



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Staklių su skaitmeniniu programiniu valdymu servo ašių pozicionavimo tikslumo nustatymo būdų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Linas Petkevicičius

Projekto autorius

Lekt. dr. Olga Strikulienė

Vadovė

Panevėžys, 2020



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Staklių su skaitmeniniu programiniu valdymu servo ašių pozicionavimo tikslumo nustatymo būdų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (6211EX014)

Linas Petkevičius

Projekto autorius

Lekt. dr. Olga Strikulienė

Vadovė

Recenzentas / Recenzentas

Panevėžys, 2020



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Linas Petkevičius

Staklių su skaitmeniniu programiniu valdymu servo ašių pozicionavimo tikslumo nustatymo būdų tyrimas

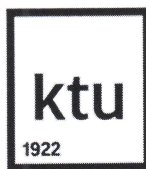
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Lino Petkevičiaus, baigiamasis projektas tema „Staklių su skaitmeniniu programiniu valdymu servo ašių pozicionavimo tikslumo nustatymo būdų tyrimas“ 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)



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui **Linui Petkevičiui**

Baigiamojo projekto tema (lietuvių kalba)	Staklių su skaitmeniniu programiniu valdymu servo ašių pozicionavimo tikslumo nustatymo būdų tyrimas
Baigiamojo projekto tema (anglų kalba)	Research of Positioning Accuracy Measurement Methods for Machine Servo Axes with Computer Numerical Control

Patvirtinta 2020 m. balandžio 6 d. dekanu potvarkiu Nr. V25-13-7-1

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Lietuvos akademinės elektroninės bibliotekos informacinės sistemos (eLABa) talpyklą ir Moodle aplinką terminas iki 2020 m. birželio 1 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

–

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

1. Išnagrinėti skirtingas servo ašių valdymo sistemas ir pozicionavimo tikslumo problematiką koordinatinio šlampavimo staklėse.
2. Aprašyti skirtingus servo ašių pozicionavimo tikslumo matavimo būdus, taikomus koordinatinio šlampavimo staklėse „*Shear Genius 1530*“.
3. Ištirti servo ašių pozicionavimo tikslumo matavimo pagal servo variklio duomenis būdą ir palyginti jį su standartizuotais matavimo būdais.

Vadovė	lektorė dr. Olga Strikuliene (vadovo pareigos, vardas, pavardė)
--------	--

Užduotį gavau	Linas Petkevičius (studento vardas, pavardė)
---------------	---

2020 m. balandžio 30 d.

Petkevičius, Linas. Staklių su skaitmeniniu programiniu valdymu servo ašių pozicionavimo tikslumo nustatymo būdų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė lekt. dr. Olga Strikulienė; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: elektronikos inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: skaitmeninis programinis valdymas, SPV, servo ašis, tikslumas, laisvumo matavimai.

Panevėžys, 2020. 57 p.

Santrauka

Nuo galutinio servo ašių pozicionavimo tikslumo dažnai priklauso gaminamų detalių kokybė, o norint pasiekti reikiamą tikslumą neretai mažinamas servo ašių pastūmos greitis (taip nukenčia įrenginio našumas). Todėl servo pavarų vienos iš pagrindinių kokybinių charakteristikų yra pozicionavimo tikslumas, pagreitis bei maksimalus judėjimo greitis.

Šio projekto tyrimų objektu pasirinktos staklių su skaitmeniniu programiniu valdymu servo ašys, o pagrindinis tikslas ištirti servo ašių pozicionavimo tikslumo nustatymo būdus.

Tyrimų metodai: mokslinės literatūros analizė, eksperimentai su realiomis *PRIMA POWER* koordinatinio šampavimo staklėmis *Shear Genius 1530*.

Pirmame skyriuje apžvelgta mokslinė literatūra apie servo ašių tipus, pateikiant jų privalumus ir trūkumus.

Antrame skyriuje apžvelgti servo ašių tikslumo / laisvumo matavimo būdai taikomi *PRIMA POWER* kordinatinio šampavimo staklėse *Shear Genius 1530*.

Trečiame skyriuje ištirtas servo ašių laisvumo nustatymo būdas pagal servo variklio duomenis.

Eksperimentas parodė, kad servo ašių laisvumo matavimas pagal servo variklio duomenis yra patikimas diagnostinis įrankis tiesiaiegių servo ašių laisvumui nustatyti.

Petkevičius, Linas. Research of Positioning Accuracy Measurement Methods for Machine Servo Axes with Computer Numerical Control. Master's Final Degree Project / supervisor lect. dr. Olga Strikulienė; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Electronics Engineering, Technology Sciences.

Keywords: computer numeric control, CNC, servo axis, accuracy, clearance measurement.

Panevėžys, 2020. 57 pages.

Summary

The quality of the parts produced often depends on the final positioning accuracy of the servo axes, and the feed rate of the servo axes is often reduced to achieve the required accuracy (thus affecting the efficiency of the machine). Therefore, one of the main qualitative characteristics of servo drives is positioning accuracy, acceleration and maximum speed of movement.

The object of research of this project is the servo axes of machines with computer numerical control, and the main goal is to investigate the methods of measuring the positioning accuracy of servo axes.

Research methods: analysis of scientific literature, experiments with real *PRIMA POWER* turret punching machine *Shear Genius 1530*.

The first chapter reviews the scientific literature on the types of servo axes, presenting their advantages and disadvantages.

The methods for measuring the accuracy / clearance of servo axes reviewed in the second section are applied to *PRIMA POWER* coordinate stamping machine *Shear Genius 1530*.

In the third chapter, the method of measuring the clearance of the servo axes according to the data of the servo motor is researched.

The experiment showed that measuring the clearance of the servo axes based on the servo motor data is a reliable diagnostic tool for determining the clearance of linear servo axes..

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Mokslinės literatūros analizė.....	14
1.1. Skaitmeninio programinio valdymo staklės	14
1.2. Servo pavaros	15
1.3. Servo pavarų tikslumo problemos	19
2. Eksperimentinė dalis	23
2.1. Tyrimo objektas.....	23
2.2. Tikslumo matavimo metodika.....	25
2.2.1. Tiesiaeigių servo pavarų pozicionavimo tikslumo matavimas lazeriniu interferometru.....	25
2.2.2. Štampavimo tikslumo bandymas ir matavimai	28
2.2.3. Mechaninės grandies laisvumo matavimai pagal servo variklio duomenis	32
2.2.4. Koordinatinio štampavimo staklių tikslumo (paklaidos) matavimo metodų privalumai ir trūkumai.....	38
3. Tiriamoji dalis.....	39
3.1. Servo variklio tekančios srovės stebėjimas	39
3.2. Laisvumo matavimo rezultatų pasikartojamumas	44
3.3. Laisvumo matavimų rezultatai naudojant skirtingas ribines sroves.....	45
3.4. Laisvumo matavimo rezultatų palyginimas su kitomis matavimo metodikomis	48
3.5. Laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis panaudojimas.....	52
Išvados	54
Literatūros sąrašas	56

Lentelių sąrašas

1 lentelė. <i>PRIMA POWER</i> koordinatinių šampavimo staklių su integruota giljotina <i>Shear Genius 1530</i> servo ašių ypatybės [4]	19
2 lentelė. <i>PRIMA POWER</i> koordinatinių šampavimo staklių su integruota giljotina <i>Shear Genius 1530</i> pagrindinės techninės charakteristikos [4]	23
3 lentelė. Maksimalūs leistini <i>PRIMA POWER</i> staklių nuokrypiai, nuokrypiams matuoti/apskaičiuoti naudojama metodika pateikta VDI/DGQ 3441 standarte [21]	27
4 lentelė. LKP-7100 tikslumo bandymo skylių paskirtis [22]	28
5 lentelė. „Amada thick turret“ tipo įrankių dydžių palyginimas	38
5 lentelė. Koordinatinių šampavimo staklių tikslumo (paklaidos) matavimo metodų palyginimas	38
7 lentelė. 10-ties <i>X</i> ir <i>Y</i> servo ašių laisvumo matavimų rezultatai	44
8 lentelė. 10-ties <i>X</i> ir <i>Y</i> servo ašių laisvumo matavimų rezultatų statistinis tyrimas	45
9 lentelė. 10-ties <i>X</i> ir <i>Y</i> servo ašių laisvumo matavimų rezultatų statistinis tyrimas	45
10 lentelė. <i>X</i> servo ašies laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis rezultatai, naudojant skirtingas ribines sroves	46
11 lentelė. <i>Y</i> servo ašies laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis rezultatai, naudojant skirtingas ribines sroves	47
12 lentelė. <i>Z1</i> ir <i>Z2</i> servo ašių laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis rezultatai, naudojant skirtingas ribines sroves	47
13 lentelė. Laisvumo matavimų koordinatės, matavimus atliekant skirtingais matavimo būdais	48
14 lentelė. Skirtingų staklių komponentų įtaka laisvumo matavimų rezultatams.....	51
15 lentelė. Laisvumo matavimo rezultatų palyginimas naudojant skirtingus matavimo būdus	51

Paveikslų sąrašas

1 pav. Informacijos srautai SPV staklėse naudojančiose G-kodą STEP-NC [1]	15
2 pav. Valdymo grandinės su grįžtamoju ryšiu pavyzdys, naudojant pozicijos, greičio ir srovės valdymo grandines [2]	16
3 pav. Valdymo mechanizmų klasifikacija pagal pozicijos jutiklio instaliacijos vietą [2]: a) pusiau uždara matavimo grandinė; b) uždara matavimo grandinė; c) hibridinė matavimo grandinė.....	17
4 pav. Tiesiaeigių servo ašių naudojamos mechaninės perdavimo grandys: a) sraigtinė perdavimo grandis; b) krumpliastiebinė perdavimo grandis [10].....	18
5 pav. Servo ašies valdymo blokinė diagrama su greičio ir pozicijos kontūrais bei fiksuota laisvumo kompensacija [14].....	20
6 pav. X_{act} ir X_{tab} priklausomybė nuo servo ašies judesio krypties [14].....	20
7 pav. X / Y ašių pozicionavimo tikslumas, nenaudojant (a) ir naudojant (b) ašių laisvumo kompensacijos algoritmą [14]	21
8 pav. X ašies laisvumo tendencijos pavyzdys koordinatėje 1500 mm [17].....	22
9 pav. Įvairios Shear Genius staklių kombinacijos su skirtingais automatizacijos lygiais [4]	24
10 pav. Lazerinio interferometro veikimo principas [20]	25
11 pav. X servo ašies kompensacijų lentelės pavyzdys <i>IndraWorks</i> servo ašių valdymo programinėje aplinkoje	26
12 pav. Matavimų pagal VDI/DGQ 3441 standartą išanalizuotų duomenų grafiko pavyzdys.....	27
13 pav. LKP-7100 tikslumo bandymo detalės brėžinys [22].....	30
14 pav. LKP-7100 tikslumo bandymo matavimams naudojamas liestukas [22].....	31
15 pav. LKP-7100 tikslumo bandymo matavimo apvalios skylės pozicijos nuokrypio pavyzdys... 31	31
16 pav. LKP-7100 tikslumo bandymo matavimo protokolo fragmentas [23]	32
17 pav. Tiesiaeigės ašies laisvumo, temperatūros bei variklio srovės grafiko pavyzdys [17].....	33
18 pav. Servo ašies laisvumo ir elastiškumo matavimo algoritmas.....	35
19 pav. Servo ašies laisvumo ir elastiškumo matavimo schema.....	36
20 pav. Koordinatinio štam pavimo staklių <i>Shear Genius 1530</i> įrankių būgno pavyzdys (nuotrauka iš staklių vartotojo sąsajos)	37
21 pav. <i>TULUS</i> programos MDA langas su kvadrato formos judesio trajektorijos programos kodu	39
22 pav. X ir Y servo ašių koordinatinių (žalia ir šviesiai mėlyna kreivės) ir X ir Y ašių servo varikliais tekančių srovių (tamsiai mėlyna ir alyvinė kreivės) grafikai, judant 200×200 mm kvadrato formos trajektorija 100 % greičiu bei 100 % akseleracija	40
23 pav. X ir Y servo ašių koordinatinių (žalia ir šviesiai mėlyna kreivės) ir X ir Y ašių servo varikliais tekančių srovių (tamsiai mėlyna ir alyvinė kreivės) grafikai, judant 200×200 mm kvadrato formos trajektorija 50 % greičiu bei 100 % akseleracija	40
24 pav. <i>TULUS</i> programos MDA langas su kvadrato formos judesio trajektorijos programos kodu naudojant 50 % akseleracijos	41
25 pav. X ir Y servo ašių koordinatinių (žalia ir šviesiai mėlyna kreivės) ir X ir Y ašių servo varikliais tekančių srovių (tamsiai mėlyna ir alyvinė kreivės) grafikai, judant 200×200 mm kvadrato formos trajektorija 100 % greičiu bei 50 % akseleracija	41
26 pav. <i>TULUS</i> programos MDA langas su apskritimo formos judesio trajektorijos programos kodu	42

27 pav. <i>X</i> ir <i>Y</i> servo ašių koordinatinių (žalia ir šviesiai mėlyna kreivės) ir <i>X</i> ir <i>Y</i> ašių servo varikliams tekančių srovių (tamsiai mėlyna ir alyvinė kreivės) grafikai, judant 100 mm spindulio apskritimo formos trajektorija 100 % greičiu bei 100 % akseleracija.....	42
28 pav. <i>X</i> ir <i>Y</i> servo ašių koordinatinių (žalia ir šviesiai mėlyna kreivės) ir <i>X</i> ir <i>Y</i> ašių servo varikliams tekančių srovių (tamsiai mėlyna ir alyvinė kreivės) grafikai, judant 100 mm spindulio apskritimo formos trajektorija 50 % greičiu bei 100 % akseleracija.....	43
29 pav. Grafikas atvaizduojantis <i>X</i> ašies poziciją (žalia kreivė) ir <i>X</i> ašies servo variklio tekančią srovę (tamsiai mėlyna kreivė), matuojant <i>X</i> ašies laisvumą ir elastiškumą	44
30 pav. Vidutinio išmatuoto <i>X</i> ašies laisvumo (mm) priklausomybės nuo ribinės srovės (<i>A</i>), skirtingose koordinatėse, grafikas	46
31 pav. Vidutinio išmatuoto <i>Y</i> ašies laisvumo (mm) priklausomybės nuo ribinės srovės (<i>A</i>) grafikas koordinatėje 200 mm	47
32 pav. Vidutinių išmatuotų <i>Z1</i> ir <i>Z2</i> servo ašių laisvumo priklausomybės nuo ribinės srovės grafikas koordinatėje 90°	48
33 pav. <i>X</i> servo ašies laisvumo 500mm koordinatėje matavimų rezultatų palyginimas, naudojant skirtingus paklaidos matavimo būdus: a) pagal LKP-7100 standartą; b) pagal VDI/DGQ 3441 standartą; c) pagal servo variklio duomenis [23], [28].....	51
34 pav. Rekomendacinis staklių laisvumo matavimų rezultatų vertinimo algoritmas.....	52
35 pav. Staklių valdymo ekrane pasirodančių nurodymų, staklių operatoriui pavyzdys.....	53

Santrumpų sąrašas

Santrumpos:

SPV – skaitmeninis programinis valdymas (angl. *Computer numeric control*; trump. *CNC*);

MMI – įrengimo ir operatoriaus sąsaja (angl. *Man-Machine Interface*);

NCK – skaitmeninio valdymo branduolys (angl. *Numerical Control Kernel*);

PLV – programuojamas loginis valdiklis (angl. *Programable Logic Controller*; trump. *PLC*);

CAM – programinė įranga skirta sugeneruoti tikslias instrukcijas (*G* kodą) SPV staklėms (angl. *Computer aided manufacturing*);

FMS – lanksti gamybos sistema (angl. *Flexible manufacturing system*);

FMC – lanksti gamybos celė (angl. *Flexible manufacturing cell*);

FML – lanksti gamybos linija (angl. *Flexible manufacturing line*);

MDA – pusiau automatinis staklių režimas (angl. *Manual Data Automatic*).

