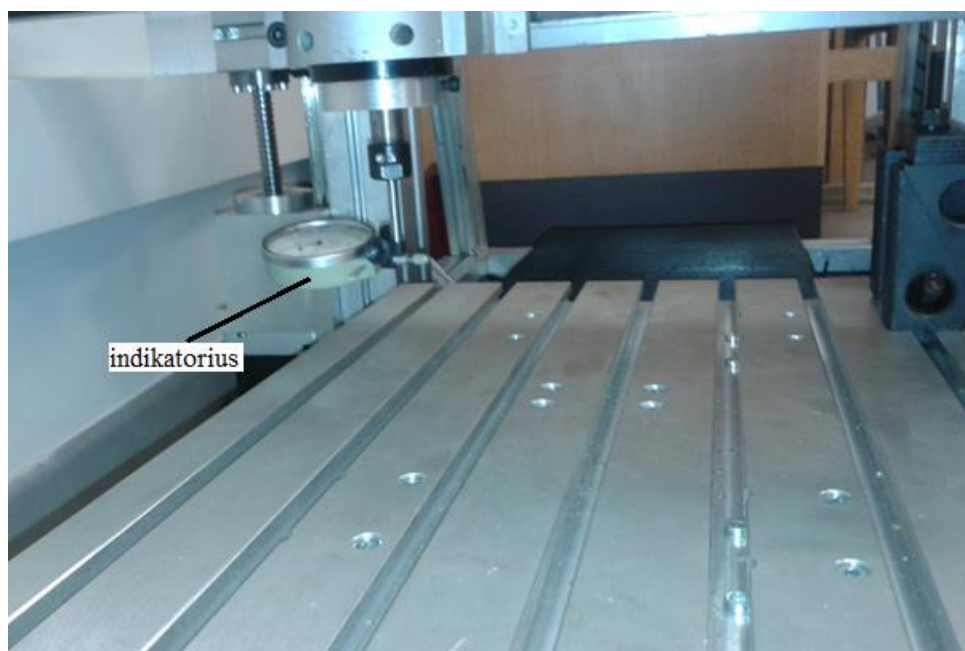
Kompiuterio pagalba nustatomo matmens paklaida yra atsitiktinė paklaida, priklausanti nuo daugelio atsitiktinių veiksnių: trinties jėgos dydžio mazgo kreipiančiuose, pastūmos kinematinės grandies standumo, sraigtinės poros nudilimo, laisvumo, sraigto žingsnio netikslumo [31]. Taip pat nuo pačio žingsnio variklio, jo valdymo ir kt. Ši matmens paklaidos nustatymo metodika neįvertina sraigto žingsnio, bet kadangi šios paklaidos nėra didelės todėl eksperimento rezultatai yra gana tikslūs [30].

Tyrimų atlikimo tvarka:

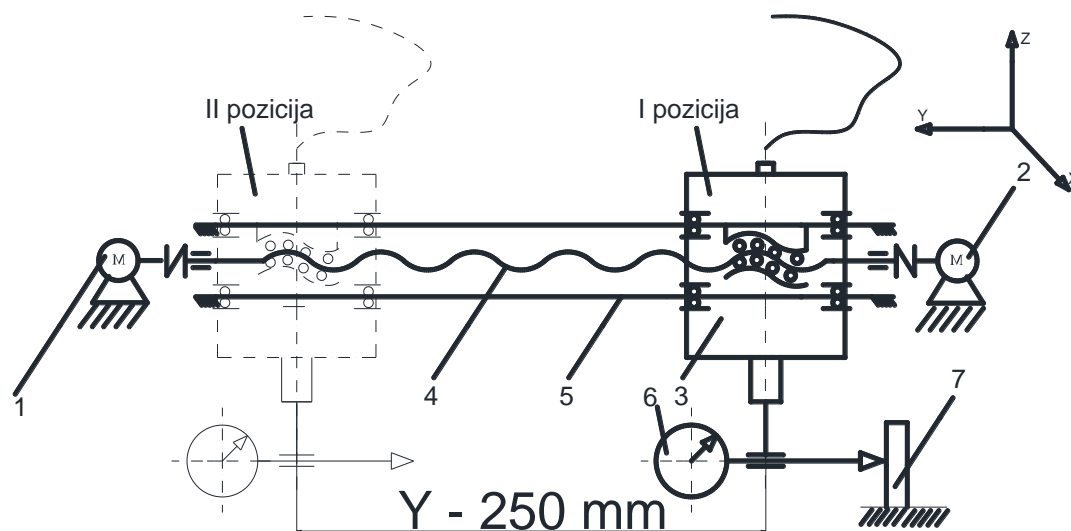
1. Buvo tvirtinamas indikatorius ant rėmo ir suklio, matavimams atlikti.
2. Nustatome judamajame staklių mazge indikatorius su įvarža taip, kad indikatorius rodytų iki 0,3 mm.
3. Nustatome indikatoriuje nulinę padėtį.
4. Kompiuteryje valdymo programoje pažymime, kad tai yra ašies 0.
5. Tada programoje nustatome pasirinktą atstumą, ir įjungiamo pavarą kuri atlieka judesį pasirinktos ašies kryptimi.
6. Staklių mazgą gražiname į pradinę padėtį ir užsirašome indikatoriaus rodmenis.
7. Matuojant su bekontakčiu jutikliu, užsirašome išėjimo įtampą.
8. Matavimai X, Y ir Z ašių kryptimis kartojami po 50 kartų.
9. Pozicionavimo greitį pasirenkame Y ir X ašimis 2200 mm/min, o Z ašiai 1100 mm/s. Greičiai parenkami pagal technologinius pjovimo režimus.

3.1.2 Pozicionavimo paklaidos matavimai Y ašies kryptimi

Suklys 2200 mm/min greičiu pozicionuojamas Y ašies kryptimi, 250 mm eiga iš I pozicijos į II poziciją ir atgal, pozicijos pavaizduotos schemoje (3.1.2 pav.). I pozicijoje registruojami indikatoriaus parodymai (3.1.1 lent.). Tyrimas atliekamas 50 kartų. Indikatoriaus tvirtinimo ir matavimo standas (3.1.1 pav.).



3.1.1 pav. Indikatoriaus tvirtinimo standas



3.1.2 pav. Y ašimi matavimo stendo schema

1,2 – ŽEV, 3 – suklys, 4 – VSP su riedėjimo guoliais, 5 – riedėjimo trinties kreipiančiosios, 6 – mikrometrinis indikatorius, 7 – įtvirtinta matavimo atrama.

Mikrometrinio indikatoriaus 1 МИГ techninės charakteristikos:

Padalos vertė – 0,001 mm;

Matavimo ribos – 0 – 1 mm.

Pavaros sraigto techninės charakteristikos:

Žingsninis variklis „NEMA 23“, žingsnis 1,8°;

Riedėjimo sraigto skersmuo 16 mm, o žingsnis 5 mm.

3.1.1 lentelė. Y ašies pozicionavimo paklaidos

Mat. Nr.	Rodmuo, μm	Mat. Nr.	Rodmuo, μm	Mat. Nr.	Rodmuo, μm	Mat. Nr.	Rodmuo, μm	Mat. Nr.	Rodmuo, μm
1	0	11	-2	21	0	31	4	41	-3
2	-4	12	2	22	1	32	0	42	2
3	0	13	-2	23	-5	33	3	43	-1
4	-4	14	1	24	0	34	0	44	-3
5	-1	15	3	25	-3	35	-5	45	1
6	-2	16	4	26	4	36	2	46	-1
7	0	17	0	27	0	37	6	47	6
8	-3	18	-2	28	4	38	6	48	8
9	2	19	-1	29	1	39	-2	49	-1
10	1	20	-5	30	-4	40	3	50	3

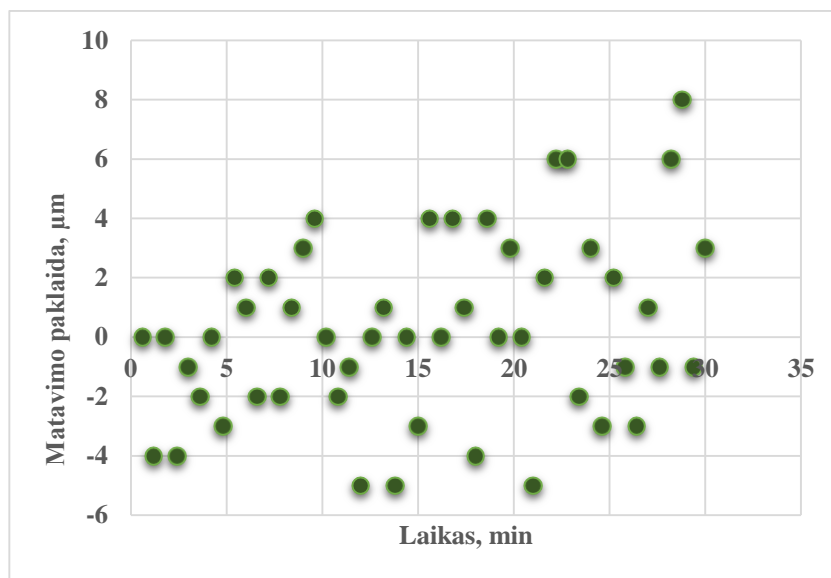
Mažiausia reikšmė: $-5\mu\text{m}$, didžiausia reikšmė: $8\mu\text{m}$.

Pagal gautus matavimo duomenis apskaičiuojame atsitiktinio dydžio vidutinę reikšmę \bar{x}_{Y1} naudojantis formule (8) ir standartinį nuokrypį σ_{Y1} pagal formulę (9).

$$\bar{x}_{Y1} = \frac{\sum_{i=1}^{100} x_i \cdot m_i}{n} = 0,26\mu\text{m} \quad (8)$$

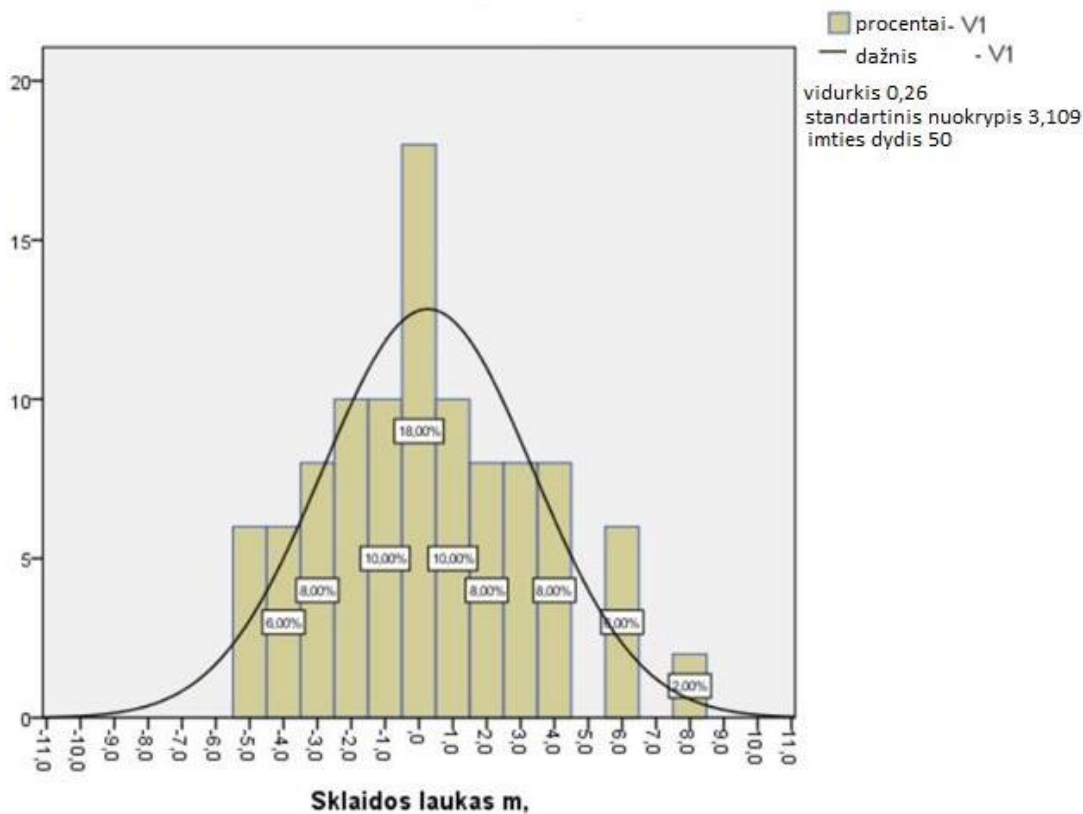
$$\sigma_{Y1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x})^2 \cdot m_i}{n}} = 3,109\mu\text{m} \quad (9)$$

Matavimai atlikti per 35 min, matavimo paklaidos pasiskirstymas laiko atžvilgiu grafiškai pavaizduotas (3.1.3 pav.).