Įvadas

Skaitmeninio programinio valdymo (CNC) staklės – tai mechatroninės sistemos, kuriose suderinti mechaninės inžinerijos, elektronikos bei kompiuterinio valdymo sistemų sprendimai, siekiant tikslaus, greito, našaus detalių adorojimo. Metalinių detalių gamybai dažnai naudojamos įvairios apdirbimo staklės – frezavimo, tekinimo, šlifavimo ir pan., o siekiant didesnio gamybos našumo, tikslumo bei pasikartojamumo pasitelkiamos skaitmeninio programinio valdymo staklės. Neatsiejama tokio įrenginio dalis yra servo pavaros, kurios užtikrina tikslų ir sklandų mechaninį apdirbimo įrankio arba apdirbamo ruošinio judesį. Priklausomai nuo staklių paskirties, jose gali būti naudojamos viena arba kelios (ar net keliasdešimt) servo pavaros, tam, kad būtų užtikrinamas visapusiškas detalės apdorojimas. Vienose staklėse yra svarbus mechaninio judesio trajektorijos ir poslinkio greičio tikslumas (pvz.: frezavimo arba tekinimo technologinis procesas), kitose svarbiausias parametras yra galutinės pozicijos tikslumas ir kuo greitesnis šios pozicijos pasiekimas (pvz.: koordinatinis šampavimas ar detalės / ruošinio pristatymas į reikiamą poziciją).

Nuo galutinio pozicionavimo tikslumo dažnai priklauso gaminamų detalių kokybė, o norint pasiekti reikiamą tikslumą neretai mažinamas servo ašių pastūmos greitis (dėl ko nukenčia įrenginio našumas). Todėl servo pavarų vienos iš pagrindinių kokybinių charakteristikų yra pagreitis, maksimalus judėjimo greitis ir pozicionavimo tikslumas. Šiame projekte tiriamas tiesiaeigių servo pavarų galutinio pozicionavimo tikslumas, sisteminių paklaidų identifikavimas bei galimybės jį pagerinti.

Tyrimų objektas: staklių su skaitmeniniu programiniu valdymu servo ašys.

Projekto tikslas: ištirti staklių su skaitmeniniu programiniu valdymu servo ašių pozicionavimo tikslumo nustatymo būdus.

Uždaviniai:

1. Išnagrinėti skirtingas servo ašių valdymo sistemas ir pozicionavimo tikslumo problematiką koordinatinio šampavimo staklėse.
2. Aprašyti skirtingus servo ašių pozicionavimo tikslumo matavimo būdus, taikomus koordinatinio šampavimo staklėse *Shear Genius 1530*.
3. Ištirti servo ašių pozicionavimo tikslumo matavimo pagal servo variklio duomenis būdą ir palyginti jį su standartizuotais matavimo būdais.

Tyrimų metodai: mokslinės literatūros analizė, eksperimentai su realiomis *PRIMA POWER* koordinatinio šampavimo staklėmis *Shear Genius 1530*.

Autoriaus publikuotų straipsnių bibliografinis sąrašas:

1. PETKEVIČIUS, L. ir O. STRIKULIENĖ. Staklių su skaitmeniniu programiniu valdymu servo ašių pozicionavimo tikslumo nustatymo būdų tyrimas // Technologijų ir verslo aktualijos – 2020: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga, Lietuva, Panevėžys, 2020 balandžio 24 d. / Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas. Kaunas: Kauno technologijos universitetas.

Konferencijose skaityti pranešimai:

1. Pranešimas tema „Skaitmeninio programinio valdymo metalo apdirbimo staklių servo ašių pozicionavimo tikslumo matavimo metodikų tyrimas“ 20-oje studentų mokslinių darbų konferencijoje „Technologijų ir verslo aktualijos – 2020“. Panevėžys: Kauno technologijos universitetas, 2020 m. balandžio 24 d.

1. Mokslinės literatūros analizė

1.1. Skaitmeninio programinio valdymo staklės

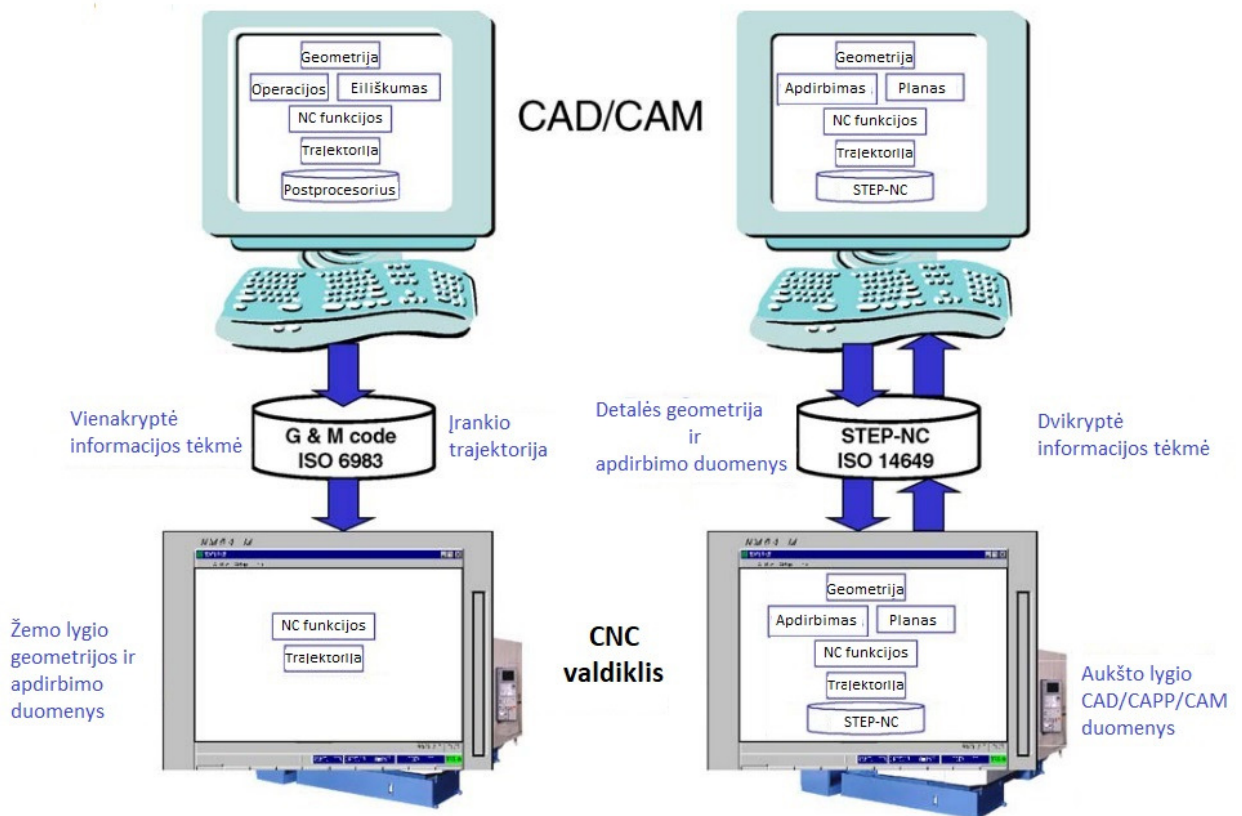
Nuo pat XIX amžiaus pradžios, kai vyravo amatininkų gamybos technologijos ir iki XX amžiaus pradžios, kuomet atsirado ankstyvoji masinė detalių gamyba, įvyko ne vienas revoliucinis pasikeitimas gamybos sistemų konfigūracijoje. Dažniausia gamybos sistemų konfigūracija buvo dedikuota gamybos linija, kuria buvo pasiektas aukštas gamybos efektyvumas su mažomis sąnaudomis. Tačiau tokios gamybos sistemos galėjo gaminti tik labai ribotą kiekį skirtingų detalių, o gamybos perorientavimas, kitokioms detalėms gaminti, užtrukdavo itin ilgą laiką arba išvis nebuvo įmanomas. XX amžiaus antroje pusėje vis dažniau atsirasdavo poreikis gaminti daugiau skirtingų detalių mažesnėmis partijomis, todėl išvystytos „lanksčios“ gamybos linijos. Į lanksčiąsias gamybos linijas buvo integruojamos SPV staklės, kurios galėdavo būti perprogramuojamos skirtingoms detalėms apdirbti. Tokio tipo staklės tapo pagrindiniais „lanksčiųjų“ gamybos linijų, sistemų ir gamybos celių elementais [1].

Skaitmeninis programinis valdymas (SPV) susideda iš MMI (angl. *Man-Machine Interface*), NCK (angl. *Numerical Control Kernel*) ir PLC (angl. *Programable Logic Controller*) modulių. MMI modulis užtikrina sąsają tarp NCK ir naudotojo, vykdo rankines (ar pusiau automatines) komandas, atvaizduoja staklių ar atskirų elementų poziciją, bei (dažniausiai) suteikia galimybę naudotojui koreguoti detalių apdirbimo programas. NCK modulis yra pagrindinė SPV dalis, kuri pagal apdirbimo programos kodą, vykdo (servo) ašių interpoliaciją, pozicijos kontrolę bei netikslumų / klaidų kompensaciją. Šios funkcijos daugiausiai ir lemia, kaip detalė bus apdorota. PLC modulis paprastai užtikrina visų, išskyrus servo pavarų, staklių elementų (jutikliai, cilindrai, vožtuvai, konvejeriai ir t. t.) valdymą [2].

SPV staklės modifikuoja (frezuoja, gręžia, tekina, lenkia ar pan.) ruošinį pagal iš anksto suprogramuotas instrukcijas nesikišant operatoriui. SPV staklėse pagal programos instrukcijas gali būti automatiškai pozicionuojamas apdirbimo įrankis ir / arba apdirbamas ruošinys. Šie judesiai kontroliuojami kompiuteriniu procesoriumi, todėl staklių operatoriui nereikia valdyti staklių svirtimis, jungikliais ar limbais.

Programos (apdirbimo instrukcijos staklėms) sukuriamos naudojant CAM tipo programinę įrangą, kuri norimos detalės geometrinę formą pakeičia apdirbimo įrankio judėjimo trajektorijos koordinatėmis, ir sugeneruoja staklėms suprantamą instrukcijų seką.

Ankstyvosios SPV staklės naudojo įvairius programų formatus (perforuotose juostose arba sujungiant reikiamus trumpikius valdymo skyde) tačiau 1982 metais standartu ISO 6983 buvo aprašytas SPV staklių programavimas (žinomas kaip G-kodai arba RS274D [3]). Ši kompiuterinio valdymo staklių programavimo kalba vis dar dominuoja ir šiuolaikinėse SPV staklėse, tačiau norint išnaudoti visą šiuolaikinių staklių potencialą ir kompiuterines galimybes šio paprasto programavimo būdo nebeužtenka, todėl šiuo metu tobulinama ir pradedama naudoti STEP-NC programavimo kalba, kuri ne tik aprašo įrankio judėjimo trajektoriją, bet ji susiejama su detalės geometrija, bei užtikrina grįžtamąjį ryšį staklių valdymo sistemai [1]. Informacijos srautų kryptys SPV staklėse, naudojančiose G-kodų ir STEP-NC programavimo kalbą pavaizduotos 1 paveiksle.



1 pav. Informacijos srautai SPV staklėse naudojančiose G-kodą STEP-NC [1]

SPV staklės gali būti skirstomos į „pjovimo stakles“ ir „nepjovimo stakles“. Pjovimo staklės pašalina nereikalingą ruošinio dalį, taip pagamindamos užbaigtą detalę (frezavimo bei tekinimo staklės yra puikūs pjovimo staklių pavyzdžiai), nepjovimo staklės nenupjauna ruošinio dalių, bet kitaip jį modifikuoja – formuoja, suvirina nudažo ir kt. (SPV lenkimo presas ar suvirinimo robotas yra nepjovimo staklių pavyzdžiai) [2]. Kai kurios SPV staklės atlieka tiek pjovimo, tiek nepjovimo staklių funkcijas, tokių „dvilypių“ staklių pavyzdys yra SPV koordinatinio šampavimo staklės, kurios gali ne tik iškirsti lakšte kiaurymę (pjovimo staklių bruožas), bet ir suformuoti iškilimą, atlikti neaukštą lenkimą ar išformuoti sriegį (nepjovimo staklių bruožas). Nepriklausomai nuo SPV staklių klasifikacijos, visoms joms būtinas pozicionavimo tikslumas.

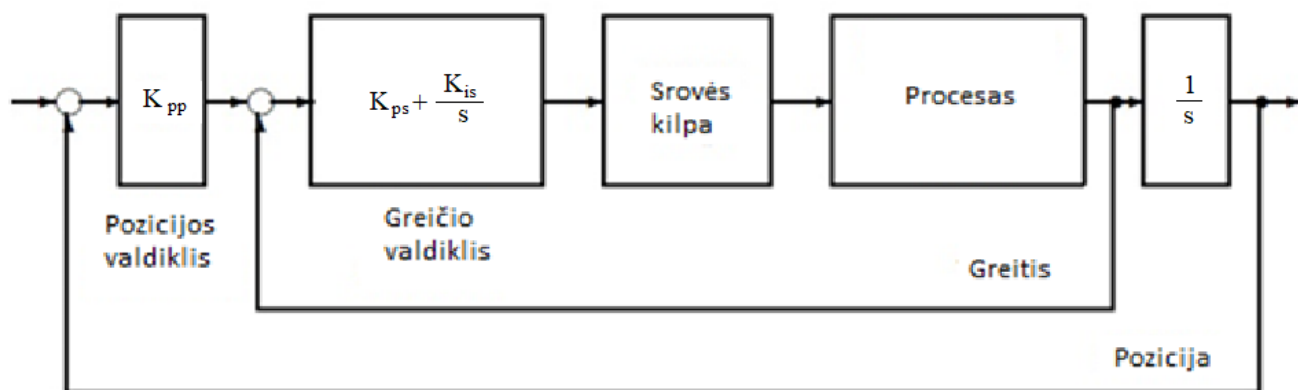
Šiame projekte tiriamos servo elektrinės SPV koordinatinio šampavimo staklės su integruota giljotina *PRIMA POWER Shear Genius 1530*. Šių staklių pagrindinė funkcija kiaurymių pramušimas lakšte (koordinatinis šampavimas), tačiau kadangi didžioji dauguma gaminamų lakštinio plieno detalių yra stačiakampio formos – ekonomiškiausias ir efektyviausias būdas joms pagaminti yra pirma išperforuoti reikalingas kiaurymes, o tada giljotina atidalinti (atkirpti) kontūrą [4]. Šis stačiakampio kontūro detalių gamybos procesas yra greitas, taupus (kirpimas, skirtingai nuo šampavimo yra beatliekinė technologija) bei užtikrinantis aukštą atkirptos briaunos kokybę [4].

1.2. Servo pavaros

SPV staklėse paprastai būna bent kelios (paprastai X ir Y) servo ašys. Servo ašis – tai (dažniausiai) elektros pavaras, kuri užtikrina staklių įrankio, ruošinio ar pagalbinio elemento tikslų judėjimą viena kryptimi (pvz.: vertikaliai). Servo ašis gali būti linijinė (kurianti tiesiaiegi judėjimą, kurio poslinkis

matuojamas milimetrais) arba sukamoji (kurianti sukamąjį judesį, kurio poslinkis matuojamas laipsniais).

Kiekviena servo ašis susideda iš elektroninio galios keitiklio, servo variklio, mechaninės perdavimo grandies ir galutinio vykdiklio [5]. Būtinasis servo pavaros komponentas yra grįžtamasis ryšys, pagal kurį nustatomas skirtumas tarp esamos ir norimos pozicijos (greičio ar pan.). Kadangi esama pozicija ir pozicijos kitimo greitis išmatuoti jutikliais (dažniausiai linijiniais ir/ar apskritimniais enkoderiais) pateikiami į valdymo grandinę – servo varikliai naudojami SPV staklėse nuolat valdomi, siekiant minimizuoti greičio ar pozicijos paklaidą (žr. 2 pav.) [2].