3.1.3 pav. Paklaidos sklaida, Y ašies indikatorius rodmenų gautų per laiko intervalą

Matavimai grafiškai įvertinti nusibraižius, standartizuotųjų liekanų histogramą (3.1.4 pav.). Matome, kad standartizuotųjų liekanų histograma yra pakankamai simetriška, su normaliojo pasiskirstymo kreive suderinta.



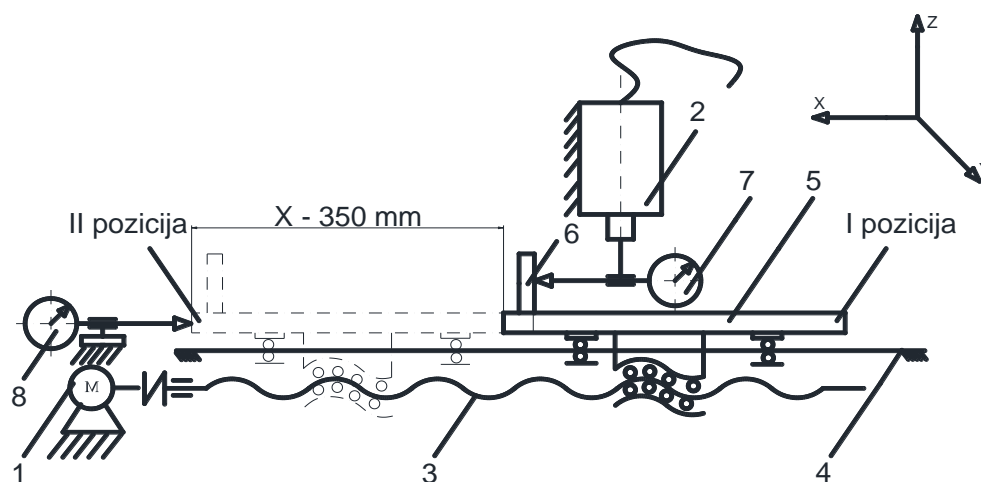
3.1.4 pav. Standartizuotųjų liekanų histograma

3.1.3 Pozicionavimo paklaidos matavimai X ašies kryptimi

Tvirtinimo stalas 2200 mm/min greičiu pozicionuojamas X ašies kryptimi, 350 mm eiga iš I pozicijos į II poziciją ir atgal. Stalo pozicijos pavaizduotos schemoje (3.1.2 pav.). I ir II pozicijoje registruojami pirmo ir antro indikatoriaus parodymai (3.1.2 lent.). Tyrimas atliekamas 50 kartų. Indikatoriaus tvirtinimo ir matavimo stendas (3.1.5 pav.):



3.1.5 pav. Matavimų stendas su dviem indikatoriais



3.1.6 pav. X ašimi pozicionavimo paklaidos matavimo stendo schema, su dviem indikatoriais

1 – ŽEV, 2 – suklys, 3 – VSP su riedėjimo guoliais, 4 – riedėjimo trinties kreipiančiosios, 5 – tvirtinimo stalas, 6 – įtvirtinta matavimo atrama, 7 – mikrometrinis indikatorius 1, 8 – mikrometrinis indikatorius 2.

Mikrometrinis indikatoriaus 1 МИГ techninės charakteristikos:

Padalos vertė – 0,001 mm, matavimo ribos – 0 – 1 mm.

Pavaros sraigto techninės charakteristikos:

Žingsninis variklis „NEMA 34“, žingsnis 1,8°;

Riedėjimo sraigto skersmuo 20 mm, o žingsnis 5mm.

3.1.2 lentelė. Matavimo rezultatai, paklaidų X ašies, išmatuoti su dviem mikrometriniais indikatoriais.

Mat. Nr.	Rodmuo, μm		Mat. Nr.	Rodmuo, μm		Mat. Nr.	Rodmuo, μm	
	1 indik.	2 indik.		1 indik.	2 indik.		1 indik.	2 indik.
1	0	0	18	2	-4	35	1	-5
2	1	-1	19	2	-3	36	1	2
3	2	-2	20	1	0	37	1	-2
4	0	-2	21	1	-1	38	2	-2
5	1	1	22	2	-4	39	3	0
6	1	1	23	1	-1	40	1	0
7	1	2	24	2	0	41	1	-2
8	1	0	25	1	0	42	0	-2
9	1	-2	26	1	3	43	1	-1
10	2	3	27	2	1	44	1	-3
11	1	-4	28	2	-1	45	0	0
12	0	-2	29	3	-1	46	1	-1
13	1	-1	30	2	1	47	2	-1
14	2	-4	31	3	-1	48	0	0
15	2	0	32	1	1	49	0	-4
16	1	-2	33	1	3	50	0	0
17	2	0	34	2	0	–	–	–

Mažiausia reikšmė: $-5\mu\text{m}$, didžiausia reikšmė: $3\mu\text{m}$.

Pagal gautas matavimo reikšmes pirmo indikatoriaus, apskaičiuojame atsitiktinio dydžio vidutinę reikšmę \bar{x}_{X1} ir vidutį kvadratinę nuokrypį σ_{X1} .

$$\bar{x}_{X1} = \frac{\sum_{i=1}^{100} x_i \cdot m_i}{n} = 1,26\mu\text{m}$$

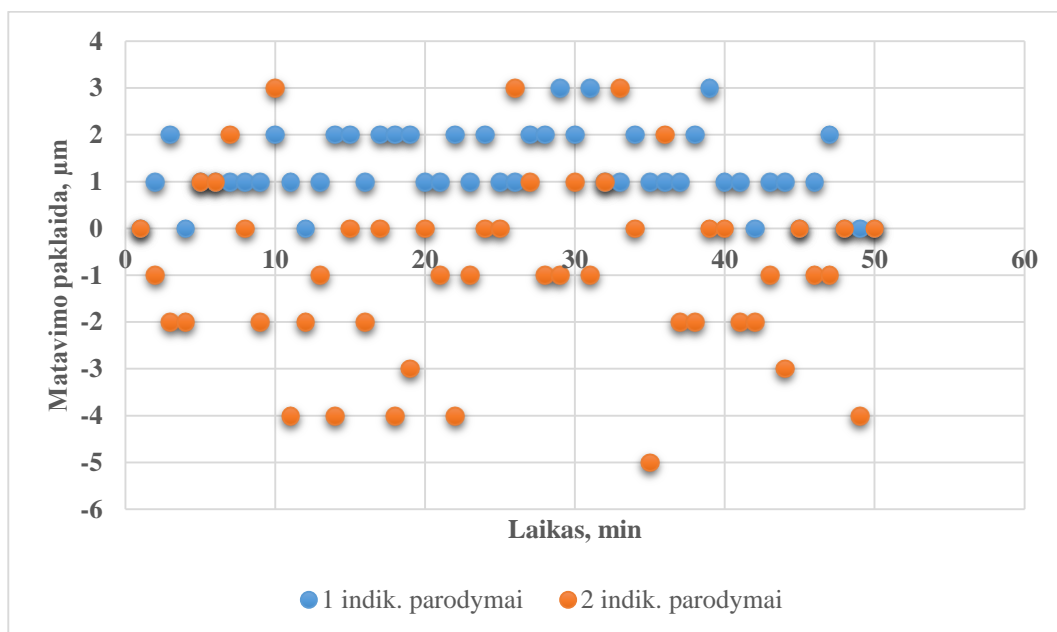
$$\sigma_{X1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x})^2 \cdot m_i}{n}} = 0,803\mu\text{m}$$

Pagal antro indikatoriaus duomenys, apskaičiuojame atsitiktinio dydžio vidutinę reikšmę \bar{x}_{X2} ir vidutinę kvadratinę nuokrypą σ_{X2} .

$$\bar{x}_{x_2} = \frac{\sum_{i=1}^{100} x_i \cdot m_i}{n} = 0,82 \mu\text{m}$$

$$\sigma_{x_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x})^2 \cdot m_i}{n}} = 1,892 \mu\text{m}$$

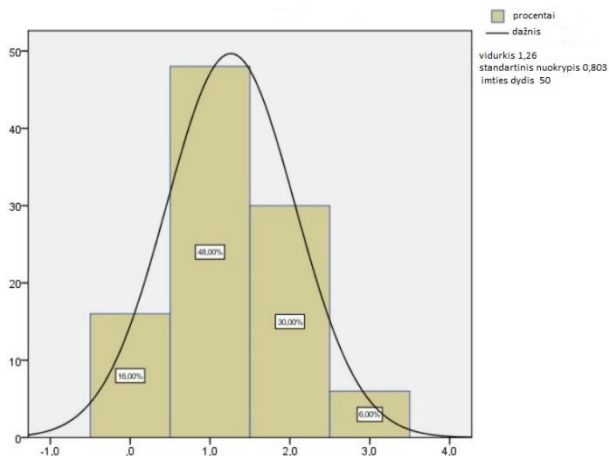
Matavimai atlikti per 50 min, matavimo paklaidos pasiskirstymas laiko atžvilgiu grafiškai pavaizduotas (3.1.7 pav.).



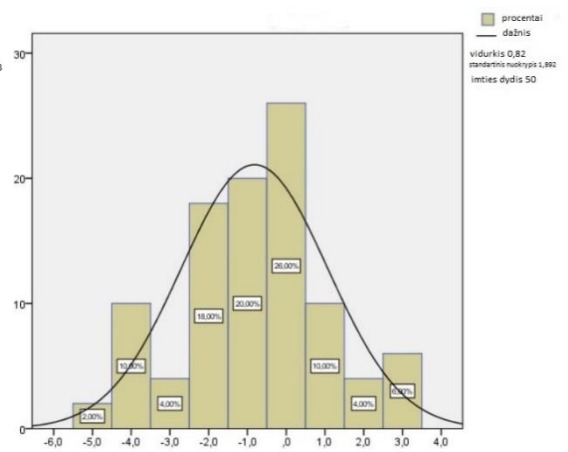
3.1.7 pav. Matavimo rezultatų gautų matuojant dviem indikatoriais paklaidos sklaida X ašimi, per laiko intervalą

Siekiant nustatyti ryšį tarp pradinės ir galinės stalo padėties pozicionavimo paklaidos, yra skaičiuojamas Pirsono koreliacijos koeficientas, naudojant „IBM SPSS Statistic“ programa. Gauta koreliacijos reikšmė lygi 0,009, tarp matuotų parametų ryšys neegzistuoja.

Matavimai grafiškai įvertinti nusibraizius, standartizuotųjų liekanų histogramas (3.1.8 pav.). Matome, kad standartizuotųjų liekanų histogramos yra pakankamai simetriškos, su normaliojo skirstinio kreive suderinta.



a



b.