2 pav. Valdymo grandinės su grįžtamoju ryšiu pavyzdys, naudojant pozicijos, greičio ir srovės valdymo grandines [2]

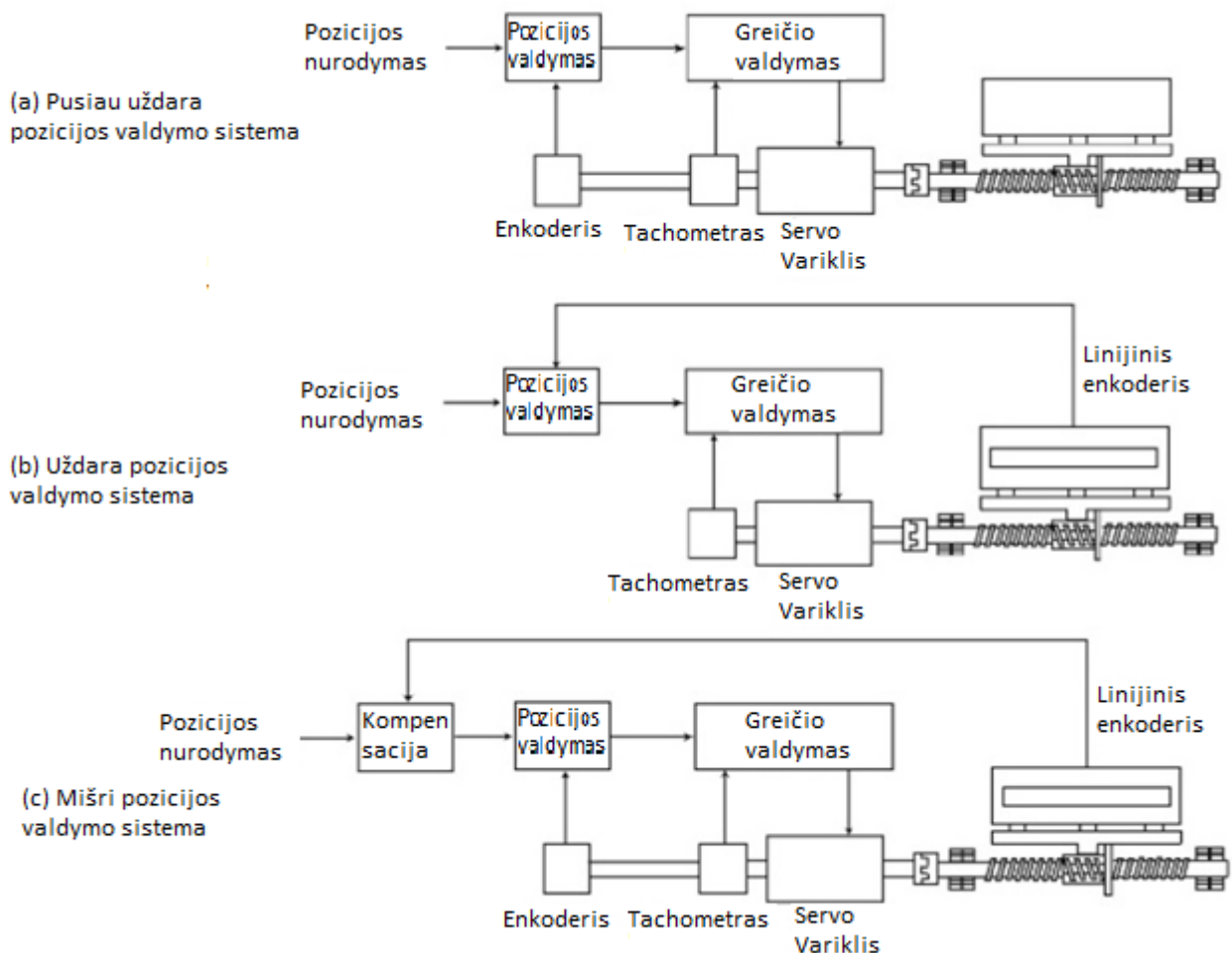
Pozicijos jutiklis (enkoderis) gali būti sujungtas su servo variklio velenu arba su mechanine servo pavaros grandimi. Pagal pozicijos jutiklio (enkoderio) instaliacijos vietą, pozicijos valdymo sistema gali būti skirstoma į 4 kategorijas (žr. 3 pav.) [2].

Pusiau uždaros pozicijos valdymo sistemos (angl. *Semi-closed loop*) yra pačios populiariausios SPV staklėse. Šio tipo sistemose pozicijos jutiklis (enkoderis) pritvirtintas prie servo variklio velenu ir matuoja servo variklio pasisukimo kampą. Ašies pozicionavimo tikslumui itin didelę įtaką daro sraigtinės perdavimo grandies tikslumas. Dėl šios priežasties sraigtinės mechaninės grandys naudojamos šiose sistemose, yra itin preciziškos, tačiau esant poreikiui gali būti naudojamos papildomos tikslumo užtikrinimo priemonės, tokios kaip ašies laisvumo kompensacija [2]. Šio tipo sistemos yra pigiausios, kadangi enkoderis dažnai būna integruotas į servo variklį. Be to su tokiu pačiu enkoderiu ir servo varikliu galima valdyti bet kokio ilgio ašį.

Uždaros pozicijos valdymo sistemos (angl. *Closed loop*) yra itin tikslios, kadangi pozicija matuojama ne pagal variklio apsisukimus, bet pagal faktinį ašies mechaninės dalies judesį. Tokiose sistemose dažniausiai naudojamas pozicionavimo jutiklis yra linijinis enkoderis. Tokio tipo sistemos paprastai būna brangesnės, o staklių gamintojai neretai renkasi pigesnę variantą. Be to, pozicijos jutiklio (linijinio enkoderio) kaina labai priklauso nuo ašies eigos ilgio (kuo ilgesnė eiga, tuo ilgesnis ir brangesnis linijinis enkoderis). Be to, mechaninės grandies pabaigoje sumontuotas linijinis enkoderis lengvai pažeidžiamas tiek dėl fizinių smūgių, tiek dėl naudojamų technologinių skysčių, tiek dėl vibracijos.

Mišrios pozicijos valdymo sistemos (angl. *Hybrid loop*) matuoja ir servo variklio pasisukimo kampą ir faktinį ašies mechaninės dalies poslinkį. Servo ašies valdymo sistema apdoroja duomenis iš abiejų pozicijos matavimo grandinių (variklio pasisukimo kampo bei mechaninės dalies postūmio) ir pagal įdiegtą algoritmą sugeneruoja reikiamą signalą vykdikliui (servo varikliui). Taip pasiekiamas maksimalus įmanomas ašies pozicionavimo tikslumas, kuris dažnai siekia 10^{-6} m. Šio tipo sistemos naudojamos itin retai, ir tik tuomet, kai reikalingas itin aukštas pozicionavimo tikslumas. Tokių valdymo sistemų didžiausias trūkumas yra aukšta kaina (lyginant su kitokio tipo pozicijos valdymo sistemomis).

Atvirosios valdymo sistemos (angl. *Open loop*) sutinkamos itin retai, kadangi šio tipo valdymo sistemose nėra pozicijos matavimo grįžtamojo ryšio, bet gali būti greičio ar srovės grįžtamieji ryšiai, o pozicionavimo tikslumas dažnai priklauso nuo naudojamo variklio. Tokios sistemos gali būti komplektuojamos su žingsniniais varikliais, tokiu atveju pozicionavimo tikslumas priklauso nuo žingsninio variklio tikslumo bei naudojamos mechaninės perdavimo grandies tikslumo [2]. Dėl mažos įrangos kainos ir riboto tikslumo kombinacijos atvirojo tipo valdymo sistemos dažniau naudojamos buitinėse (skirtose namų reikmėms) SPV staklėse (pvz., buitiniai 3D spausdintuvai). Tokio tipo servo ašių tikslumas neviršija 10^{-4} m, o pozicionavimo greitis keliskart mažesnis lyginant su servo ašimis, naudojanciomis servo variklius ir uždara ar pusiau uždara pozicijos valdymo sistema.



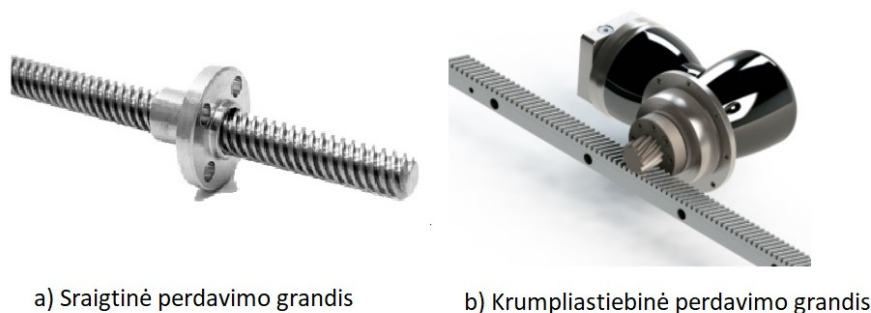
3 pav. Valdymo mechanizmų klasifikacija pagal pozicijos jutiklio instaliacijos vietą [2]: a) pusiau uždara matavimo grandinė; b) uždara matavimo grandinė; c) hibridinė matavimo grandinė

Mechaninė tiesiaieigių servo pavarų grandis privalo užtikrinti pakankamą pastūmos jėgą, akceleraciją, pozicionavimo bei trajektorijos tikslumą, statinį ir dinaminį servo ašies standumą [6]. Dažniausiai naudojami sprendimai sukamojo servo variklio judesiui keisti į tiesiaieigį yra sraigtinės (angl. *Ballscrew*) arba krumpliastiebinės (angl. *Rack and pinion*) perdavimo grandys (žr. 4 pav.). Šis pasirinkimas priklauso nuo servo ašies ilgio, norimo pasiekti tikslumo ir biudžeto [7].

Sraigtinės perdavimo grandys paprastai užtikrina tikslesnį pozicionavimą nedidelės eigos tiesiaieigėse servo pavarose. Sraigtinės grandies tikslumas tiesiogiai priklauso nuo sraigto standumo, o standumas priklauso nuo sraigto ilgio, sraigto skersmens ir veržlės pozicijos (vidurinėje padėtyje sraigtas lengviau išlenkiamas lyginant su galinėmis padėtimis, kur sraigtas įtvirtintas guoliuose) [8].

Siekiant užtikrinti pakankamą sraigtinės perdavimo grandies standumą ilgesnio sraigto skersmuo turi būti didesnis. Tai įtakoja visos servo pavaros dinaminį savybių prastėjimą dėl didėjančio sraigto inercijos momento, todėl sraigtinės perdavimo grandys negali būti efektyviai panaudojamos servo ašims, kurių pastūmos ilgis viršija 5 m [7], [9].

Servo pavarose su ilga (daugiau nei 3 m) pastūma dažniau naudojama krumpliastiebinė perdavimo grandis dėl to, kad krumpliastiebinės mechaninės grandies standumas nepriklauso nuo servo ašies ilgio.. Svarbų vaidmenį mechaninės grandies pasirinkime gali suvaidinti ir elementų kaina. Sraigtinės mechaninės grandies kaina kyla eksponentiškai didėjant ilgiui (dėl sudėtingos gamybos bei sraigto storio reikalavimų), o krumpliastiebinė grandis dažnai būna modulinė, todėl didinant ašies eigos ilgį tereikia papildomai įdiegti norimo ilgio krumpliastiebio segmentą. Tačiau krumpliastiebinėje perdavimo grandyje naudojamo (segmentinio) krumpliastiebio tikslumas retai kada gali užtikrinti šiuolaikiniams įrengimams keliamų tikslumo reikalavimų, dėl paklaidos krumpliastiebių gamyboje bei segmentinių krumpliastiebių surinkimo tolerancijos. Siekiant eliminuoti šį krumpliastiebių mechaninių grandžių trūkumą modernios pozicijos valdymo sistemos naudoja skirtingas pozicionavimo korekcijas skirtinguose krumpliastiebio eigos intervaluose. Šiame projekte bus tiriamos servo ašys naudojančios sraigtinės perdavimo grandis (*Y* ašis ~1600 mm eiga) bei servo ašys naudojančios krumpliastiebines perdavimo grandis (*X* ašis ~3100 mm eiga).



4 pav. Tiesiaieigių servo ašių naudojamos mechaninės perdavimo grandys: a) sraigtinė perdavimo grandis; b) krumpliastiebinė perdavimo grandis [10]

Servo pavarose dažniausiai naudojami klasikiniai nuolatinės srovės servo varikliai arba sinchroniniai kintamos srovės servo varikliai. Projektuojant modernias aukštos kokybės servo pavaras vis dažniau pasirenkami sinchroniniai kintamos srovės servo varikliai. Pažangios valdymo sistemos ir galios elektronika užtikrina nepriekaištingą šių variklių veikimą ir sumažina servo pavaros kainą (dėl

pigesnio kintamo srovės servo variklio). Pagrindinis kintamos srovės variklio privalumas yra jo patikimumas (daugiausiai dėl šepetėlių nebuvimo), geresnių sukimo momento bei greičio charakteristikų, mažiau reikalaujamos priežiūros. Be to naudojant kintamos srovės variklius kyla mažiau problemų dėl elektromagnetinių trukdžių. Dar vienas svarbus skirtumas tarp nuolatinės srovės servo variklio ir sinchroninio kintamos srovės servo variklio yra sukimo momento priklausomybė nuo greičio. Nuolatinės srovės servo variklio sukimo momentas mažėja pasiekus didelį greitį, o sinchroninio kintamos srovės servo variklio sukimo momentas beveik nekinta visame greičių diapazone [11].

Šiame projekte tiriamos staklės visoms servo ašims naudoja pusiau uždara pozicijos valdymo sistemą su sinchroniniais kintamos srovės servo varikliais. Dėl servo ašių paskirties įvairovės šiose staklėse naudojami net keli skirtingi mechaninės grandies sprendimai, kurie pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. *PRIMA POWER* koordinatinių šampavimo staklių su integruota giljotina *Shear Genius 1530* servo ašių ypatybės [4]

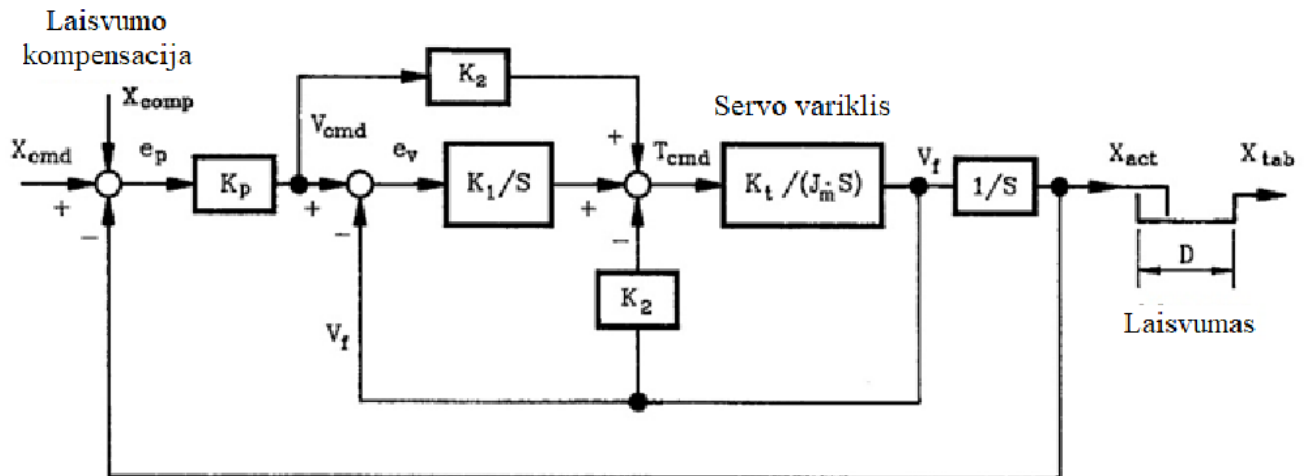
Servo ašis	Paskirtis	Tipas	Eigos diapazonas	Mechaninė grandis
X	Lakšto pozicionavimas X kryptimi	Linijinė	-50...3050 mm	Krumpliaštinė
Y	Lakšto pozicionavimas Y kryptimi	Linijinė	-35...1535 mm	Sraigtinė
Z1	Viršutinio įrankio pasukimas	Rotacinė	0...360°	Sliekinis reduktorius
Z2	Apatinio įrankio pasukimas	Rotacinė	0...360°	Sliekinis reduktorius
TUR	Įrankių būgno pasukimas (keičiant įrankius)	Rotacinė	0...360°	Diržinė + krumpliaratinė
RAM	Šampavimo judesys spaudžiant žemyn puansoną	Linijinė	-2,5...50 mm	Sraigtinė + pleištinė
RS	Kirpimo judesys spaudžiant žemyn giljotinos peilius	Linijinė	0..80 mm	Sraigtinė + pleištinė

1.3. Servo pavarų tikslumo problemos

Laisvumas (angl. *Backlash*) yra dažna ir sunkiai sprendžiama problema skaitmeninio programinio valdymo apdirbimo staklėse, kuri gali pakenkti kontūro apdirbimo tikslumui [12]. Didžioji dalis tyrimų, susijusių su laisvumo paklaidų tyrimu, buvo nukreipta į tradicines SPV stakles, naudojančias pusiau uždara pozicijos valdymo sistemą. Tokiose sistemose laisvumas yra nuolatinis ir pastovus (toje pačioje pozicijoje). Tam, kad būtų pasiektas geresnis tikslumas uždaro kontūro pozicijos valdymo sistemos gali būti naudojamos vietoj pusiau uždara pozicijos valdymo sistemų, to pasiekoje eliminuojamas nuolatinis servo ašių laisvumas, bet trumpalaikis laisvumo (angl. *Transient Backlash Error*, toliau naudojamas trumpinys TBE) vis dar išlieka servo ašies postūmio pradžios momentu ir keičiant servo ašies judėjimo kryptį. Tai reiškia, kad uždarosios pozicijos valdymo sistemos negali visiškai panaikinti laisvumų įtakotos apdirbimo paklaidos [13].