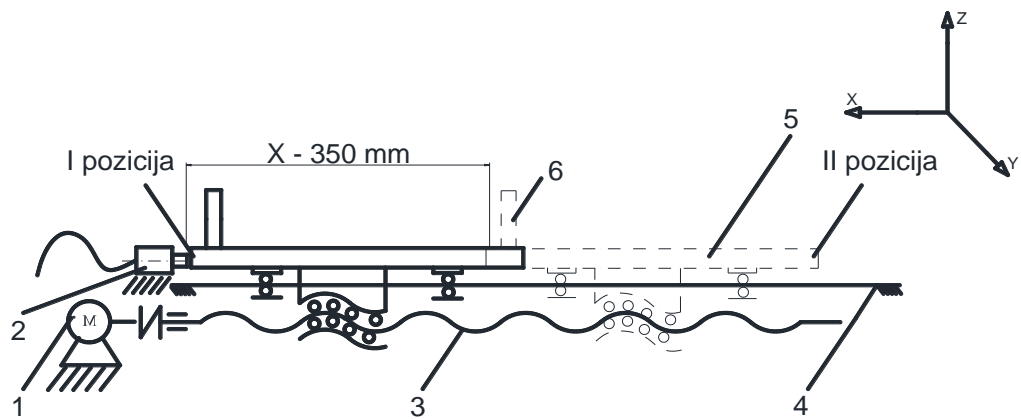
3.1.8 pav. Standartizuotųjų liekanų histograma a – 1 indikatoriaus rodmenys; b – 2 indikatoriaus rodmenys.

3.1.4 Pozicionavimo paklaidos matavimai bekontakčiu jutikliu X ašies kryptimi

Atliekamas patikslintas matavimas, stalo X ašies kryptimi. Matavimo principinė schema panaudojant bekontaktį jutiklį (3.1.10 pav.). Matavimo sąlygos nesikeičia, kaip ir prieš tai matuojant su indikatoriumi. Suklys 2200 mm/min greičiu juda X ašies kryptimi, 350 mm eiga iš I pozicijos į II poziciją ir atgal. Pozicijos pavaizduotos schemeje (3.1.10 pav.). I pozicijoje registruojami osciloskope matomi parodymai (3.1.9). Tyrimas atliktas 50 kartų (3.1.3 lent.)



3.1.9 pav. Bekontaktis poslinkio matavimo jutiklis (2) tvirtinimas matavimo stende, stalo pozicionavimo paklaidai X ašimi išmatuoti naudojamas prietaisas (1 osciloskopas OX 7104)



3.1.10 pav. Indukcinio jutiklio (MS 8x1) tvirtinimo schema, stalo pozicionavimo X ašimi

1 – ŽEV, 2 – bekontaktis jutiklis, 3 – VSP su riedėjimo guoliais, 4 – riedėjimo trinties kreipiančiosios, 5 – tvirtinimo stalas, 6 – įtvirtinta matavimo atrama.

Paklaidos nustatymas panaudojant bekontaktį indukcinį jutiklį, kurio jautris $S_j=8\text{mV}/\mu\text{m}$.

3.1.3 lentelė. Matavimo rezultatai, X ašies paklaidų išmatuoti su bekontakčiu jutikliu.

Mat. Nr.	Rodmuo, V	Reikšmė, μm	Mat. Nr.	Rodmuo, V	Reikšmė, μm	Mat. Nr.	Rodmuo, V	Reikšmė, μm
1	10,22	0	18	10,22	0	35	10,21	-1
2	10,26	5	19	10,23	1	36	10,25	4
3	10,25	4	20	10,23	1	37	10,25	4
4	10,3	10	21	10,24	2	38	10,3	10
5	10,2	-2	22	10,22	0	39	10,21	-1
6	10,2	-2	23	10,19	-4	40	10,3	10
7	10,18	-5	24	10,25	4	41	10,25	4
8	10,26	5	25	10,23	1	42	10,3	10
9	10,29	9	26	10,24	2	43	10,22	0
10	10,22	0	27	10,25	4	44	10,22	0
11	10,22	0	28	10,23	1	45	10,3	10
12	10,18	-5	29	10,3	10	46	10,26	5
13	10,27	6	30	10,27	6	47	10,31	11
14	10,19	-4	31	10,26	5	48	10,3	10
15	10,21	-1	32	10,22	0	49	10,23	1
16	10,21	-1	33	10,27	6	50	10,29	9
17	10,21	-1	34	10,29	9	–	–	–

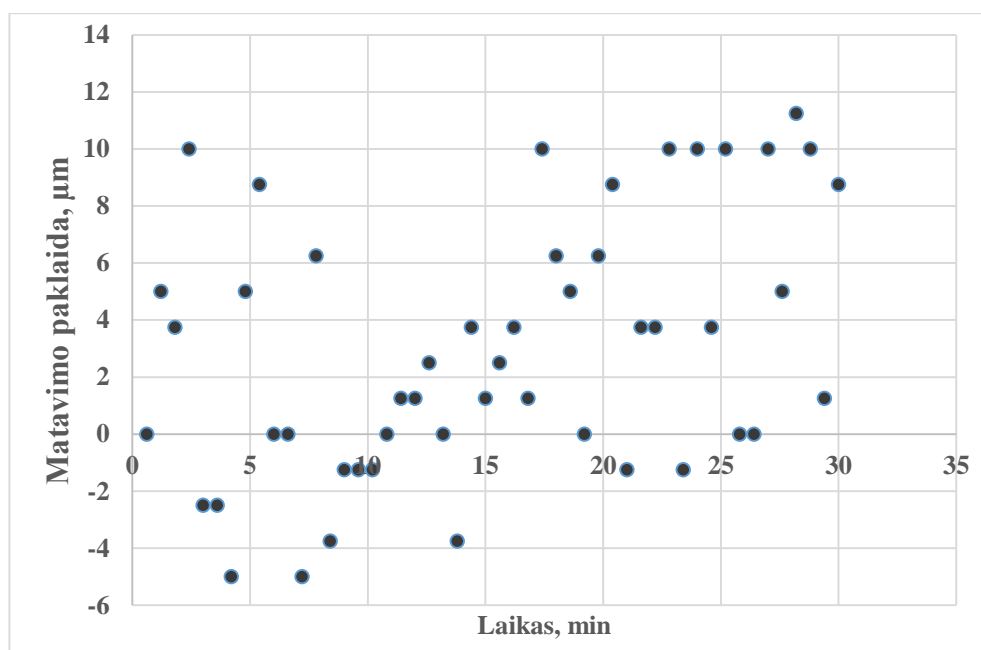
Mažiausia reikšmė $-5 \mu\text{m}$, didžiausia reikšmė $11 \mu\text{m}$.

Pagal gautas matavimo reikšmes apskaičiuoti atsitiktinio dydžio vidutinę reikšmę \bar{x} ir vidutinę kvadratinę nuokrypą σ .

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{100} x_i \cdot m_i}{n} = 3,04 \mu\text{m}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x})^2 \cdot m_i}{n}} = 4,549 \mu\text{m}$$

Matavimai atlikti per 30 min, matavimo paklaidos pasiskirstymas laiko atžvilgiu grafiškai pavaizduotas (3.1.11 pav.).

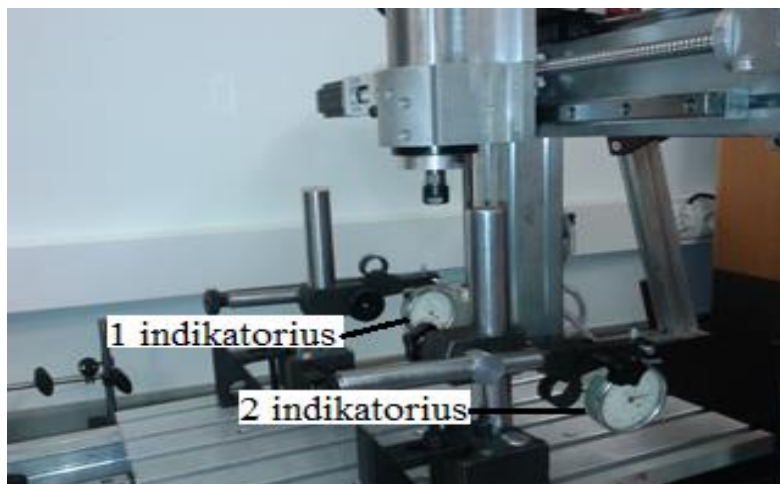


3.1.11 pav. Paklaidos sklaida X ašies matavimų su bekontakčiu jutikliu, per laiko intervalą.

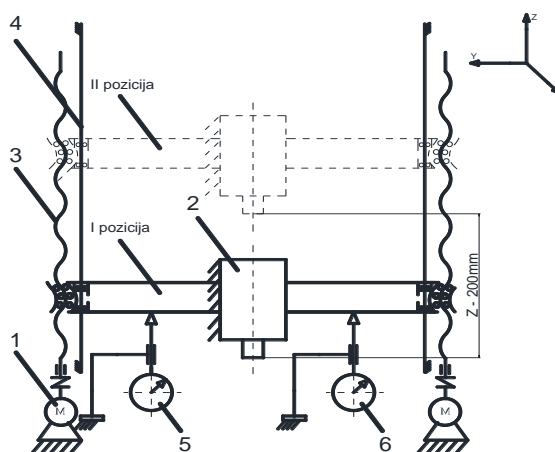
Siekiant nustatyti ryši tarp matavimų laikrodiniu indikatoriumi ir bekontakčiu jutikliu stalo pozicionavimą X ašies kryptimi, skaičiuojamas Pirsono koreliacijos koeficientas, naudojantis „IBM SPSS Statistic“ programa. Gauta koreliacijos reikšmė lygi 0,085, tai parodo, kad tarp stalo pozicionavimo paklaidos matavimų atliktų su mikrometriniu indikatoriumi ir indukciniu jutikliu ryšis yra labai silpnas. Tai parodo, kad matavimai atliekami bekontakčiu indukciniu jutikliu yra tikslesni, nei matuojant paprastu indikatoriumi kuris mechaniškai liečiasi matavimo metu, dėl to atsiranda paklaidos.

3.1.5 Pozicionavimo paklaidos matavimai Z ašies kryptimi

Vertikalus suportas 1800 mm/min greičiu pozicionuojamas Z ašies kryptimi, 200 mm eiga iš I pozicijos į II poziciją ir atgal (3.1.12 pav.). Pozicijos pavaizduotos schemoje (3.1.13 pav.). I pozicijoje registruojami indikatorius parodymai (3.1.4 lent.). Tyrimas atliktas 50 kartų.



3.1.12 pav. Indikatorių tvirtinimo stendas, vertikalaus suporto pozicionavimo paklaidoms matuoti.



3.1.13 pav. Indikatorių tvirtinimo schema, vertikalaus suporto pozicionavimo paklaidoms matuoti

1– ŽEV, 2– suklys, 3– VSP su riedėjimo guoliais, 4– riedėjimo trinties kreipiančiosios, 5– mikrometrinis indikatorius 1, 6– mikrometrinis indikatorius 2.

Mikrometrinio indikatoriaus 1МИГ techninės charakteristikos:

Padalos vertė– 0,001 mm, matavimo ribos nuo 0 iki 1mm.

Pavaros sraigto techninės charakteristikos:

Žingsninis variklis „NEMA 34“, žingsnis 1,8°;

Riedėjimo sraigtas: diametras 16mm, o žingsnis 5 mm.

3.1.4 lentelė. Matavimo rezultatai, Z ašies išmatuoti su mikrometriniu indikatoriumi.