Servo ašies laisvumo kompensavimo algoritmai yra plačiai naudojami siekiant pagerinti apdirbimo tikslumą. 5 paveiksle pavaizduota tipinė SPV staklių servo ašies valdymo blokinė diagrama su greičio ir pozicijos kontūrais bei fiksuota laisvumo kompensacija. Paprastai tokią (ar panašią) valdymo sistemą turi kiekviena staklėse esanti servo ašis. Šioje diagramoje X_{cmd} – pozicijos komanda (arba norima pasiekti pozicija), X_{act} – pozicijos grįžtamasis ryšys (pusiau uždaroje valdymo grandinėse tai

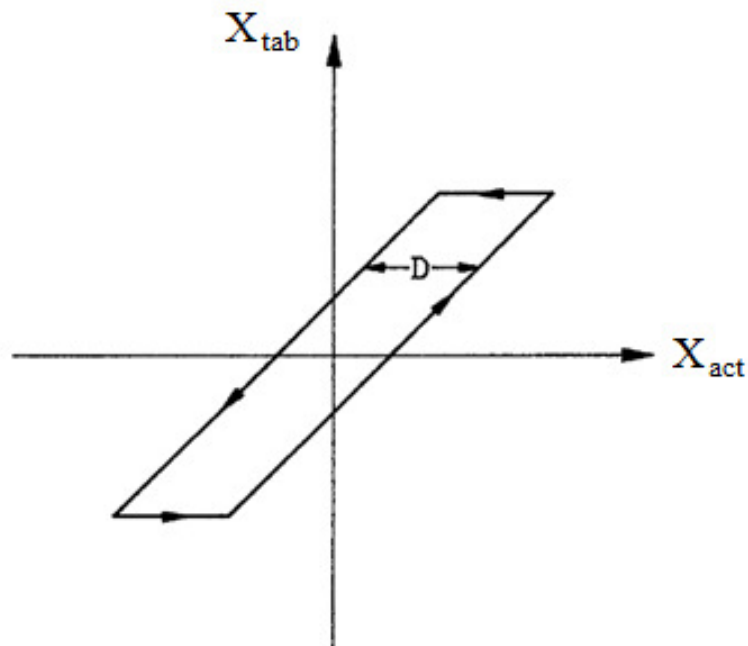
servo variklio pasukimo kampo jutiklio (enkoderio) signalas), o X_{tab} – faktinis servo ašies mechaninis judesys.



5 pav. Servo ašies valdymo blokinė diagrama su greičio ir pozicijos kontūrais bei fiksuota laisvumo kompensacija [14]

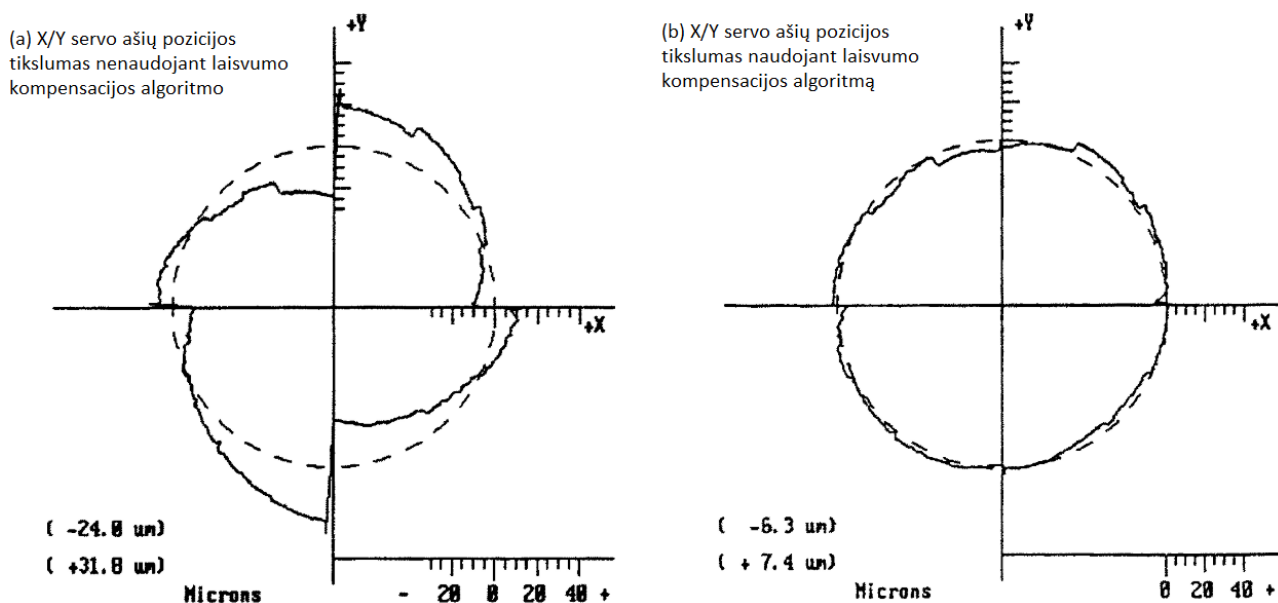
Žinant, kad egzistuoja laisvumas (pažymėtas D) tarp servo variklio pasukimo kampo X_{act} ir faktinio mechaninio judesio X_{tab} , staklių mechaninis judesys negali tiksliai atkartoti variklio generuojamo judesio, t. y. Galutinė mechaninė servo ašies dalis X_{tab} nepradės judėti, kol X_{act} nenukeliaus atstumo D ir neatsiras mechaninis kontaktas su X_{tab} . Pakeitus variklio sukimosi kryptį X_{act} ir X_{tab} nejudės kartu tol, kol X_{act} nesugrįš atstumo D ir vėl neatsiras mechaninis kontaktas su X_{tab} [14].

X_{act} ir X_{tab} priklausomybė nuo servo ašies judesio krypties pavaizduota 6 paveiksle.



6 pav. X_{act} ir X_{tab} priklausomybė nuo servo ašies judesio krypties [14]

Siekiant išmatuoti servo ašių laisvumą X / Y plokštumoje dažnai naudojama apskritiminė interpoliacija, ir specialiu matavimo prietaisu fiksuojamas faktinis mechaninės dalies (stalo arba įrankio) judesys. 7 paveiksle pavaizduotas matavimo prietaiso fiksuojamas faktinis judesys, nenaudojant (a) ir naudojant (b) ašių laisvumo kompensacijos algoritmą [14]. Šiame pavyzdyje matoma, kad naudojant servo ašių laisvumo kompensacijos algoritmą apskritimo spindulio paklaida sumažėjo nuo $-24...+31 \mu\text{m}$ iki $-6,3...+7,4 \mu\text{m}$. Tai puikiai iliustruoja laisvumo kompensacijos algoritmo veiksmingumą.



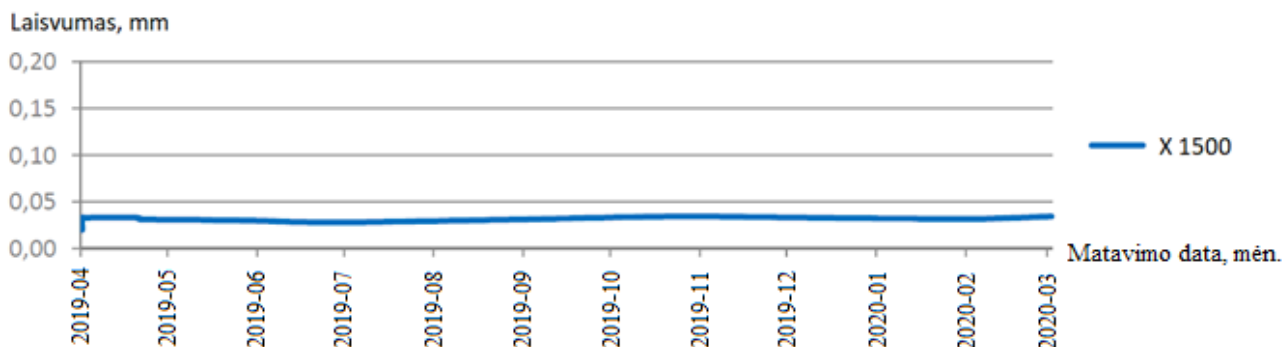
7 pav. X / Y ašių pozicionavimo tikslumas, nenaudojant (a) ir naudojant (b) ašių laisvumo kompensacijos algoritmą [14]

Tačiau laisvumo kompensacija efektyvi tik tuomet, kai yra žinomas servo ašies mechaninis laisvumas kiekviename servo ašies ilgio segmente [15]. Paprastai SPV staklių gamybos proceso pabaigoje išmatuojamas kiekvienos ašies laisvumas ir gautos reikšmės įvedamos į laisvumo kompensacijų lenteles servo ašių parametruose. Todėl naujos SPV staklės paprastai pasižymi itin dideliu tikslumu ir paklaidos paprastai neviršija $5-7 \mu\text{m}$. Bet naudojant SPV stakles, dėl trinties ar kitų mechaninių poveikių šie laisvumai nuolat didėja ir nebeatitinka gamykliškai išmatuotųjų, todėl laisvumo kompensacijos algoritmai negali efektyviai eliminuoti servo ašių pozicionavimo paklaidos. Tokiu atveju rekomenduojama iš naujo išmatuoti kiekvienos ašies laisvumą kiekviename servo ašies ilgio segmente ir atnaujinti duomenis laisvumo kompensacijų parametruose.

Šiai procedūrai paprastai reikalingi aukšto lygio specialistai ir brangi matavimo technika, kurių samdymas, nuoma bei transportavimas sudaro ženklią profilaktikos ir remonto kaštų dalį. Siekiant išvengti šių kaštų gali būti naudojama nuolatinis staklių būklės stebėjimas (angl. *Condition Monitoring*). Šis diagnostinis metodas apima platų naudingų įrankių spektrą, kurie palengvina staklių priežiūrą ir padeda optimizuoti viso gamybos proceso parametrus. Nuolatiniam staklių būklės stebėjimui reikalinga informacija apie komponentų veikimo parametrus, kurią išanalizavus pateikiamas komponentų būklės įvertinimas. Ši informacija paprastai gaunama įdiegus papildomus jutiklius, tačiau tai ne visuomet įmanoma dėl papildomų kaštų ar staklių ypatybių. Staklių būklės stebėjimui gali būti naudojami duomenys, kuriuos (be papildomų jutiklių) jau turi pagrindinis staklių valdiklis ir servo stiprintuvai [16]. SPV staklių gamintojas *PRIMA POWER* siūlo nuotolinio staklių

būklės stebėjimo (angl. *Remote Machine Condition Monitoring*) paslaugą, į kurią įeina ir servo ašių laisvumo stebėjimas.

Kasmėnesinėje staklių būklės ataskaitoje staklių operatoriui pateikiami duomenys apie servo ašių laisvumą (žr. 8 pav.) ilgio segmentuose kas 500 mm, servo variklių srovės, temperatūros grafikai ir kita su staklių naudojimu susijusi informacija.



8 pav. X ašies laisvumo tendencijos pavyzdys koordinatėje 1500 mm [17]

Ši informacija leidžia operatoriui įvertinti staklių dėvėjimosi intensyvumą, nuspėti grėšiančius gedimus ar identifikuoti neteisingą staklių naudojimą. Įvertinus servo ašių laisvumus, galima koreguoti jų laisvumo kompensacijų parametrus taip optimizuojant pozicionavimo tikslumą. Visgi programinis laisvumo kompensacijos algoritmas eliminuoja apie 70–80 % mechaninio laisvumo, tai reiškia, kad didėjant mechaniniam laisvumui, net ir naudojant kompensacijos algoritmus, įrengimo tikslumas mažėja, kol pasiekiamas ribinė staklių būklė kuomet kompensacijos algoritmo nebeužtenka norimam staklių tikslumui užtikrinti. Tuomet turi būti keičiami susidėvėję mechaniniai įrengimo mazgai.

2. Eksperimentinė dalis

2.1. Tyrimo objektas

Šio projekto tyrimų objektas *PRIMA POWER Shear Genius 1530* koordinatinio šampavimo staklių tiesiaieigės *X* ir *Y* ašių servo pavaros.

Šios koordinatinio šampavimo naudoja skaitmeniniu programiniu būdu valdomas (STEP-NC) servo elektrines ašis (įskaitant ir 300 kN jėgą generuojančią išskirtimo ašį), kurios užtikrina nepriekaištingą sunaudojamos energijos efektyvumą, mažus reikalavimus priežiūrai ir itin greitą gamybą.

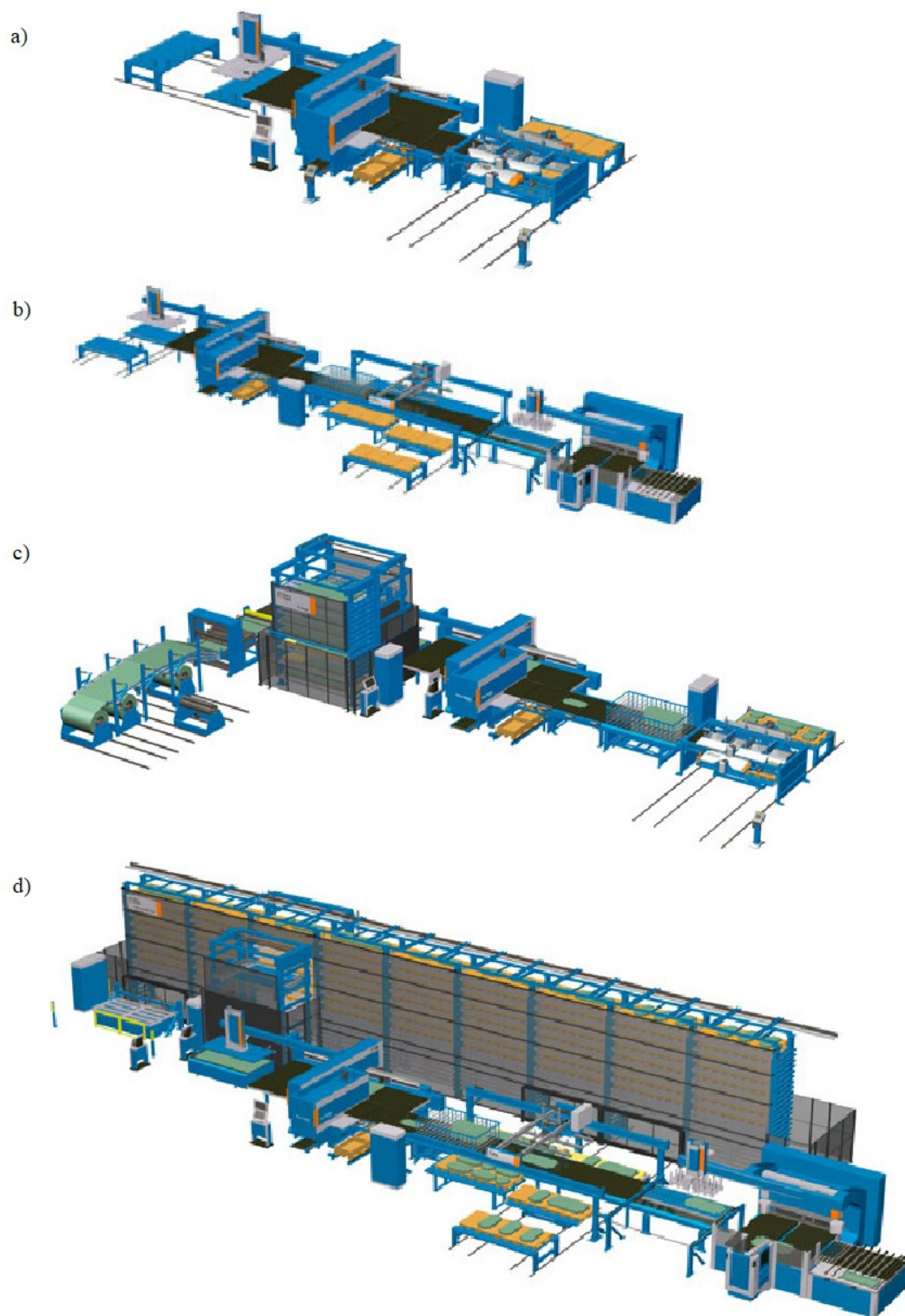
PRIMA POWER Shear Genius 1530 staklių pagrindinės funkcijos – kiaurymių pramušimas lakšte (koordinatinis šampavimas) bei stačiakampio kontūro atkirpimas, tačiau apart šių funkcijų, šios staklės gali atlikti iki 16 mm aukščio lenkimą/formavimą (su papildoma „up-forming“ parinktimi), sriegimą, markiravimą bei kitas funkcijas. Staklės gali būti komponuojamos su įvairiomis žaliavos sandėliavimo bei tiekimo sistemomis, pagamintų detalių nukrovimo/rūšiavimo robotais ar kitais įrenginiais taip sukuriant lanksčią gamybos sistemą (FMS).