Mat. Nr.	Rodmuo, μm		Mat. Nr.	Rodmuo, μm		Mat. Nr.	Rodmuo, μm	
	1 indik.	2 indik.		1 indik.	2 indik.		1 indik.	2 indik.
1	0	0	18	-1	3	35	-5	-3
2	0	2	19	1	2	36	-7	-5
3	1	3	20	1	3	37	-3	0
4	2	1	21	0	1	38	-6	-4
5	1	5	22	1	1	39	-1	0
6	2	2	23	-2	1	40	-5	-6
7	0	2	24	1	-2	41	-4	-2
8	1	2	25	-1	-3	42	-2	0
9	1	2	26	0	-1	43	-5	-1
10	1	2	27	1	0	44	-6	-3
11	2	3	28	-2	0	45	-2	-2
12	1	2	29	-4	-2	46	-5	-4
13	1	4	30	0	1	47	0	1
14	3	3	31	-3	-4	48	-1	0
15	1	2	32	1	-2	49	-3	-1
16	1	3	33	-1	0	50	-2	1
17	1	2	34	-3	-1	–	–	–

Mažiausia reikšmė: $-7\mu\text{m}$, didžiausia reikšmė: $5\mu\text{m}$;

Pagal gautas matavimo reikšmes pirmo indikatoriaus, apskaičiuojame atsitiktinio dydžio vidutinę reikšmę \bar{x}_{z1} ir vidutinį kvadratinį nuokrypį σ_{z1} .

$$\bar{x}_{z1} = \frac{\sum_{i=1}^{100} x_i \cdot m_i}{n} = 0,98\mu\text{m}$$

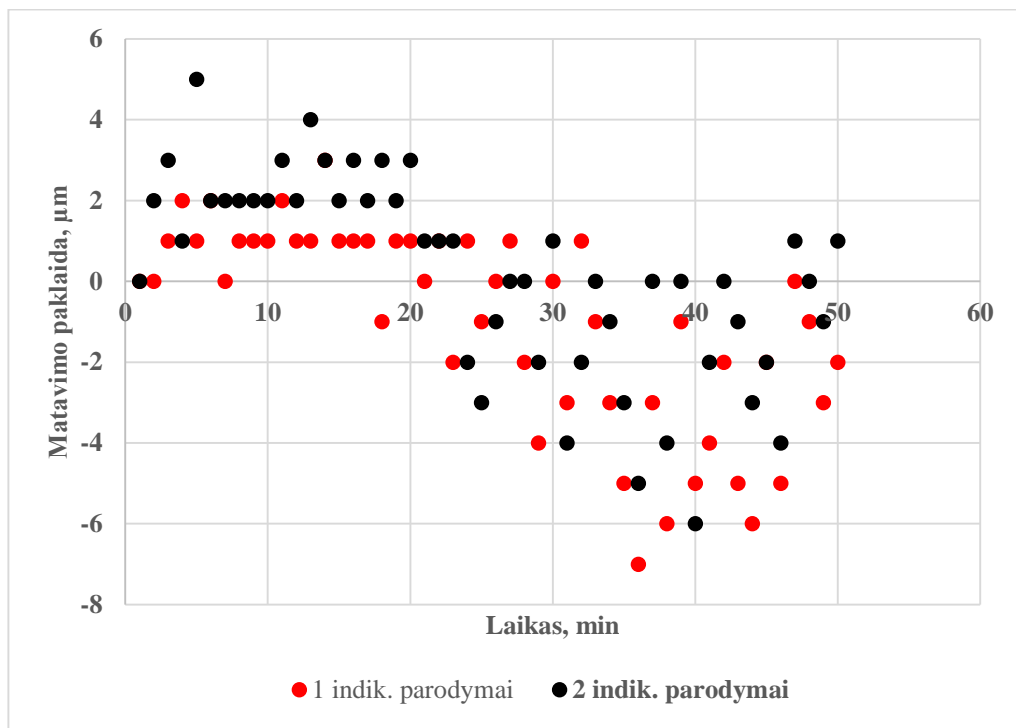
$$\sigma_{z1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x})^2 \cdot m_i}{n}} = 2,487\mu\text{m}$$

Pagal antro indikatoriaus duomenis, apskaičiuojame atsitiktinio dydžio vidutinę reikšmę \bar{x}_{z2} ir vidutinę kvadratinę nuokrypą σ_{z2} .

$$\bar{x}_{Z2} = \frac{\sum_{i=1}^{100} x_i \cdot m_i}{n} = 0,16 \mu\text{m}$$

$$\sigma_{Z2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x})^2 \cdot m_i}{n}} = 2,477 \mu\text{m}$$

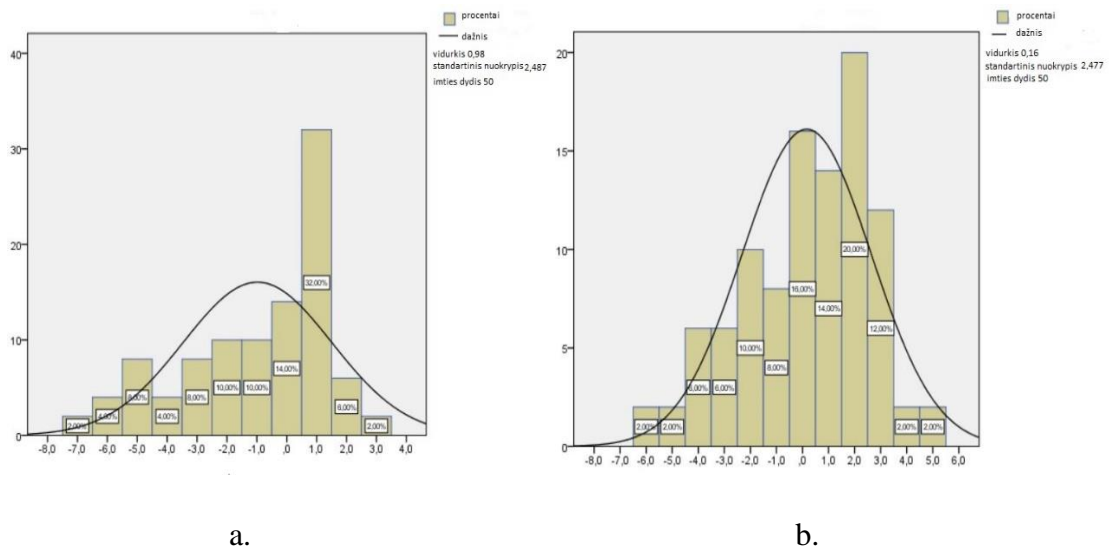
Matavimai atlikti per 50 min, matavimo paklaidos pasiskirstymas laiko atžvilgiu grafiškai pavaizduotas (3.14 pav.).



3.1.14 pav. Matavimo rezultatų gautų matuojant dviem indikatoriais paklaidos sklaida Z ašimi, per laiko intervalą

Siekiant išsiaiškinti pozicionavimo netikslumą Z ašimi, atsirandantį dėl tarpusavyje nesujungtų sraigčių – veržėls pavarų kuriems sukimą perduoda atskiri ŽEV, skaičiuojamas Pirsono koreliacijos koeficientas, naudojantis „IBM SPSS Statistic“ programa. Gauta koreliacijos reikšmė lygi 0,791. Tai parodo vidutinį ryšį tarp 1-o ir 2-o indikatoriaus matavimo rodmenų.

Matavimai grafiškai įvertinti nusibraižius, standartizuotųjų liekanų histogramas (3.1.15 pav.). Matome, kad standartizuotųjų liekanų histogramos nėra pakankamai simetriškos, ir vietomis su normaliojo skirstinio kreive nesuderintos.

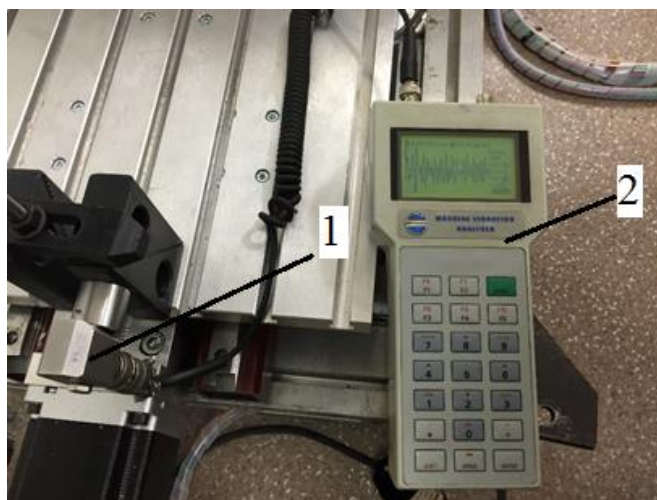


3.1.15 pav. Standartizuotųjų liekanų histograma a – 1 indikatoriaus parodymai; b – 2 indikatoriaus parodymai.

3.2 Tvirtinimo stalo judesio X kryptimi dinamikos tyrimas

Mechaniniai virpesiai mašinos, daro neigiamą įtaką mechaninio apdirbamo detalių kokybei. Tai pasireiškia matmens tolerancijų padidėjimu ir pagreitina įrankio dilimą [27].

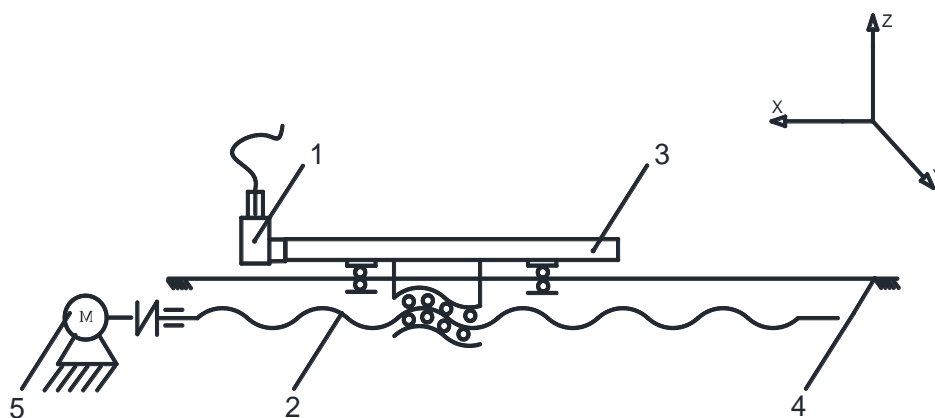
Kad nustatyti staklių tvirtinimo stalo ir jo pavaros judesio, deformacijas, virpesius ir staklių stalo mazgų surinkimo kokybę. Sraigtinės pavaros, su varikliu, ašių nelygiagretumą, centravimą, riedėjimo kreipiančiųjų nelygiagretumą, sraigtui [32]. Buvo atlikti virpesių tyrimai, bandymo stendo nuotrauka (3.2.1 pav.).



3.2.1 pav. Stalo virpesių matavimo stendas ir prietaisai

1 – pjezoakcelerometras WR 704A (JAV.), 2 – virpesių signalų analizatorius A4101 (Cz.)

Sraigtas sukamas hibridinio ŽEV, pozicionuojamas 350 mm eigoje. Pjezoakcelerometras tvirtinamas prie judančio stalo. Virpesiai matuojami stalo judėjimo kryptimi X.



3.2.2 pav. Stalo X kryptimi judesio matavimo schema.

1 – pjezoakcelerometras, 2 – VSP su riedėjimo guoliais, 3 – tvirtinimo stalas, 4 – riedėjimo trinties kreipiančiosios, 5 – ŽEV

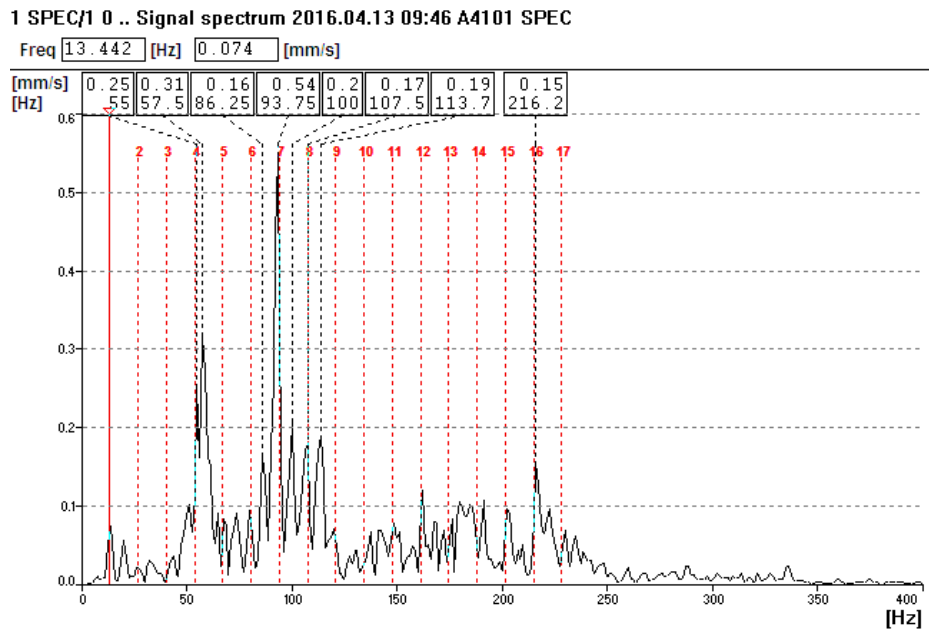
Stalo virpesius gauname $v(t)$ indentifikuojant pagal greitos Furje transformacijos (GFT) technologiją ir gauname virpesių greičio spektrą.

Pirmu matavimu stalas 1800 mm/min greičiu juda sūklio kryptimi, pirmyn. Iš gautų tyrimo rezultatų nustatyta (stalas juda pirmyn, tai yra nuo žingsninio variklio):

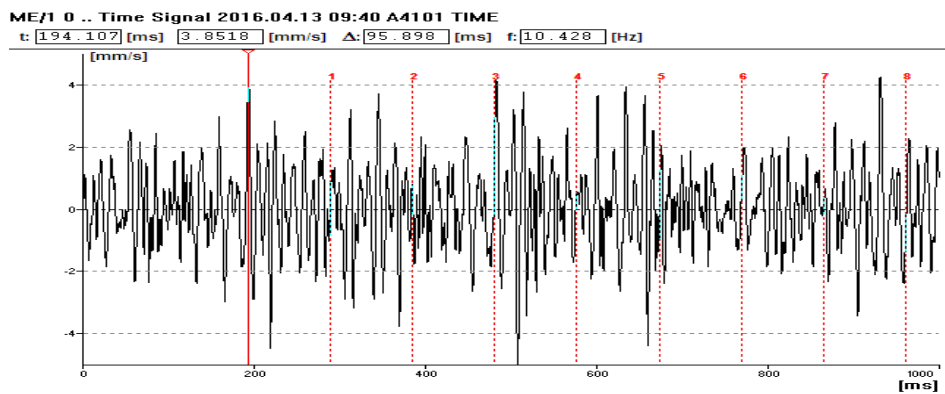
1. Elektroninio signalų generatoriaus komutacijos dažnis kinta nuo 11500 Hz iki 24770 Hz. Tai yra pagrindinė priežastis kodėl ŽEV dirba nestabiliai.

2. Iš stalo virpesių greičio spektro, pavaizduoto (3.2.3 pav.) matome, kad vyrauja stalo virpesių dažnis 93,75 Hz, virpesių greitis 0,54 mm/s ir virpesių dažnis 57,5 Hz virpesių greitis 0,31 mm/s. Tai mechaninės sistemos „stalo – sraigto“ sistemos savieji virpesiai. Šiuos virpesius sužadina ŽEV netolygi fazių komutacija.

3. Mechaninėje sraigto su riedėjimo elementais sistemoje yra radialiniai ir ašiniai tarpai. Tai rodo spektrogramoje esantys kiti dažniai. Virpesių greičio spektre pastebima daug harmonikų iki 17X. Tai parodo riedėjimo sraigto su veržle defektus (3.2.3). Tokia mechaninė sistema, ypač kai ją žadina kintamo dažnio jėgos negali pasižymėti aukštu pozicionavimo tikslumu.

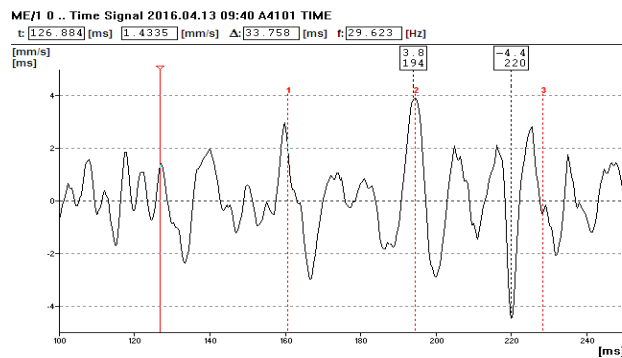


3.2.3 pav. X kryptimi judančio pirmyn staklių tvirtinio stalo virpesių greičių spektras



3.2.4 pav. X kryptimi judančio pirmyn staklių stalo virpesių greičių grafikas

29,623 Hz mechaninės sistemos virpesiai rodantys laisvumą sraigto veržlės pavaroje su riedėjimo elementais (3.2.5 pav.).



3.2.5 pav. X kryptimi judančio pirmyn staklių tvirtinio stalo virpesių greičių grafikas (padidintas 100-250 ms 3.2.3 pav.)

Riedėjimo sraigto – veržlės pavaroje X ašimi veikiančios jėgos

Riedėjimo sraigto veržlės pavara, transformuoja sukamąjį judesį į slenkamąjį. Šios pavaros turi didelį naudingumo koeficientą iki 80 % [12]. Pavaros nedidelis dilimas, mažas įšilimas, tolygi eiga. Pasižymi dideliu tikslumu, plačiai panaudojamos pramonėje.

Stalas juda pirmyn, pavaros jėgų skaičiavimo formulė [32]. Dešinio sraigto pagrindiniai parametrai, veikiančios jėgos kryptis pavaizduota (3.2.6 pav.).

Apskaičiuojame veržlės stūmimo jėgą, formulė (10)

$$F_t = F_{iv} \cdot tg(\varphi + \rho) \quad (10)$$

čia F_{iv} – sraigto veikianti jėga, ašine kryptimi, $F_{iv} = \mu \cdot m \cdot g = 0,74 \text{ N}$

m – išmatuota stalo masė, $m = 15 \text{ kg}$

g – laisvojo kritimo pagreitis, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

μ – trinties koeficientas tvirtinimo stalo kreipiančiuju, $\mu = 0,005$ [16].

φ – sraigto vijos kilimo kampas

$$\varphi = \arctg\left(\frac{p}{\pi d_1}\right) \approx 5^\circ$$

čia p – sraigto žingsnis, $p = 5 \text{ mm}$

d_1 – sraigto skersmuo, $d_1 = 20 \text{ mm}$

Apskaičiuojame trinties kampą:

$$\rho = \arctg f_s = 2,9^\circ$$

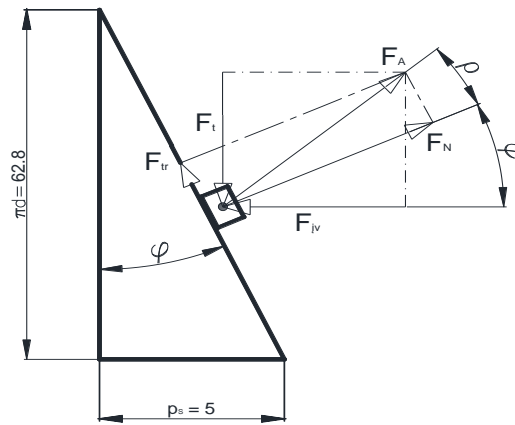
čia f_s trinties koeficientas, sraigto veržlės pavaroje, $f_s = 0,05$ [11].

$$F_{t1} = 0,74 \cdot tg(5^\circ + 2,9^\circ) = 0,0381 \text{ N}$$

Sukimo momento skaičiavimas, kai stalas juda pirmyn, formulė [33].

$$T_s = F_t \cdot \frac{d}{2} \quad (11)$$

$$T_{s1} = F_{t1} \cdot \frac{d_1}{2} = \frac{0,0381 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,000381 \text{ N} \cdot \text{m}$$



3.2.6 pav.

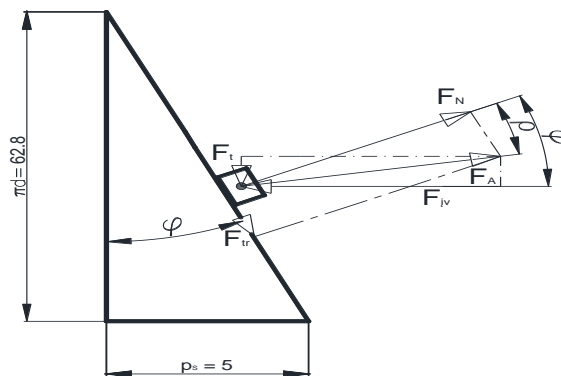
Stalas juda atgal, pavaros jėgų skaičiavimo formulė. Sraigto pagrindiniai parametrai, veikiančios jėgos kryptis pavaizduota (3.2.7 pav.).

Stalui judant atgal, veržlės stūmimo jėga skaičiuojama:

$$F_{t2} = 0.74 \cdot \operatorname{tg}(5^\circ - 2.9^\circ) = 0,027 \text{ N}$$

Sukimo momento skaičiavimas, formulė .

$$T_{s2} = F_{t2} \cdot \frac{d_1}{2} = \frac{0,027 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,00027 \text{ N} \cdot \text{m}$$



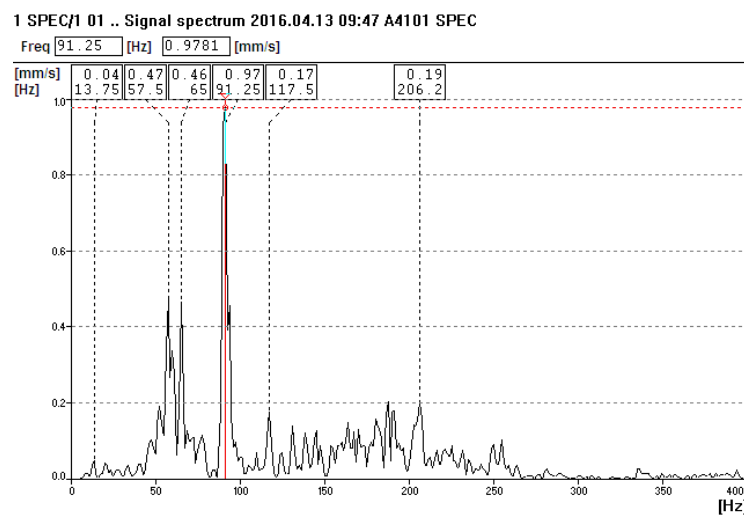
3.2.7 pav. Sriegyje veikiančių jėgų schema, kai stalas juda atgal

Iš pateiktų skaičiavimų matome, kad stalui pozicionuojant atgal reikalingas mažesnis sukimo momentas, negu pozicionuojant pirmyn. Toliau buvo atliekami virpesių matavimai. Kad nustatyti, kiek tai turi įtakos sistemos virpesiams, riedėjimo sraigto veržlės pavaros reversavimas.