Įvairios *PRIMA POWER Shear Genius* staklių su papildomais įrengimais kombinacijos parodytos 9 paveiksle. Pagrindinės *Shear Genius* staklių techninės charakteristikos pateiktos 2 lentelėje [18], [19].

2 lentelė. *PRIMA POWER* koordinatinių šampavimo staklių su integruota giljotina *Shear Genius 1530* pagrindinės techninės charakteristikos [4]

Charakteristika	Matavimo vienetas	Reikšmė
Maksimalus apdirbamo lakšto dydis	mm	1500 × 3000
Maksimali šampavimo jėga	kN	300
Maksimalus šampavimo greitis	l/min	1000
Maksimalus ašių pozicionavimo greitis	m/min	150
Maksimalus įrankio sukimosi greitis	aps/min	250
Maksimalus įmanomas (pasukamų) įrankių kiekis	vnt.	(128) 384
Maksimalus lakšto storis šampavimui	mm	8
Maksimalus lakšto svoris	kg	250
Vidutinės elektros sąnaudos	kW	5

PRIMA POWER Shear Genius staklių universalumą parodo galimybės prie šio įrengimo prijungti skirtingus automatizacijos komponentus, paverčiant šias sistemas skirtingomis lanksčios gamybos celėmis (FMC), linijomis (FML) ar net sistemomis (FMS). 9 paveikslo dalyje *a* pavaizduota *PRIMA POWER Shear Genius 1530* staklių su automatiniu lakštų užkrovimo bei detalių rūšiavimo įrenginiais. *b* dalyje pavaizduota *PRIMA POWER Shear Genius 1530* staklių su automatiniu lakštų užkrovimo įrenginiu, detalių rūšiavimo robotu bei lankstymo centru.



9 pav. Įvairios Shear Genius staklių kombinacijos su skirtingais automatizacijos lygiais [4]

Dalyje *c* pavaizduota *PRIMA POWER Shear Genius 1530* staklių su automatine skardos rulonų išvyniojimo / karpymo linija, automatiniu žaliavos (lakštų) sandėliu, tarpinio detalių kaupimo įrenginiu bei detalių rūšiavimo įrenginiu, o dalyje *d* – su automatiniu žaliavos / detalių sandėliu, tarpinio detalių kaupimo įrenginiu, detalių rūšiavimo robotu bei lankstymo centru.

2.2. Tikslumo matavimo metodika

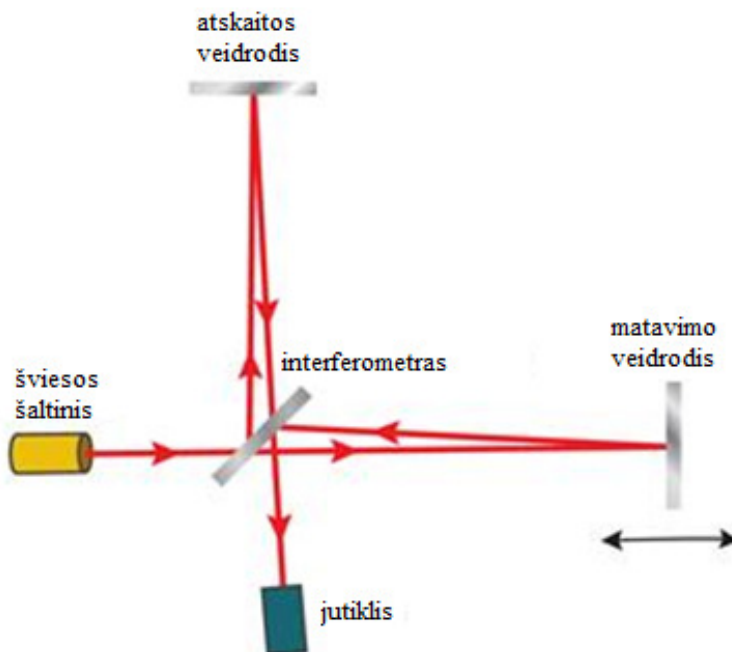
Įrengimų, kurių tikslumas siekia 0,01–0,1 mm, gamintojai atlieka kiekvieno pagaminto įrengimo tikslumo matavimus. Šie matavimai užtikrina, kad nauji įrenginiai atitiktų tikslumo standartus. Naujai gaminamų staklių tikslumo matavimai atliekami keliais etapais pagal skirtingas metodikas, taip užtikrinant savalaikį broko ar padidėjusios paklaidos aptikimą ir pašalinimą staklių gamybos ar eksploatavimo eigoje.

2.2.1. Tiesiaeigių servo pavarų pozicionavimo tikslumo matavimas lazeriniu interferometru

Vienas iš servo pavarų tikslumo nustatymo būdų – tai matavimai atliekami naudojant lazerinį interferometrą. Ši matavimo metodika taikoma nuo 1970 m. ir yra pripažinta tarptautiniu mastu. Lazerinis interferometras – tai optinis įrenginys, kuris naudodamasis šviesos interferencijos reiškiniu, gali 0,633–1,266 μm tikslumu [20] išmatuoti poslinkio ilgį staklėse. Interferometro veikimo principas pavaizduotas 10 paveiksle.

Tiesiaeigių ašių pozicionavimo nuokrypių matavimas atliekamas kiekvienoms naujoms *PRIMA POWER* staklėms, taikant apdirbimo staklių tikslumo ir pasikartojamumo standartą VDI/DGQ 3441 [21]. Bandymams atlikti naudojama *RENISHAW* matavimo sistema, susidedanti iš:

- lazerio (ML10);
- linijinio interferometro;
- atšvaito;
- automatinio temperatūros kompensatoriaus;
- laikiklių.



10 pav. Lazerinio interferometro veikimo principas [20]

Atliekami du vienas po kito einantys matavimai. Pirmąjį kartą matavimai atliekami kas 100 mm eigos kiekvienoje tiesiaeigėje servo pavaroje, ir pagal gautus matavimo rezultatus yra pakoreguojama servo ašių kompensacijų lentelės. X ašies kompensacijų lentelės pavyzdys pateiktas 11 paveiksle.

Name	Achse-Korr. Korrekturtabelle Positiv	
Status	OK	
Min / Max	-3000.0000 / 3000.0000	mm
Elements	Act: 26 Max: 500	
0	0.0000	
1	-0.0140	
2	-0.0310	
3	-0.0510	
4	-0.0610	
5	-0.0740	
6	-0.0960	
7	-0.1120	
8	-0.1260	
9	-0.1450	
10	-0.1700	
11	-0.1820	
12	-0.1930	
13	-0.2080	
14	-0.2300	
15	-0.2450	
16	-0.2550	
17	-0.2700	
18	-0.2860	
19	-0.2990	
20	-0.3100	
21	-0.3270	
22	-0.3520	
23	-0.3610	
24	-0.3750	

11 pav. X servo ašies kompensacijų lentelės pavyzdys *IndraWorks* servo ašių valdymo programinėje aplinkoje

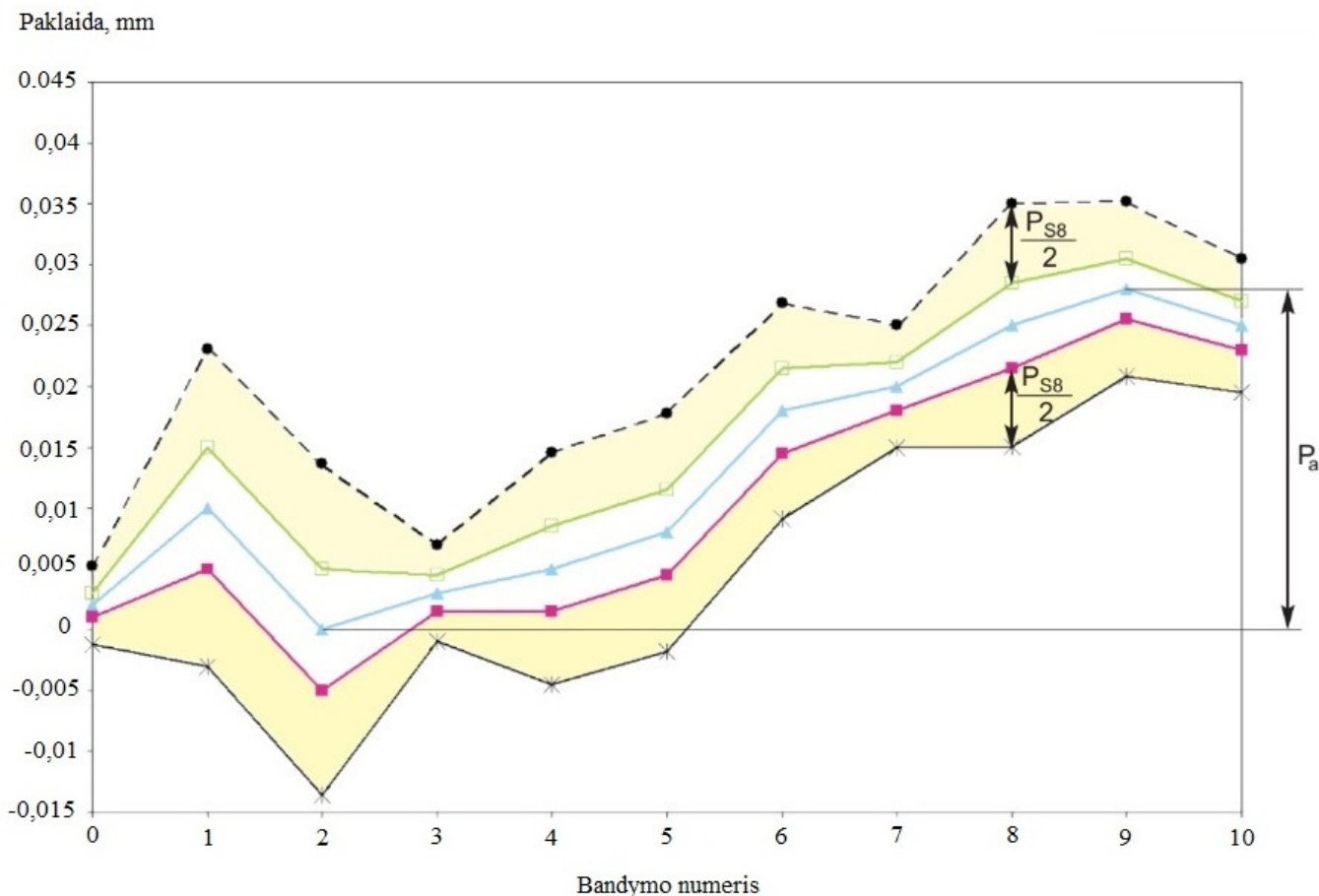
Antrąjį kartą atliekant servo ašių tikslumo matavimus lazeriniu interferometru, naudojami paklaidos kompensacijos algoritmai, kurie kompensuoja servo ašių poziciją, pagal ankstesniuose matavimuose užpildytas kompensacijų lenteles. Antrasis matavimas parodo galutinį servo ašių tikslumą, kuris įtakos staklėmis gaminamų detalių tikslumą. Atliekant šį bandymą nustatomi staklių tiesiaiegių ašių (*X* ir *Y*) pozicionavimo nuokrypiai (P_a) ir pozicionavimo sklaidos (P_s). Kiekvienas matavimas atliekamas po kelis kartus skirtingose koordinatėse repositionuojant servo ašis „+“, ir „-“ kryptimis, o galutiniai rezultatai apskaičiuojami pasitelkiant statistinius metodus.

Pozicionavimo nuokrypis P_a , kaip visos sistemos paklaida, nurodomas didžiausias iš išmatuotų nuokrypių (visose matuotose pozicijose) pasirinktoje servo ašyje.

Pozicionavimo sklaida P_s nurodo atsitiktinių nuokrypių efektą kiekvienoje pasirinktos servo ašies pozicijoje. Vidutinė pozicionavimo sklaida $\overline{P_s}$ gaunama apskaičiuojant visų išmatuotų nuokrypių aritmetinį vidurkį.

Staklių *PRIMA POWER* tikslumas atitinka VDI/DGQ 3441 standartą, jei išmatuotos P_a ir \overline{P}_s reikšmės yra mažesnės (arba lygios) reikšmėms pateiktoms 3 lentelėje.

Vidutinė pozicionavimo sklaida \overline{P}_s gali būti apskaičiuota atlikus ne mažiau nei 10 matavimų servo ašį judinant „+“ kryptimi ir ne mažiau nei 5 matavimus – „-“ kryptimi. Atlikus matavimus ir išanalizavus matavimo duomenis *PRIMA POWER* pateikia grafiką, kurio pavyzdys pateiktas 12 paveiksle. Mėlyna linija vaizduoja pozicionavimo nuokrypį nuo norimos pozicijos, žalia – pozicionavimo nuokrypis servo ašį judinant „-“ kryptimi, raudona – pozicionavimo nuokrypis servo ašį judinant „+“ kryptimi.



12 pav. Matavimų pagal VDI/DGQ 3441 standartą išanalizuotų duomenų grafiko pavyzdys

3 lentelė. Maksimalūs leistini *PRIMA POWER* staklių nuokrypiai, nuokrypiams matuoti/apskaičiuoti naudojama metodika pateikta VDI/DGQ 3441 standarte [21]

Įrengimas	Servo ašis	P_a		\overline{P}_s	
		mm	in	mm	in
<i>PRIMA POWER Shear Genius 1530</i>	X	0,03	0,001181	0,03	0,001181
	Y	0,03	0,001181	0,03	0,001181

Matavimo naudojant lazerinį interferometrą rezultatai įtraukiami į staklių tikslumo atitikties sertifikatą kartu su grafikais kiekvienai matuotai tiesiaeiगेi servo ašiai.

Ši matavimo metodika nustato tiesiaieigių servo ašių pozicionavimo paklaidas ir servo ašių mechaninių grandžių būklę, bet dėl itin brangios matavimo įrangos (iki ¼ staklių kainos) šis matavimas paprastai atliekamas tik naujai pagamintoms staklėms *PRIMA POWER* gamykloje.

2.2.2. Štampavimo tikslumo bandymas ir matavimai

PRIMA POWER staklių štampavimo tikslumo testas LKP-7100 yra nuolatinio staklių kokybės gerinimo programos dalis. Šis testas užtikrina, kad *PRIMA POWER* koordinatinio štampavimo staklės atitinka štampavimo tikslumui keliamus reikalavimus. Štampavimo tikslumo bandymas atliekamas kiekvienoms *PRIMA POWER* gamykloje pagamintoms koordinatinio štampavimo staklėms prieš jas pateikiant galutiniam naudotojui. *PRIMA POWER* koordinatinio štampavimo staklės privalo atitikti tikslumo reikalavimus ir užtikrinti išštampuotų skylių matmenis leidžiamose tolerancijos ribose. Šio bandymo rezultatai pateikiami kartu su naujomis koordinatinio štampavimo staklėmis (bei išsaugomi *PRIMA POWER* archyve). LKP-7100 bandymą sudaro specialiai šiam tikslui suprojektuotos detalės štampavimas (naudojant tiriamas koordinatinio štampavimo stakles), pagamintos detalės matavimas, matavimo rezultatų analizavimas bei galutinių duomenų pateikimas.

Tikslumo matavimams naudojama NC programa aprėpia visus svarbius veiksnius, galinčius turėti įtakos štampavimo tikslumui. Skylių štampavimo eiliškumas yra nekintantis, todėl kiekvieną kartą atliekant štampavimo tikslumo bandymą kiaurymės iškertamos tokia pačia tvarka. Iš bandyme pagamintos detalės galima nustatyti tokius staklių tikslumo aspektus:

- geometrinis ir dinaminis *X* ir *Y* ašių tikslumas;
- *X* ir *Y* ašių statmenumas;
- atstumų tarp skylių tikslumas;
- įrankių būgno pozicionavimo tikslumas (3-ose pozicijose);
- įrankio pėsėjimo šio tikslumas;
- įrankio pasukimo ašies tikslumas skirtingose pozicijose;
- lakšto repozicionavimo tikslumas.