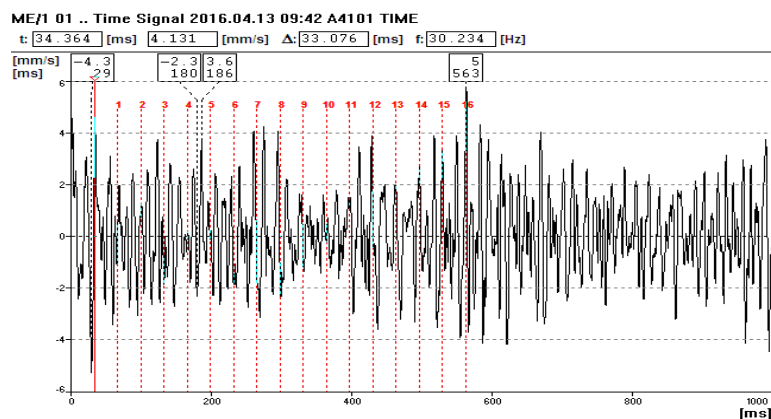
Virpesių matavimai staklių stalą pozicionuojant atgal

Virpesių greičio spektras, kai stalas juda atgal:

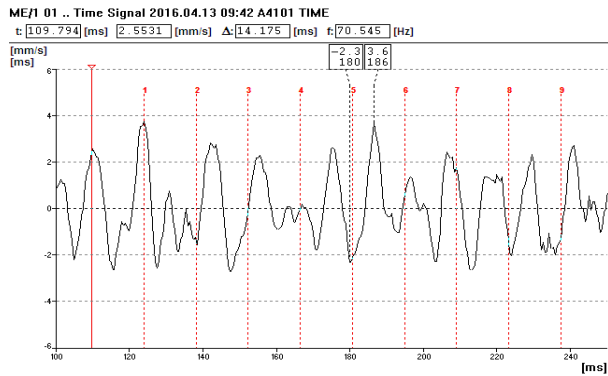
1. Elektroninių signalų generatoriaus komutacijos dažnis kinta nuo 11500 Hz iki 24770 Hz. Tai yra pagrindinė priežastis kodėl ŽEV dirba nestabiliai.
2. Iš stalo virpesių greičio spektro, pavaizduoto (3.2.8 pav.), matome, kad vyrauja stalo virpesių dažnis 91,25 Hz, virpesių greitis 0,97 mm/s ir 57,5 Hz virpesių greitis 0,47mm/s. Tai mechaninės sistemos „stalo – sraigto“ sistemos savieji virpesiai. Šiuos virpesius sužadina ŽEV netolygi fazių komutacija.
3. Mechaninėje sraigto su riedėjimo elementais sistemoje yra radialiniai ir ašiniai tarpai. Tai rodo spektrogramoje esantys kiti dažniai. Virpesių greičio spektre pastebima daug harmonikų iki 17X Tai parodo riedėjimo sraigto su veržle defektus (3.2.9). Tokia mechaninė sistema, ypač kai ją žadina kintamo dažnio jėgos negali pasižymėti aukštu pozicionavimo tikslumu. Virpesių greičio spektre harmonikų skaičius išlieka nepakitęs, dažnio 91,25 Hz virpesių greičio amplitudė vyrauja stalui judant pirmyn ir atgal (3.2.10 pav.).



3.2.8 pav. X kryptimi judančio atgal staklių tvirtinimo stalo virpesių greičių spektras.



3.2.9 pav. X kryptimi judančio atgal staklių tvirtinimo stalo virpesių greičių grafikas



3.2.10 pav. X kryptimi judančio atgal staklių tvirtinimo stalo virpesių greičių grafikas (padidintas 100-250 s, 3.2.8 pav.)

Tai rodo mechaninės pavaros darbo nestabilumą.

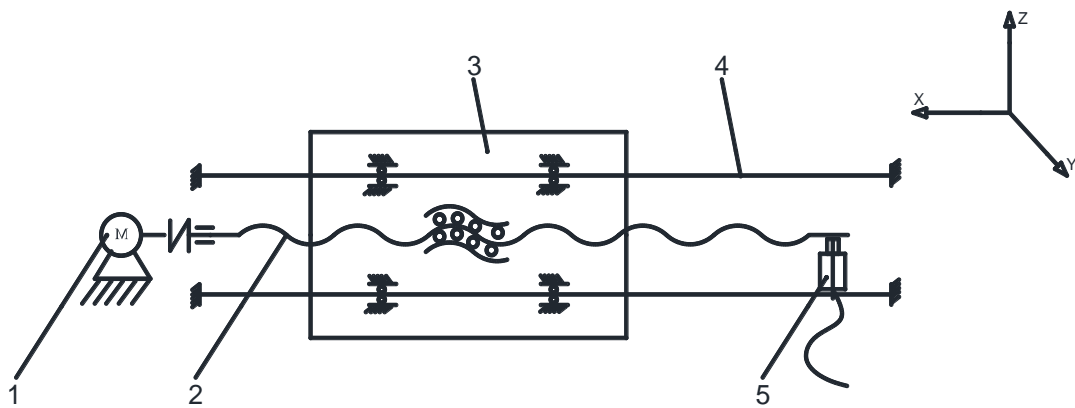
3.3 Stalo sraigto pavaros laisvojo galo radialinio mušimo nustatymas

Stalo pavaros, riedėjimo sraigto laisvojo galo mušimo nustatymas, panaudojant bekontaktį poslinkio jutiklį 1 (3.3.1 pav.)



3.3.1 pav. X ašies sraigto galo poslinkio matavimas radialine kryptimi

Išmatuotas pokytis per apsisukimą su bekontaktio poslinkio matavimo jutikliu. Gauta pokyčio reikšmė 1,93 V, žinant jutiklio jautrį $S_j=8\text{mV}/\mu\text{m}$, apskaičiuojame, kad laisvojo galo radialinis mušimas yra 241 μm . Norint sumažinti mušimą reikalingas, papildomas derinimas, kreipiančiųjų lygiagrečiai sraigtui.



3.3.2 pav. Principinė jutiklio tvirtinimo schema

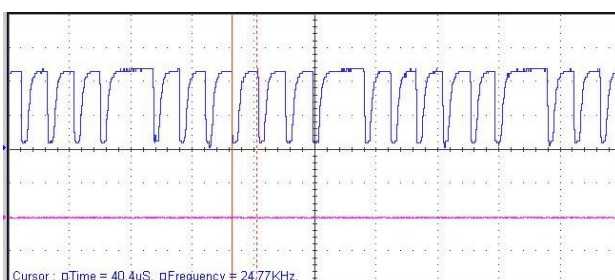
1 – ŽEV, 2 – VSP su riedėjimo guoliais, 3 – tvirtinimo stalas, 4 – riedėjimo trinties kreipiančiosios, 5 – bekontaktis jutiklis.

Norint sumažinti sraigto laisvojo galo radialųjį mušimą ir padidinti kreipiančiųjų judėjimo krypties ir sraigto sukimosi ašies lygiagretumą, reikalinga papildoma sraigto laisvojo galo atrama.

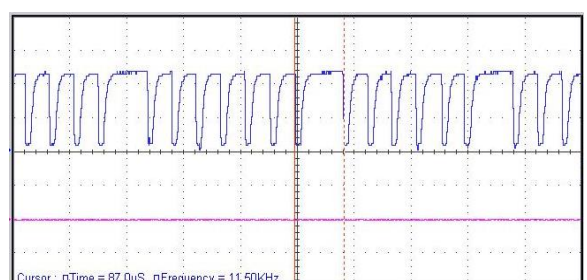
3.4 ŽEV valdymo signalo matavimas

Staklių testavimo metu, didelių vibracijų nepastebėta dėl ŽEV darbo. Kitame etape paleista programa apskritimui išfrezuoti. Staklių korpuse pasireiškė didelės vibracijos, dėl kurių reikėjo sustabdyti stakles. Buvo ieškoma gedimų pačioje staklių mechanikoje, ir elektrinėje dalyje.

Buvo nuspręsta išmatuoti signalą išeinantį iš valdiklio. Matavimo metu buvo užduotas 1800 mm/min pastovus stalo greitis. Stalui judant buvo nustatytas netolygus signalas, kurio dažnis kinta nuo 11,50 kHz iki 24,77 kHz, žymesni pakitimai kartojasi periodiškai, kas šestą ir septintą impulsų grupę, visame signalo trende. Matavimai pavaizduoti (3.28 pav.).



1 – trumpo impulso matavimas



2 – ilgo impulso matavimas

3.4.1 pav.

Valdymo signalo paduodamo į staklių stalo pavaros ŽEV, matavimas

Atlikus matavimą Y ašimi, taip pat pastebėtas netolygus signalas, kurio požymiai panašūs į X ašies matavimą. Nustatyta, kad blogi signalai siunčiami į X, Y ir į Z ašių pavarų ŽEV valdiklius.

IŠVADOS

Baigiamojo darbo tikslas suprojektuoti skaitmeninio programinio valdymo frezavimo stakles, pagaminti jas ir eksperimentiškai nustatyti pozicionavimo tikslumą ir greitaveiką. Šios problemos sprendimas yra pateiktas žemiau nurodytose išvadose.

- 1) Suprojektuotos SPV staklės su darbine eiga $X - 500$ mm; $Y - 350$ mm ; $Z - 250$ mm, skirtos nedidelių gabaritų ruošiniams apdirbti. Atlikti skaičiavimai, kuriais įvertinta pjovimo galia reikalinga frezuoti aliuminį su 10 mm. Suklio variklis parenkamas 1,5 kW.
- 2) Y ašies kryptimi judesiui perduoti, parinkti du ŽEV „WANTAI 57BYGH115-003“ išvystantys 6 Nm sukimo momentą.
- 3) „Solidworks“ programa modeliuota, Z suportui esant viršutinėje padėtyje, o sukliui užimant kraštinę padėtį, didžiausia rėmo kolonų deformacija 0,24 mm, prie suklio pridėta pastovi 1200 N jėga Y ašies kryptimi.
- 4) Atlikti koordinačių X, Y ir Z kryptimi pozicionavimo tikslumo matavimai, duomenų analizė:
 - a) X ašies pozicionavimo paklaida $-5 \mu\text{m} +3 \mu\text{m}$;
 - b) Y ašies pozicionavimo paklaida. $-5 \mu\text{m} +8 \mu\text{m}$;
 - c) Z ašies pozicionavimo paklaida $-7 \mu\text{m} +5 \mu\text{m}$.
- 5) Matuojant X koordinatės judesį, nustatyta dėl sraigto – veržlės kinematinės poros padidintų mechaninių laisvumų (tai patvirtina virpesių greičio spektras). Nustatyta vyraujanti virpesių greičio dažnio amplitudė 93,75 Hz, stalui pozicionuojant viena kryptimi ir reversuojant, nežymiai kinta 91,25 Hz. Elektroninio generatoriaus signalai yra netolygus, kintamo dažnio 11500 Hz iki 24770 Hz, ŽEV valdymas nestabilus.

LITERATŪRA

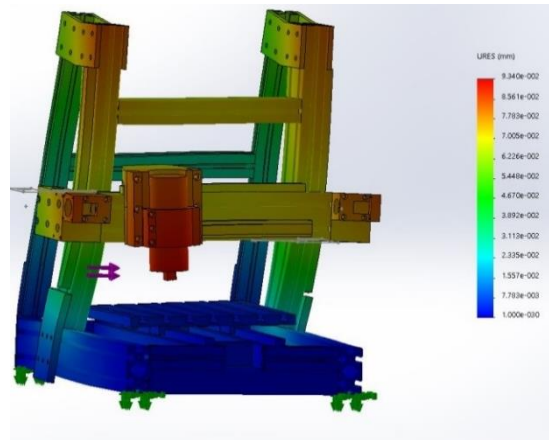
1. A Brief Look At Milling machine History [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.cam-machine.com/brief-look-milling-machine-history>
2. Carlsson, B., 1984, "The Development and Use of Machine Tools in Historical Perspective," Journal of Economic Behavior and Organization, 5, pp. 91-114
3. Computer numerical control history [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.cnccookbook.com/CCNCMachine.htm>
4. Lopez de Lacalle L. N., Lamikiz A. 2009. Machine Tools for High Performance Machining. London: Springer, 437 p.
5. Dusevičius, Deivydas. Medžiagų apdirbimas CNC staklėmis, CNC staklių programavimas [interaktyvus]. Alytus: 2014 [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.aprc.lt/sites/aprc.lt/files/CNC%20konspektas.pdf>
6. Marcinkevičius A. H., Mokšins V., Jurevičius M. Šiuolaikiniai skaitmeninio valdymo apdirbimo centrai ir jų programavimas. I dalis. Apdirbimo centrai Vilnius: Technika, 2010. 348p.
7. Smid P. CNC Programming Handbook. New York: Industrial Press, Inc., 2008. 505 p.
8. Skačkovas V., Sabaliauskas A. Technologinių įrenginių konstrukcijų atlasas [interaktyvus]. Šiauliai: 2008 [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://techno.su.lt/~sabaliauskas/eknygos/atlasas.pdf>
9. Smith G. T. Technology and Engineering. Hamshire: Springer, 2016, 685 p.
10. To ensure the highest precision machining on its newest and largest [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: – <http://www.industrial-technologies-india.com/2146-to-ensure-the-highest-precision-machining-on-its-newest-and-largest-portal-milling-machine-dmg-chose-redex-drives-zero-backlash-rack-pinion-drives-and-spindle-drives.htm>
11. Specifying, selecting and applying linear ball screw drives [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: http://www.thomsonlinear.com/downloads/articles/Specifying_Selecting_Applying_Linear_Ball_Screw_Drives_tae.pdf
12. Ostaševičius V., Dundulis R. Technologiniai įrenginiai ir įrankiai. Kaunas: Technologija, 2004. 606 p.
13. Computer numerical control (CNC) [interaktyvus]. 2009 [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: http://mosafavi.iut.ac.ir/sites/mosafavi.iut.ac.ir/files/files_course/cnc_1_0.pdf
14. Smilgevičius A. Automatikos mikromašinos Vilnius: Technika, 2005. 344 p.

15. Basic of servomotor control [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.nipponpulse.com/images/uploads/content/Basic%20of%20servomotor%20control.pdf>
16. HMT Limited // Mechatronics. New Delhi: Tata McGraw – Hill Publishing Company Limited, 2000, 461p.
17. Technikos enciklopedija. IV tomas. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos centras, 2010. 920 p.
18. Loenzo RAG, Lumbreras PDA, de Jesús Romero Troncoso R, Ruiz GH. An object-oriented architecture for sensorless cutting force feedback for CNC milling process monitoring and control. Adv. Eng. Softw. 2010;41:754–761.
19. Metalo ir plastiko apdirbimo skaitmeninio programinio valdymo staklėmis technologinių kompetencijų tobulinimo programos mokymo medžiaga [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.pmdtkt.upc.smm.lt/dokumentai/Medziaga/inzinerine/mm6/inzinerine-6medziaga.pdf>
20. Kakino Y, Ihara Y, Shinohara A. Accuracy Inspection of NC Machine Tools by Double Ball Bar Method. Hanser Publishers, Munich, 1993.
21. Souhail Sekkat. Developing integrated performance measurement system using component based approach Int. J. Comput. Commun. Control, 8 (2) (2013), 294–303 p.
22. U. Zuperl, F. Cus, B. Mursec, T. Ploj A generalized neural network model of ball-end milling force system J. Mater. Process. Technol., 175 (2006), p. 98–108
23. Bražiūnas A. J. Mašinų gamybos technologiniai pagrindai. Kaunas: Technologija, 2004. 520 p.
24. Garant – machining – catalog [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.cnc-trainer.com/downloads/garant-machining-handbook.pdf>
25. Hoffmann group pagrindinis katalogas [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <https://www.hoffmann-group.com/DE/en/hom?lang=lt>
26. Barzdaitis V. Mechatronikos pagrindai. Kaunas: Technologija, 2011, 300 p.
27. An introduction to stepping motor [interaktyvus]. 2001 [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.sal.wisc.edu/PFIS/docs/rss-vis/archive/public/Product%20Manuals/orientalmotors/stepperintro.pdf>
28. KTU modulis T210B024 (Mechatronikos sistemų projektavimas, koordinatorius prof. V Barzdaitis)
29. Motor specification [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.wantmotor.com/ProductsView.asp?id=160&pid=80>
30. Krančiukas R. Mašinų gamybos technologijos laboratoriniai darbai: Technologija, 1997, 89 p.

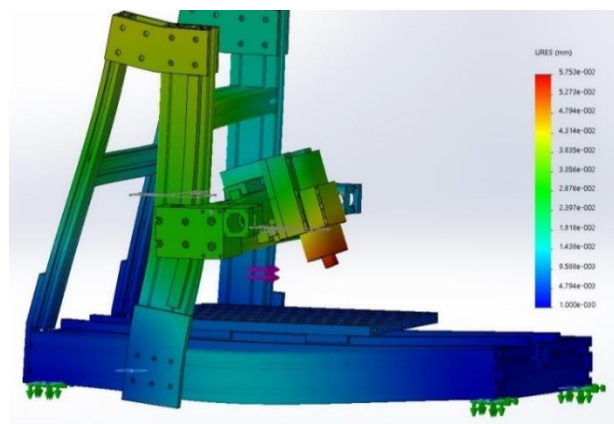
31. CNC breakout board simple with step and direction [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:
<http://www.stappenmotor.nl/Datasheets/CNC%20Breakoutboards/CNC%20Breakout%20board%20Simple.pdf>
32. Barzdaitis V., Činikas G. Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika. Kaunas: Technologija, 2011, 300 p.
33. Vaičiulis D. Sraigto veržlės pavara.[interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:
<http://www.mechanikosinzieirius.lt/wp-content/uploads/2015/08/me1-12.pdf>

PRIEDAI

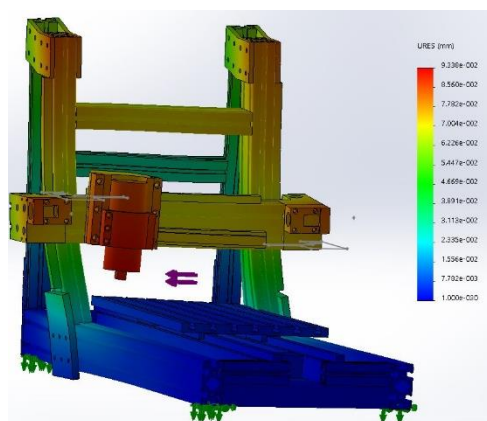
1 Priedas



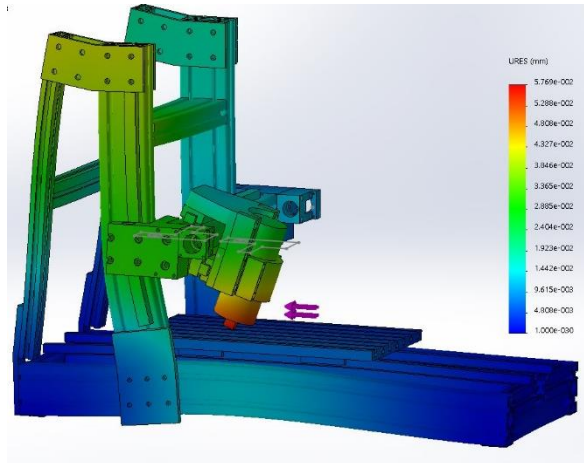
1 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas apatinėje padėtyje, suklys I pozicijoje, jėgos veikimo kryptis +Y (I +Y)



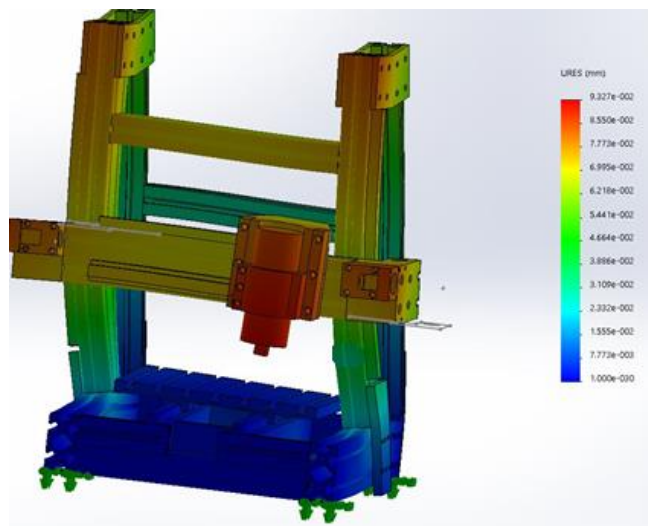
2 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas apatinėje padėtyje, suklys I pozicijoje, jėgos veikimo kryptis +X (I +X)



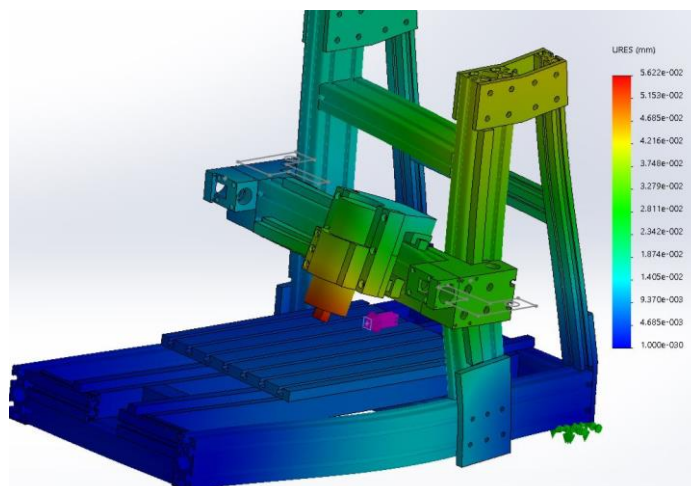
3 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas apatinėje padėtyje, suklys I pozicijoje, jėgos veikimo kryptis -Y (I -Y)



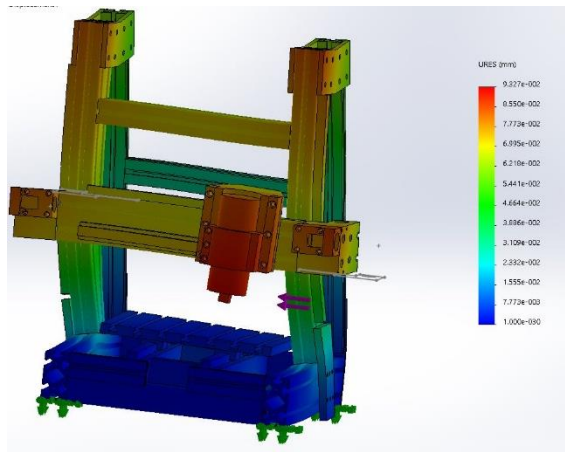
4 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas apatinėje padėtyje suklys I pozicijoje, jėgos veikimo kryptis -X (I -X)



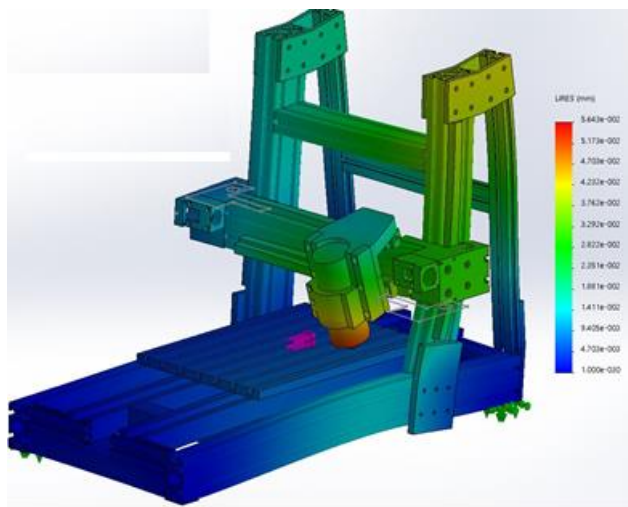
5 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas apatinėje padėtyje, suklys III pozicijoje, jėgos veikimo kryptis +Y (III +Y)



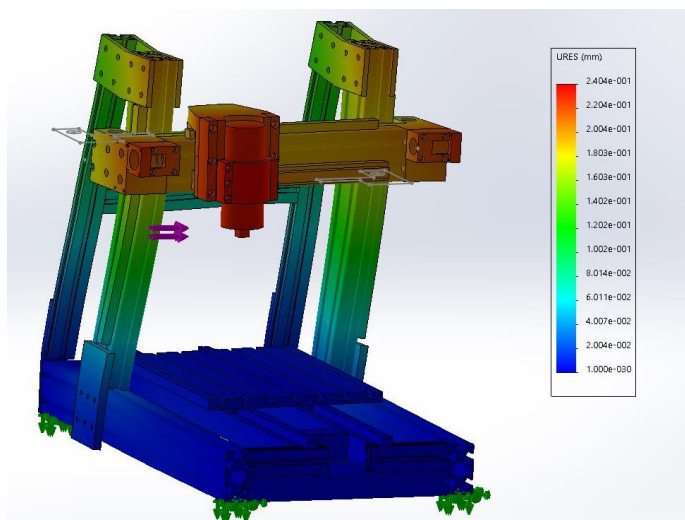
6 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas apatinėje padėtyje, suklys III pozicijoje, jėgos veikimo kryptis +X (III +X)