Bandomojo gaminio matavimai atliekami skaitmeninio programinio valdymo matavimo staklėmis, naudojant šiam gaminiui skirtą matavimo programą, taip iki minimumo sumažinant programuotojo ar matuotojo įtaką matavimų rezultatams. Matavimams atlikti naudojamas 1,5 mm ir 1 000 × 1 000 mm dydžio šalto valcavimo plieno (atitinkantis standartus SP10; DIN 1541; SFS 4466) lakštas. Būtina sąlyga: štampavimas turi būti atliekamas, kai staklių ir aplinkos temperatūra yra 20°C +/- 3°C. Bandymas atliekamas naudojant 12–31 mm skersmens apvalius įrankius ir 5 × 88 mm stačiakampį įrankį. Visų naudojamų įrankių prošvaisa turi būti 0,3 mm. Skylių pramušimo eiliškumas, kiekvienos skylės aprašymas ir paskirtis nurodyta 4 lentelėje. Štampavimo eiliškumas kartu su judėjimo kryptimi pateiktas 13 paveiksle.

4 lentelė. LKP-7100 tikslumo bandymo skylių paskirtis [22]

Skylės numeris / eiliškumas	Matavimų paskirtis
1-4	Smūgiai kampuose – <i>X</i> / <i>Y</i> ašių statmenumui matuoti
5-10	Smūgiai <i>X</i> / <i>Y</i> ašių suminei paklaidai nustatyti
11-16	Smūgiai <i>Y</i> ašies paklaidai nustatyti

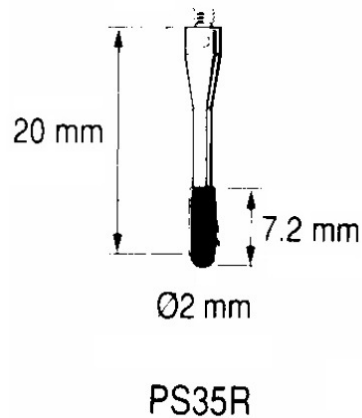
Skylės numeris / eiliškumas	Matavimų paskirtis
17–22	Smūgiai <i>X</i> ašies paklaidai nustatyti
23–26	Smūgiai atstumo tarp skylių (50 mm) tikslumui nustatyti <i>X</i> ašimi
27–30	Smūgiai atstumo tarp skylių (50 mm) tikslumui nustatyti <i>Y</i> ašimi
Įrankio keitimas	
31–32	2 ^o įrankių laikiklio tikslumui nustatyti
Įrankio keitimas	
33–34	3 ^{io} įrankių laikiklio tikslumui nustatyti
Įrankio keitimas	
35–36	Susiliečiantys smūgiai įrankiui pasisukus 0°
37–38	Susiliečiantys smūgiai įrankiui pasisukus 0°
39–40	Susiliečiantys smūgiai įrankiui pasisukus 90°
41–42	Susiliečiantys smūgiai įrankiui pasisukus 90°
43	Smūgiai įrankiui pasisukus 10° teigiama kryptimi
44	Smūgiai įrankiui pasisukus 15° teigiama kryptimi
45	Smūgiai įrankiui pasisukus 70° teigiama kryptimi
46	Smūgiai įrankiui pasisukus 15° teigiama kryptimi
Lakšto repozicija	
47	Pirmas smūgis po lakšto repozicijos
48	Antras smūgis po lakšto repozicijos

Kadangi šiame projekte tiriamas tiesiaeigių servo pavarų pozicionavimo tikslumas, todėl tyrimuose bus analizuojami nuo 1 iki 30 skylių pozicijos nuokrypiai ir jų priežastys.

Šio bandymo detalės gamyba atliekama nustatčius 100 % servo ašių greitį ir 100 % servo ašių akseleraciją. Štampavimo įrankio pastūmos greitis – taip pat 100 %. Siekiant geresnio referencinių skylių tikslumo, 1–4 smūgiai atliekami praėjus 200 ms po pozicionavimo (tai leidžia nusistovėti tiksliai servo ašių pozicijai bei eliminuoja paklaidas atsirandančias dėl lakšto vibracijos). Visi vėlesni bandymo smūgiai atliekami iškart po servo ašių pozicionavimo (taip bandymo sąlygas maksimaliai priartinant prie realios gamybos ciklo).

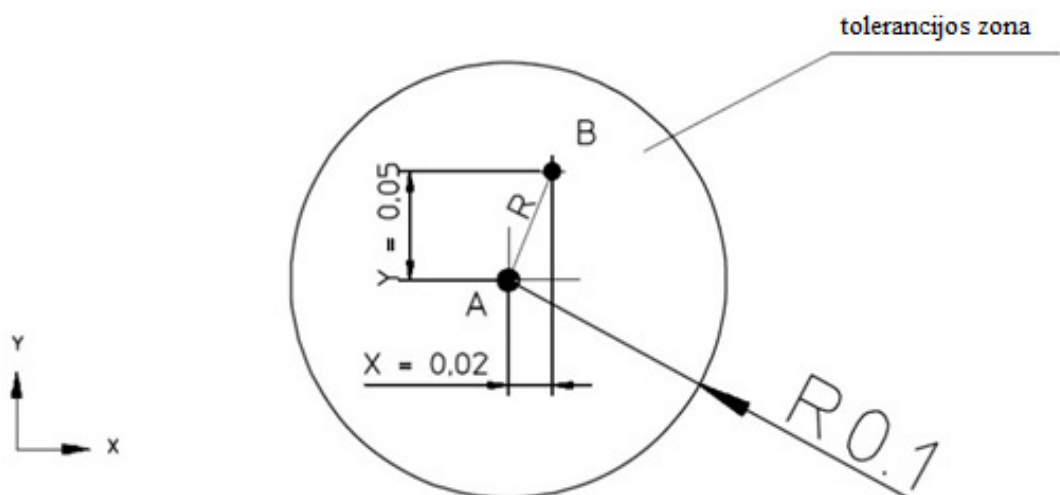
$$2,8 + 1,0 * \frac{1000}{333} = 5,8 \mu\text{m}.$$

Matavimų atskaitos taškas (koordinatinių sistemos pradžia) yra laikoma 2 skylės geometrinis centras, kuriame X ašis eina per 2 ir 3 skylės centrus, o Y ašis eina per 2 ir 1 skylės centrus. Kiekvienos apvalios skylės matavimas atliekamas matavimo staklių liestuku aptinkant 4 skylės briaunos taškus, o programinė įranga apskaičiuoja skylės centro poziciją, pagal 4 taškų matavimo rezultatus.



14 pav. LKP-7100 tikslumo bandymo matavimams naudojamas liestukas [22]


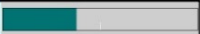




Kiekvienos tolesnės skylės (5–30 skylės) išmatuotos (apskaičiuotos) centro koordinatės lyginamos nominaliomis (absoliučiai teisingo centro koordinatėmis) X ir Y ašių kryptimi. Tolerancijos zona yra apskritimas aplink nominalią koordinatę kaip parodyta 14 paveiksle (kiekvienos skylės tolerancijos zona gali būti skirtinga, pvz. 5–10 skylių tolerancijos zonos skersmuo 0,2 mm, o 23–30 skylių tolerancijos zonos skersmuo 0,1 mm). Jeigu išmatuota skylės centro koordinatė nepatenka į tolerancijos zoną – koordinatinio štam pavimui stakles reikia remontuoti arba reguliuoti. Pavyzdyje pateiktame (žr. 15 pav.) taške A yra nominalus skylės centras, taške B išmatuotas tikrasis skylės centras, R – skylės pozicijos nuokrypis (apskaičiuojamas iš X ir Y nuokrypių pagal formulę $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$).



15 pav. LKP-7100 tikslumo bandymo matavimo apvalios skylės pozicijos nuokrypio pavyzdys

Matavimo protokolas su išmatuotais kiekvienos skylės nuokrypiais ir rekomendacijomis (jei nuokrypiai viršija tolerancijos ribas) būna pridedamas prie staklių dokumentacijos (naujoms staklėms) arba perduodamas klientui (jeigu kliento iniciatyva šis bandymas atliktas jau naudojamoms staklėms).

Matavimo protokolo pavyzdžio fragmentas yra pateiktas 16 paveiksle, jame matomas 5, 6 ir 8 skylių nominalios koordinatės, išmatuotos koordinatės, nuokrypiai ir tolerancijos ribos.

HOLE NO:5 PLACE						
AX	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	OUTTOL	
X	849.966	850.000	0	0	0	
Y	650.017	650.000	0	0	0	
TP	0	RFS	0.200	0	0.000	
R						
M	0.038	0.000	0.038	0.100	0.000	
HOLE NO:6 PLACE						
X	649.958	650.000	0	0	0	
Y	800.012	800.000	0	0	0	
TP	0	RFS	0.200	0	0.000	
R						
M	0.044	0.000	0.044	0.100	0.000	
HOLE NO:8 PLACE						
X	449.946	450.000	0	0	0	
Y	800.015	800.000	0	0	0	
TP	0	RFS	0.200	0	0.000	
R						
M	0.056	0.000	0.056	0.100	0.000	
HOLE NO:10 PLACE						

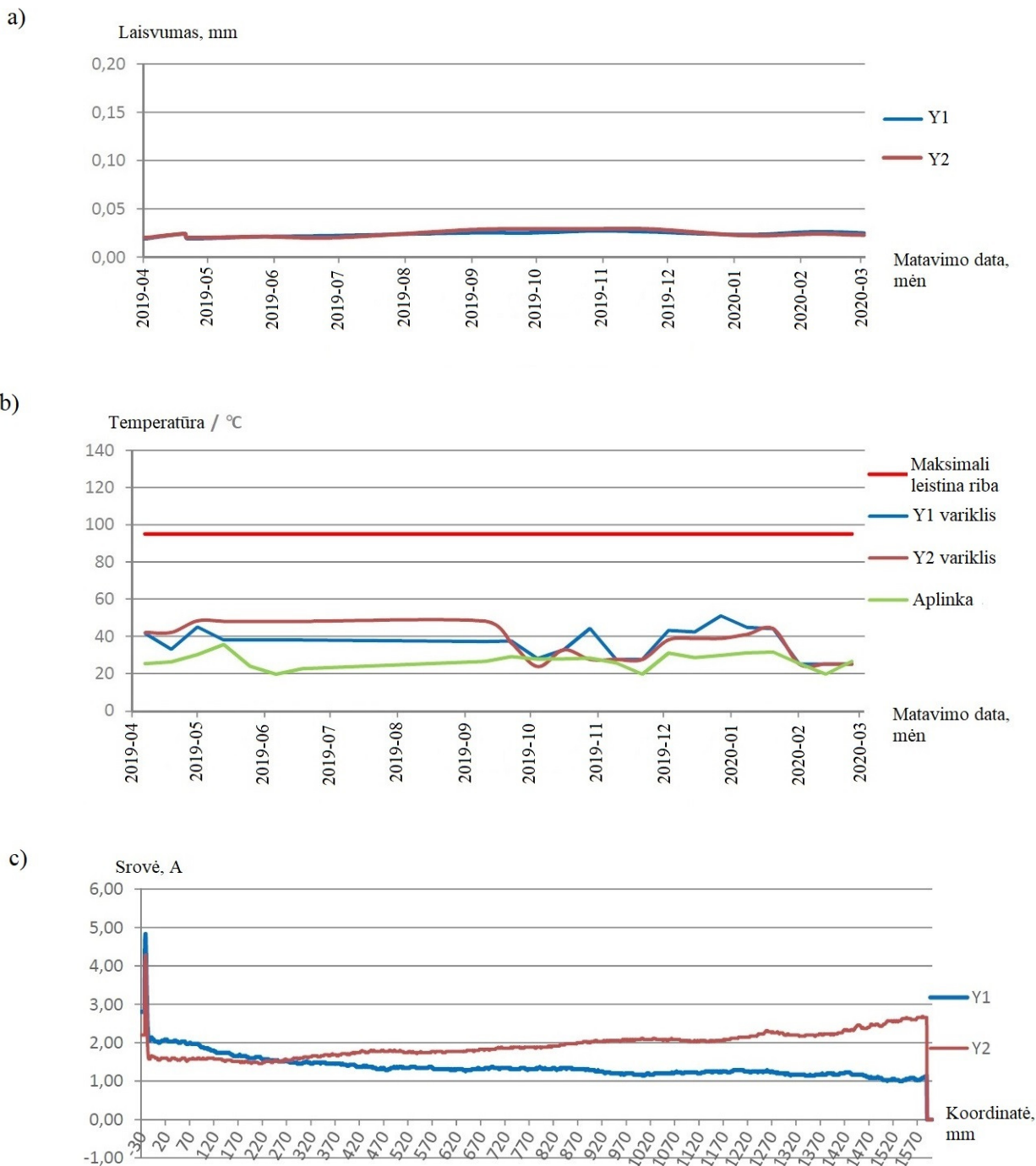
16 pav. LKP-7100 tikslumo bandymo matavimo protokolo fragmentas [23]

Šis bandymas geriausiai atspindi kokio tikslumo detales galima pagaminti, naudojant konkrečias *PRIMA POWER* koordinatinio štapavimo stakles, kadangi matavimo rezultatuose atsispindi bendra staklių paklaida. Į bendrą paklaidą įeina – servo ašių pozicionavimo nuokrypiai, mechaninės perdavimo grandies laisvumai, apdirbamo lakšto „bangavimas“, lakšto laikiklių laisvumas, štapavimo įrankio ir jo kreipiančiosios konstrukcijos netikslumai / laisvumai ir t. t. Šis testas atliekamas kiekvienoms naujai pagamintoms *PRIMA POWER* koordinatinio štapavimo staklėms, tačiau naudojamoms staklėms atliekamas itin retai dėl kainos, kuri gali svyruoti iki 1000 Eur, bei atlikimo trukmės (bandymo detalę reikia pagaminti ir t. t.). Naudojamoms staklėms šis bandymas atliekamas tik esant neeilinei situacijai (pvz. norint patvirtinti įtarimus dėl gręšiančio brangaus remonto). Be to vienas iš pagrindinių šio testo trūkumų yra tai, kad matavimai reprezentuoja staklių tikslumą tik 1000×1000 mm zonoje (bendra staklių darbinė zona gali būti iki 4000×1500 mm).

2.2.3. Mechaninės grandies laisvumo matavimai pagal servo variklio duomenis

Šiais laikais, integruotomis skaitmeninėmis technologijomis duomenys apie staklių darbo ypatumus surenkami ir analizuojami realiu laiku [24], o itin didelis dėmesys skiriamas skaitmeniniams staklių patikimumo analizavimo ir gerinimo sprendimams [25].

PRIMA POWER savo klientams siūlo nuotolinio staklių būklės stebėjimo paslaugą, kurios sudedamoji dalis yra servo ašių mechaninio laisvumo analizė. Nuotolinio staklių būklės stebėjimo periodinėse ataskaitose pateikiamas tiek tiesiaiegių (žr. 17 pav.), tiek rotacinių (sukamųjų) ašių mechaninio laisvumo tendencijos grafikas (a), vidutinės servo variklių bei aplinkos temperatūrų grafikas (b) bei servo variklio tekančios srovės grafikas pagal poziciją (c).



17 pav. Tiesiaiegiės ašies laisvumo, temperatūros bei variklio srovės grafiko pavyzdys [17]

Varikliu tekančios srovės matavimai, siekiant nustatyti veleno guolių būklę ar variklio susidėvėjimą, analizuojami tiek mokslinėje literatūroje [26], [27], tiek praktikoje. *PRIMA POWER* staklių servo varikliu tekančios srovės pokyčiai analizuojami servo ašies mechaniniam laisvumui nustatyti. Tai naujas požiūris į servo variklio duomenų panaudojimą, siekiant įvertinti staklių komponentų būklę.

Servo ašių duomenų surinkimo programoje servo ašies mechaninis laisvumas apskaičiuojamas pagal servo variklio judesio metu tekančią srovę, kai realus servo ašies judesys apribotas papildomomis mechaninėmis priemonėmis (naudojant lakšto repositionavimo cilindrus (X ir Y ašims) arba šlampavimo įrankiu prispaudžiant lakštą). Tokiems matavimams būtinas 1 mm storio plieno lakštas, kurio matmenys turi būti ne mažesni nei $3\ 000 \times 1\ 000$ mm. Tokie jo matmenys užtikrina, kad repositionavimo cilindrai (arba šlampavimo įrankis) patikimai laikys lakštą vietoje, kol bus matuojamas servo ašių laisvumas.

Šis servo ašių laisvumo (angl. *Clearance*) matavimo būdas sukurtas pagal daugelį metų profilaktinės priežiūros metu aptarnavimo inžinierių naudojamą procedūrą, kurios metu laikrodiniu indikatoriumi išmatuojamas servo ašies laisvumas rankomis stumiant mechaninę servo ašies grandį „+“ ir „-“ kryptimis, kuomet servo ašies varikliai priešinasi judesiui (bando atstatyti esamą poziciją).