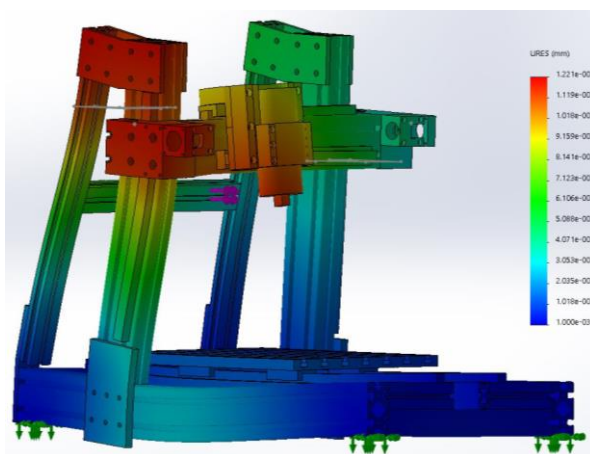
7 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas apatinėje padėtyje, suklys III pozicijoje, jėgos veikimo kryptis -Y (III -Y)



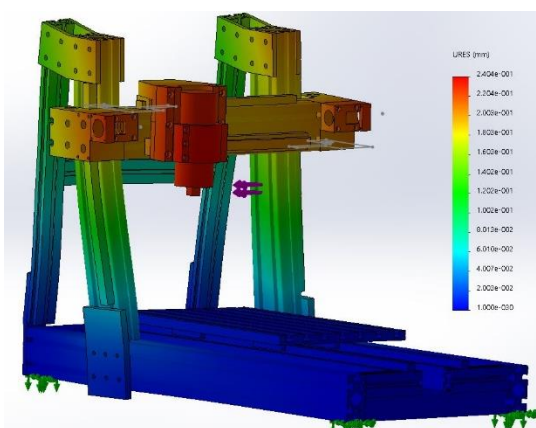
8 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas apatinėje padėtyje, suklys III pozicijoje, jėgos veikimo kryptis -X (III -X)



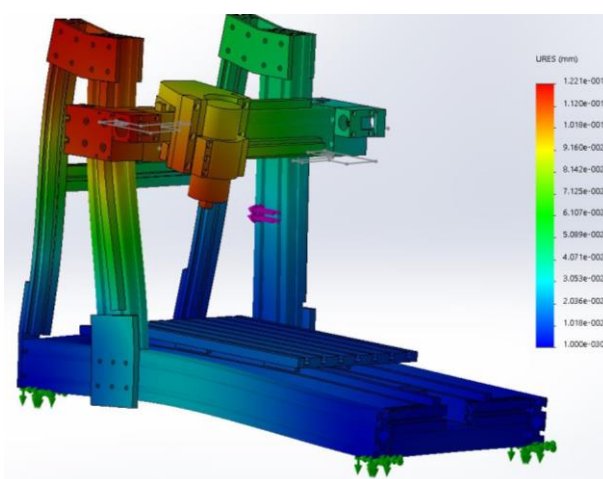
9 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys I pozicijoje, jėgos veikimo kryptis +Y (I +Y)



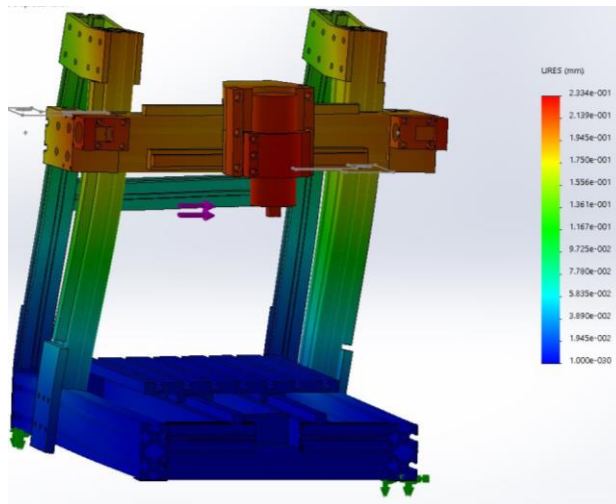
10 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys I pozicijoje, jėgos veikimo kryptis +X (I +X)



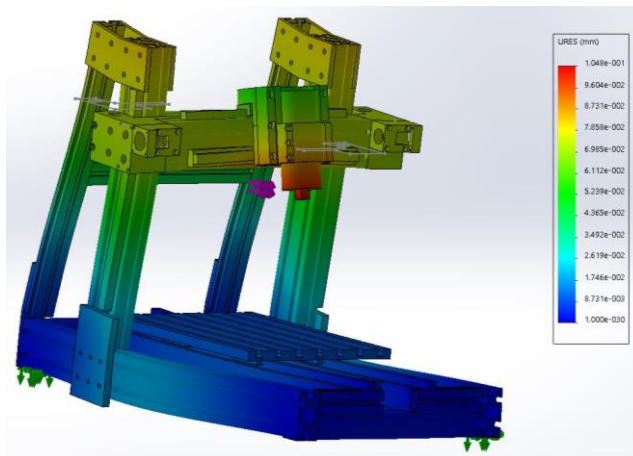
11 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys I pozicijoje, jėgos veikimo kryptis -Y (I -Y)



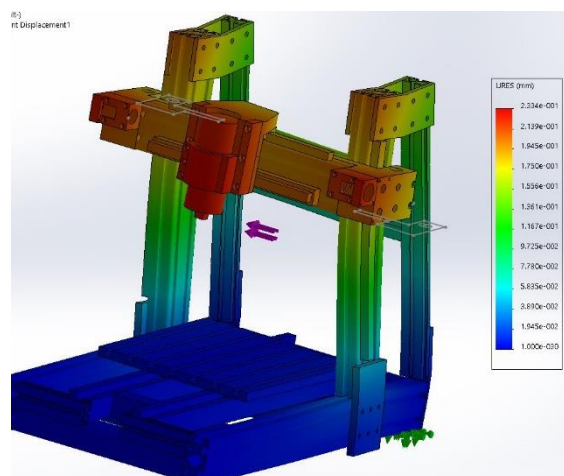
12 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys I pozicijoje, jėgos veikimo kryptis -X (I -X)



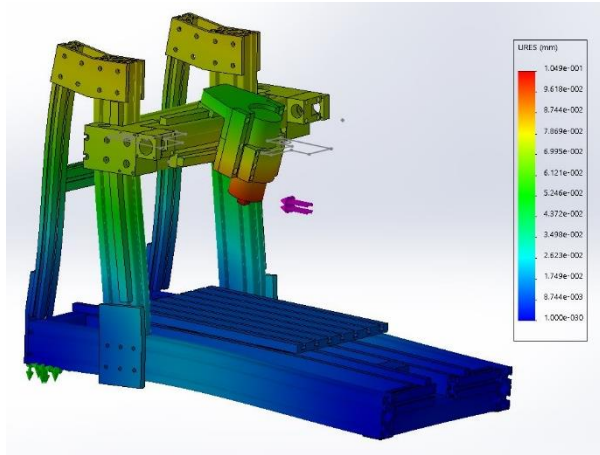
13 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys II pozicijoje, jėgos veikimo kryptis +Y (II +Y)



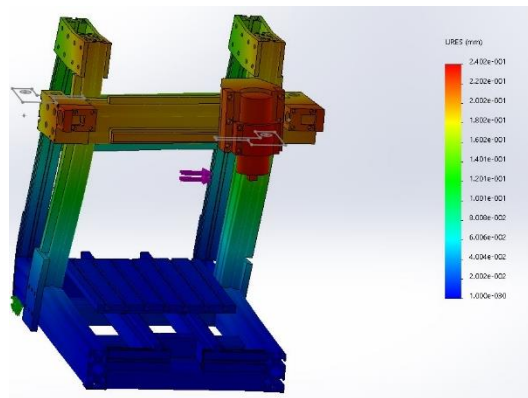
14 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys II pozicijoje, jėgos veikimo kryptis +X (II +X)



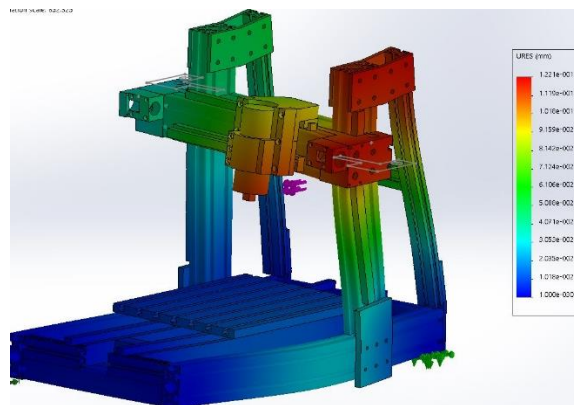
15 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys II pozicijoje, jėgos veikimo kryptis -Y (II -Y)



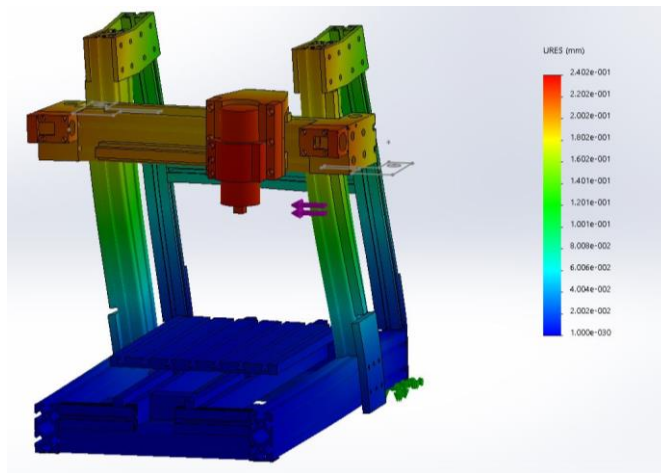
16 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys II pozicijoje, jėgos veikimo kryptis -X (II -X)



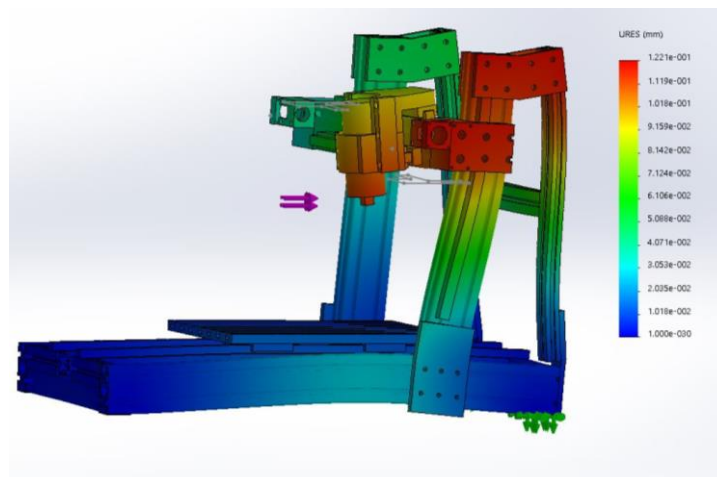
17 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys III pozicijoje, jėgos veikimo kryptis +Y (III +Y)



18 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys III pozicijoje, jėgos veikimo kryptis +X (III +X)



19 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys III pozicijoje, jėgos veikimo kryptis -Y (III -Y)



20 Pav. Statinė analizė kolonų su atramomis, kai Z suportas viršutinėje padėtyje, suklys III pozicijoje, jėgos veikimo kryptis -X (III -X)