Bandymų metu išmatuota, kad vidutinė jėga, kuria aptarnavimo inžinierius veikia servo ašį, yra apie 300 N. Šios jėgos ekvivalentas servo variklio srove apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\frac{F}{g} = M_n \cdot I \cdot i \cdot 2 \cdot \pi / P; \quad (2)$$

čia F – postūmio jėga, N;

g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2 ;

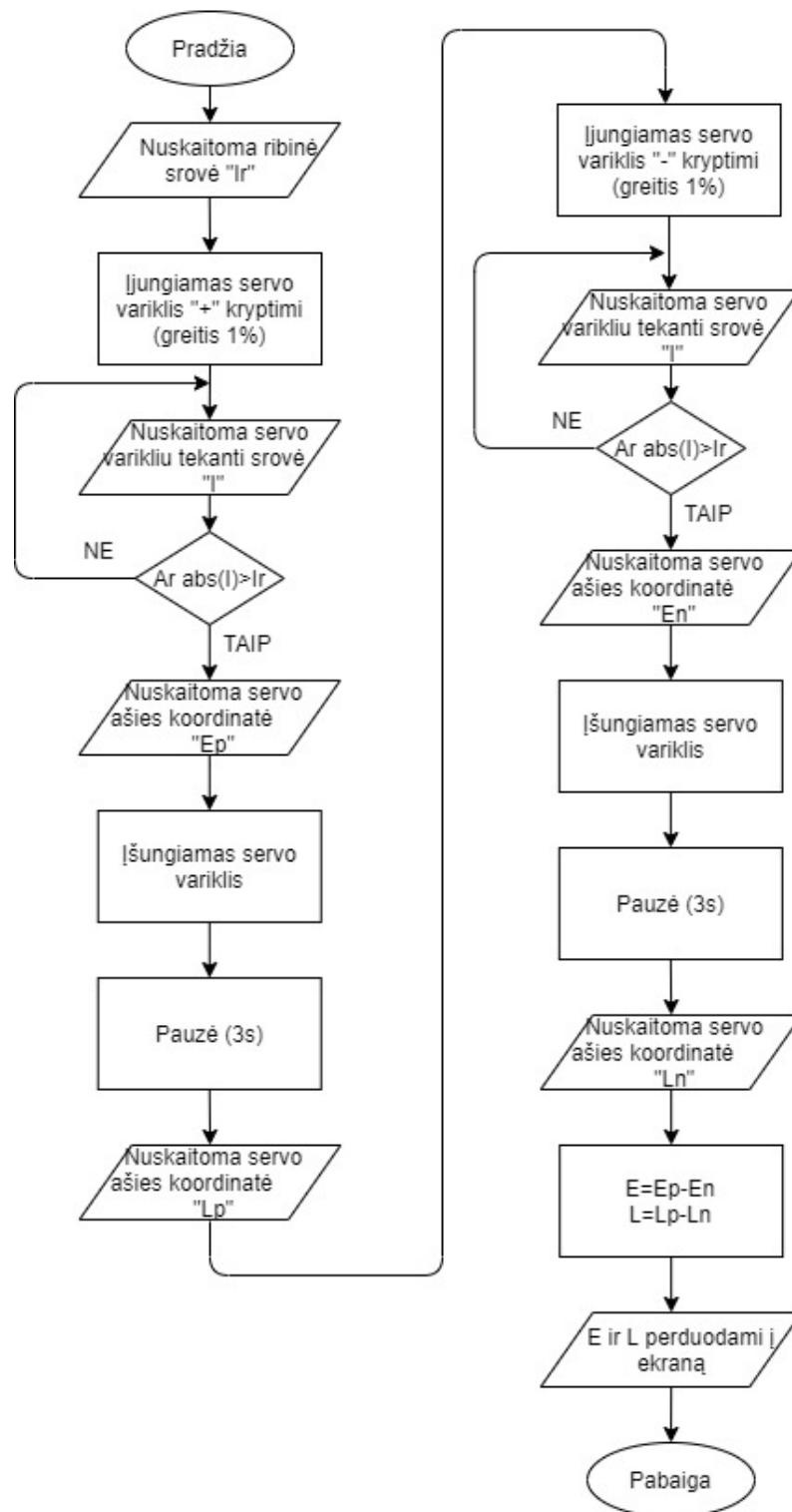
I – variklio srovė, A;

i – perdavimo koeficientas;

P – sraigto žingsnis, mm/aps.;

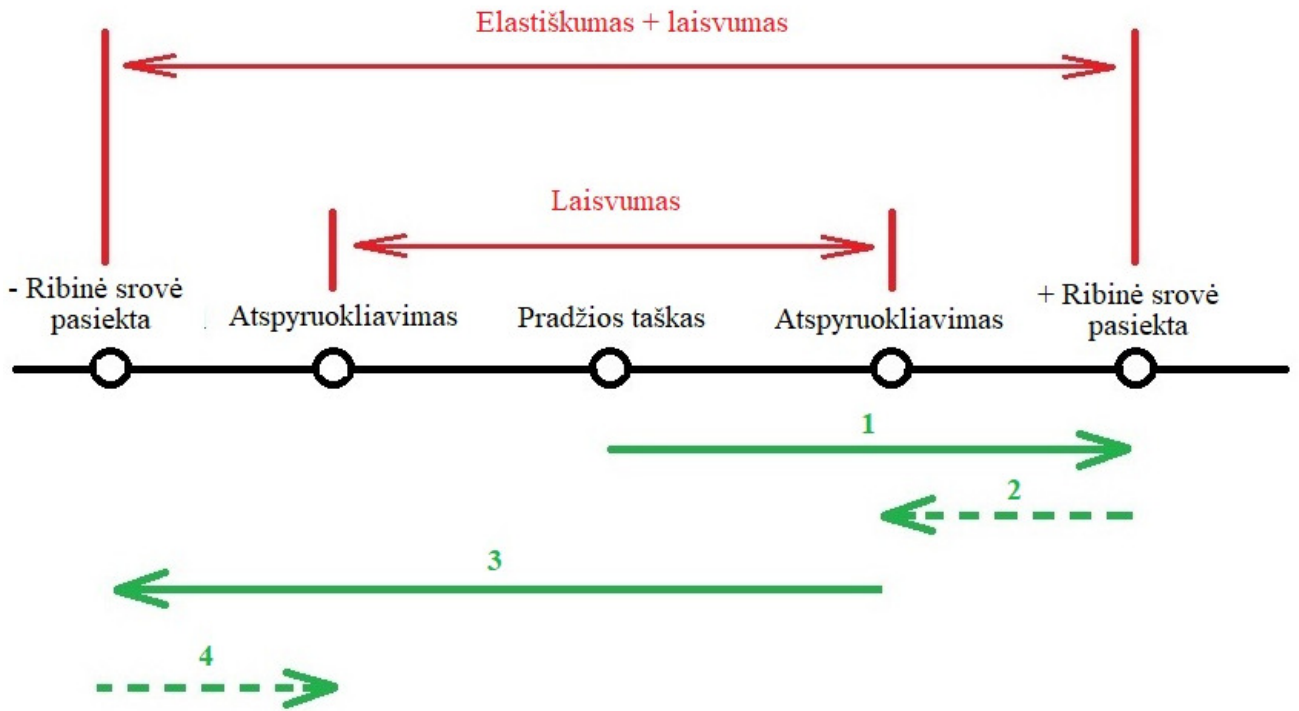
Kiekvienai servo ašiai apskaičiuojama ribinė srovė (angl. *Threshold current*), kuri naudojama matuojant servo ašies laisvumą ir elastiškumą.

Matavimas pradedamas užfiksuojant lakštą (naudojant repositionavimo cilindrus), toliau servo variklis atlieka judesį „+“ kryptimi. Judesio metu nuolat matuojama variklio tekanti srovė. Kai srovė pasiekia užduotą ribinę reikšmę, variklio judesys stabdomas ir įsimenama servo ašies pozicija (koordinatė) – ši reikšmė vėliau naudojama apskaičiuojant servo ašies elastiškumą (angl. *Elasticity*). Toliau servo variklis išjungiamas – tai leidžia servo ašies mechaninei grandžiai sustoti pozicijoje, kurioje mažiausi įtempimai. Ši servo ašies pozicija (koordinatė) įsimenama, kad vėliau būtų galima apskaičiuoti servo ašies laisvumą (angl. *Clearance*). Tokie patys servo ašies judesiai atkartojami „-“ kryptimi, įsimenant maksimalias elastiškumo ir atspyrkliavimo koordinates. Pagal įsimintas koordinates apskaičiuojamas servo ašies laisvumas ir elastiškumas. 18 paveiksle pavaizduotas servo ašies laisvumo ir elastiškumo matavimo algoritmas.



18 pav. Servo ašies laisvumo ir elastiškumo matavimo algoritmas

19 paveiksle pavaizduota servo ašies laisvumo ir elastiškumo matavimo schema, kurioje žaliomis rodyklėmis pažymėtas servo ašies judėjimas (brūkšninė žalia linija rodo judesį esant išjungtam servo ašies varikliui – atspyruiokliavimą), juodoje koordinatinių ašyje pažymėta servo ašies pozicija, raudonos linijos žymi išmatuotas laisvumo ir elastiškumo reikšmes, žali skaičiai (1–4) susieja servo variklio judesius su servo varikliu tekančios srovės grafiko (pateikto 29 paveiksle) atkarpomis.



19 pav. Servo ašies laisvumo ir elastiškumo matavimo schema

Praktinėje projekto dalyje bus lyginami matavimų rezultatai naudojant skirtingas ribines sroves. Gauti rezultatai lyginami su rezultatais, gautais naudojant kitus matavimo metodus, siekiant išsiaiškinti ar mechaninės grandies laisvumo matavimai pagal servo variklio srovę gali bent iš dalies atstoti LKP-7100 ir VDI/DGQ 3441 standartinius matavimus staklių aptarnavimo ir diagnostikos reikmėms.

Servo ašių laisvumo matavimas pagal servo variklio duomenis, pakoregavus matavimo eigos algoritmą, gali būti naudojamas ir pasukamų servo ašių laisvumui nustatyti. *PRIMA POWER* koordinatinio štapavimo staklėse iš pasukamų servo ašių didžiausias tikslumas reikalingas viršutinio ir apatinio štapavimo įrankio pasukimo ašims (*Z1* ir *Z2*).

Z1 ir *Z2* servo ašių laisvumo matavimams, pirmiausia, reikalingas kitoks sprendimas mechaniškai ribojantis servo ašių judesį, todėl lakšto fiksavimas repositionavimo cilindrais pakeičiamas didžiausio, įrankių būgne esančio, pasukamo įrankio prispaudimu prie lakšto. 20 paveiksle pateiktas įrankių būgno pavyzdys (staklių valdymo sąsajos langas), o 5 lentelėje pateikti įrankių dydžių („Amada thick turret“ tipo) ir maksimalių kertamų kiaurymių matmenys.

Pasirinktą įrankį atsukus į darbinę poziciją – šiuo įrankiu pasirinkta jėga prispaudžiamas plieno lakštas esantis tarp puansono ir matricos. Prispaudimui būtų naudojama RAM servo ašis (žr. 1 lentelę), kuriai 1 % greičio spaudžiant darbinėje padėtyje esantį štapavimo įrankį nuolat stebima servo varikliu tekanči srovė. Pasiekus norimą prispaudimo jėgą (užduotą servo varikliu tekančios srovės reikšmę) servo variklis stabdomas ir likusio matavimo ciklo metu palaiko esamą poziciją.

Toliau matavimo ciklas labai panašus į tiesiaeigių servo pavarų laisvumo matavimo ciklą.

Viršutinio įrankio pasukimo ašies *Z1* servo variklis 1 % greičio juda pagal laikrodžio rodyklę (apatinio įrankio pasukimo servo ašis *Z2* tuo metu nejudinama) nuolat matuojant *Z1* servo varikliu tekančią srovę, srovei pasiekus nustatytą ribinę srovę, variklis stabdomas, ir įsiminama koordinatė

5 lentelė. „Amada thick turret“ tipo įrankių dydžių palyginimas

Įrankio laikiklio dydžio žymėjimas	Maksimalus kertamos apvalios kiaurymės diametras, mm
A	12,7
B	31,7
C	50,8
D	88,9
MT24-8	8
MT10-16	16

Šis ciklas pakartojamas ir apatinio įrankio pasukimo servo ašiai – taip gaunamos atskiros viršutinio ir apatinio įrankių pasukimo laisvumo bei elastiškumo reikšmės.

2.2.4. Koordinatinio štapavimo staklių tikslumo (paklaidos) matavimo metodų privalumai ir trūkumai

Visi tiriami servo ašių tikslumo (paklaidos) matavimo būdai turi privalumų ir trūkumų, todėl skirtingomis aplinkybėmis naudojami skirtingi matavimo būdai. Be to kiekvienas paklaidos matavimo būdas parodo skirtingų staklių komponentų suminę paklaidą, dėl to šių tikslumo matavimų rezultatai turi būti interpretuojami skirtingai. 5 lentelėje pateikti 3-jų koordinatinio štapavimo staklių tikslumo (paklaidos) matavimo metodų privalumai ir trūkumai.

6 lentelė. Koordinatinių štapavimo staklių tikslumo (paklaidos) matavimo metodų palyginimas

Matavimo būdas	Privalumai	Trūkumai
Matavimai atliekami pagal VDI/DGQ 3441 standartą	– matavimų paklaida nesiekia 1 μm ; – išmatuojama kiekvienos tiesiaieigės servo ašies paklaida atskirai.	– brangi matavimo įranga; – sudėtinga matavimus atlikti staklių naudotojo patalpose.
Matavimai atliekami pagal LKP-7100 standartą	– atspindi gaminamų detalių tikslumą; – užtrunka iki 30 minučių staklių prastovos laiko.	– matavimams reikalingos žaliavos; – ilgas matavimo rezultatų laukimas (nuo bandomosios detalės pagaminimo iki matavimo rezultatų gavimo); – visos staklių mechaninių mazgų paklaidos sumuojamos, todėl sunku tiksliai diagnozuoti paklaidos priežastį.
Matavimai atliekami naudojant servo variklio duomenis	– matavimams nesunaudojamos žaliavos; – matavimo rezultatai pateikiami nedelsiant.	– abejotinas matavimo rezultatų patikimumas.

3. Tiriamoji dalis

3.1. Servo varikliu tekančios srovės stebėjimas

Siekiant išsiaiškinti servo varikliu tekančios srovės kitimo priklausomybę nuo greičio ir akseleracijos, atlikti bandymai, kuriuose staklės (*Shear Genius 1530*) programiniu režimu judino servo ašis *X* ir *Y* skirtingomis trajektorijomis, greičiais bei akseleracijomis. Matavimo rezultatams fiksuoti naudotas programinis paketas *Microsoft Visual Studio* su specialiu *Beckhoff* sukurtu įskiepiu „ScopeView“, skirtu įvairiems sistemos parametrams stebėti ir grafiškai pavaizduoti.

Pirmasis bandymas atliekamas servo ašimis *X* ir *Y* judant 200×200 mm dydžio kvadrato trajektorija. Šiam tikslui sukurtas staklių valdymo programinis kodas pusiau automatiname (*MDA*) režime. 21 paveiksle pavaizduotas programinis kodas, skirtas *X* ir *Y* servo ašims judėti kvadrato trajektorija *TULUS* vartotojo sąsajoje.

1	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
2	MOVE_LINEAR	X=700 Y=500 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
3	MOVE_LINEAR	X=700 Y=700 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
4	MOVE_LINEAR	X=500 Y=700 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
5	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
6	MOVE_LINEAR	X=700 Y=500 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
7	MOVE_LINEAR	X=700 Y=700 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
8	MOVE_LINEAR	X=500 Y=700 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
9	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
10	MOVE_LINEAR	X=700 Y=500 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
11	MOVE_LINEAR	X=700 Y=700 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
12	MOVE_LINEAR	X=500 Y=700 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
13	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
14	MOVE_LINEAR	X=700 Y=500 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
15	MOVE_LINEAR	X=700 Y=700 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
16	MOVE_LINEAR	X=500 Y=700 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
17	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
18	END_OF_PROGRAM	

21 pav. *TULUS* programos MDA langas su kvadrato formos judesio trajektorijos programos kodu

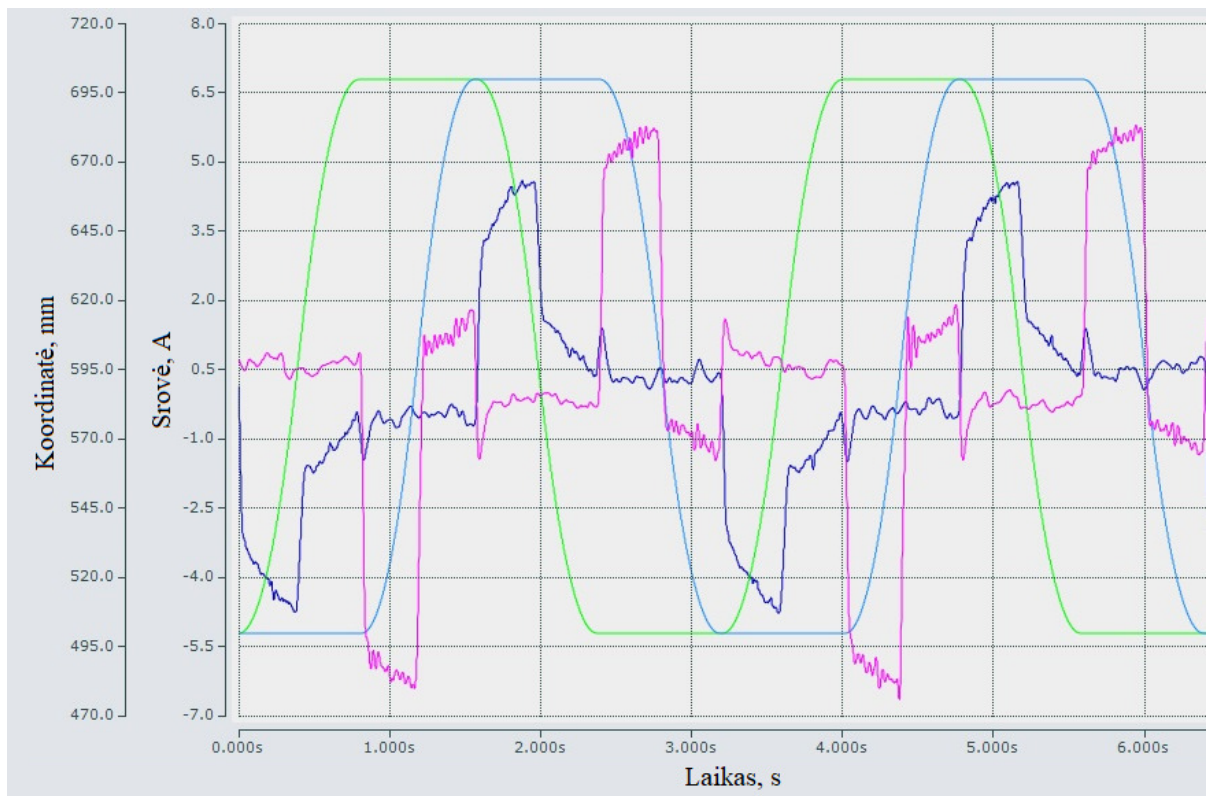
Bandymo metu „ScopeView“ lange (žr. 22 pav.) fiksuojama *X* ašies pozicija / koordinatė (žalia kreivė), *X* ašies servo varikliu tekanti srovė (tamsiai mėlyna kreivė), *Y* ašies pozicija / koordinatė (šviesiai mėlyna kreivė), *Y* ašies servo varikliu tekanti srovė (alyvinė kreivė).

Iš grafiko (žr. 22 pav.) matyti, kad *X* bei *Y* ašys juda koordinatėmis tarp 500 mm ir 700 mm, o servo varikliais tekanti srovė siekia ± 5 A (*X* ašyje) bei ± 6 A (*Y* ašyje).

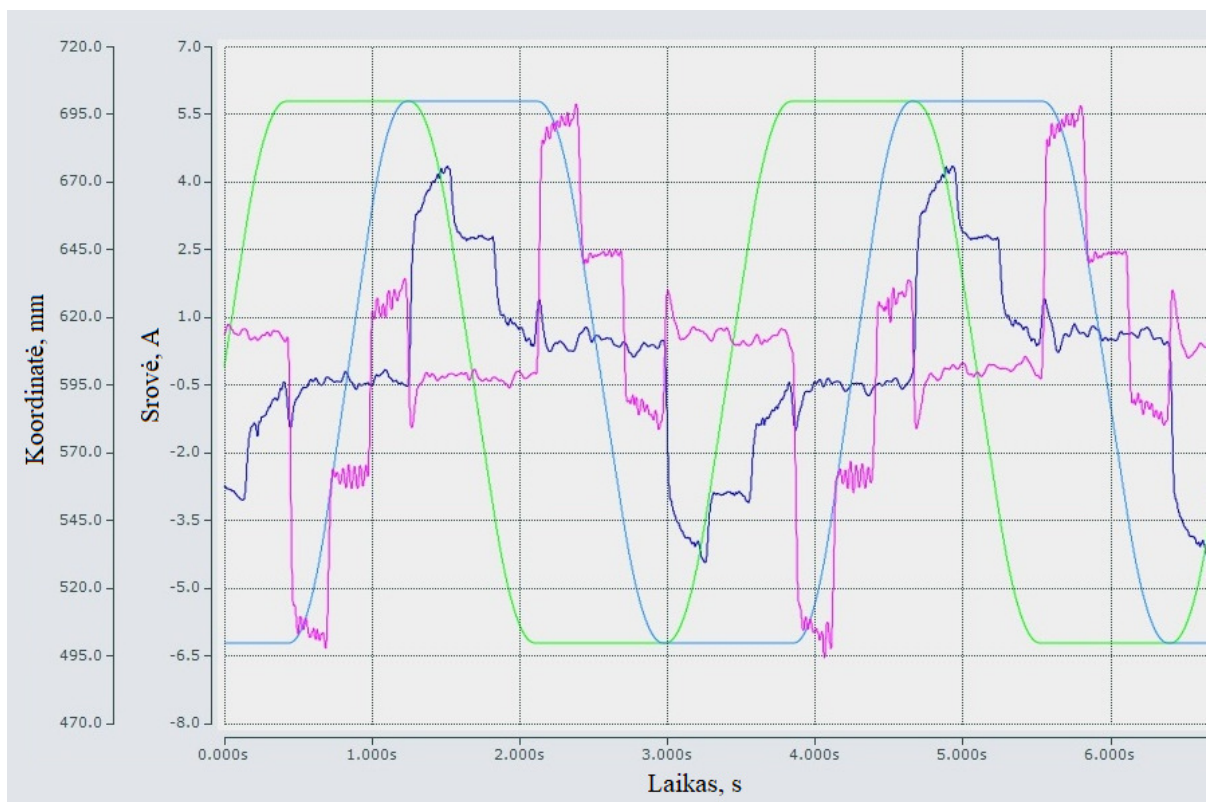
Apribojus servo ašių judėjimo greitį (angl. *Feedrate*) iki 50 % ir atlikus tą patį bandymą „ScopeView“ lange gautas grafikas pateiktas 23 paveiksle.

Iš grafiko (žr. 23 pav.) matyti, kad nepaisant maksimalaus servo ašių judėjimo greičio ribojimo iki 50 %, maksimalios servo varikliais tekančios srovės pokytis nėra pastebimas (*X* ašis ± 5 A, *Y* ašis ± 6 A).

Šie bandymai parodo, kad servo ašies varikliu teka didžiausia srovė greitėjimo bei stabdymo metu, o tolygaus judėjimo atveju servo varikliu tekančios srovės priklausomybė nuo greičio nėra pastebima.



22 pav. X ir Y servo ašių koordinatų (žalia ir šviesiai mėlyna kreivės) ir X ir Y ašių servo varikliais tekančių srovių (tamsiai mėlyna ir alyvinė kreivės) grafikai, judant 200×200 mm kvadrato formos trajektorija 100 % greičiu bei 100 % akceleracija



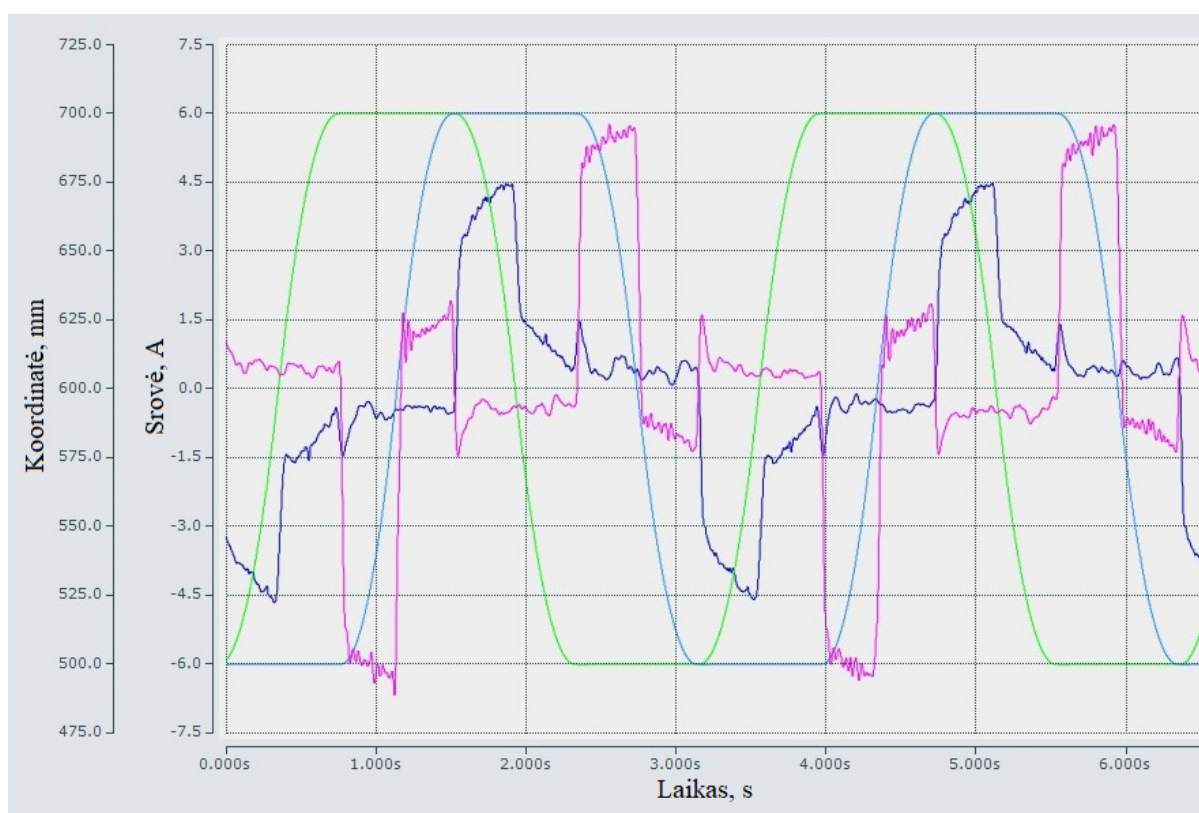
23 pav. X ir Y servo ašių koordinatų (žalia ir šviesiai mėlyna kreivės) ir X ir Y ašių servo varikliais tekančių srovių (tamsiai mėlyna ir alyvinė kreivės) grafikai, judant 200×200 mm kvadrato formos trajektorija 50 % greičiu bei 100 % akceleracija

Kitas bandymas atliekamas apribojus servo ašų akseleraciją iki 50 %. Akseleracijos parametro reikšmė gali būti keičiama tik programiniame kode, todėl šiam bandymui *TULUS* aplinkoje sukuriama kita MDA programa, kuri pavaizduota 24 paveiksle.

Bandymo (naudojant 50 % akseleracijos ir 100 % greičio) metu užfiksuoti duomenys pateikti 25 paveiksle.

1	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
2	MOVE_LINEAR	X=700 Y=500 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
3	MOVE_LINEAR	X=700 Y=700 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
4	MOVE_LINEAR	X=500 Y=700 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
5	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
6	MOVE_LINEAR	X=700 Y=500 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
7	MOVE_LINEAR	X=700 Y=700 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
8	MOVE_LINEAR	X=500 Y=700 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
9	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
10	MOVE_LINEAR	X=700 Y=500 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
11	MOVE_LINEAR	X=700 Y=700 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
12	MOVE_LINEAR	X=500 Y=700 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
13	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
14	MOVE_LINEAR	X=700 Y=500 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
15	MOVE_LINEAR	X=700 Y=700 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
16	MOVE_LINEAR	X=500 Y=700 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
17	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=50 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
18	END_OF_PROGRAM	

24 pav. *TULUS* programos MDA langas su kvadrato formos judesio trajektorijos programos kodu naudojant 50 % akseleracijos



25 pav. *X* ir *Y* servo ašų koordinatė (žalia ir šviesiai mėlyna kreivės) ir *X* ir *Y* ašų servo varikliais tekančių srovių (tamsiai mėlyna ir alyvinė kreivės) grafikai, judant 200 × 200 mm kvadrato formos trajektorija 100 % greičiu bei 50 % akseleracija

Iš grafiko (žr. 25 pav.) matyti, kad X bei Y servo ašių varikliais tekanti srovė siekia $\pm 4,5$ A (X ašyje) ir ± 6 A (Y ašyje). Servo varikliu tekančios srovės skirtumas pastebimas tik X ašyje, ir nepaisant to, kad akseleracija buvo sumažinta 50 %, varikliu tekanti srovė tesumažėjo 10 %.

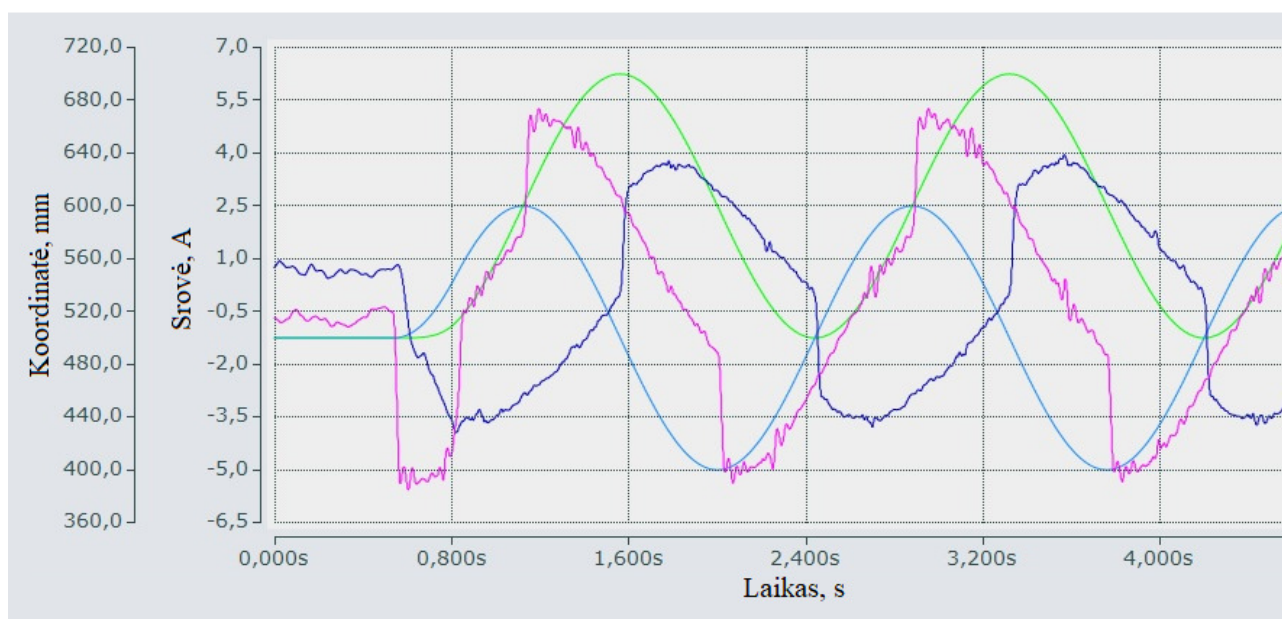
Kitas bandymas atliekamas servo ašimis X ir Y judant 100 mm spindulio apskritimo trajektorija. Šiam tikslui sukuriama staklių valdymo programinis kodas pusiau automatiname (MDA) režime. 26 paveiksle pavaizduotas programinis kodas X ir Y servo ašių judėjimui apskritimo trajektorija *TULUS* vartotojo sąsajoje.

Paleidus vykdyti programą, „ScopeView“ lange (žr. 27 pav.) fiksuojama X ašies pozicija / koordinatė (žalia kreivė), X ašies servo varikliu tekanti srovė (tamsiai mėlyna kreivė), Y ašies pozicija / koordinatė (šviesiai mėlyna kreivė), Y ašies servo varikliu tekanti srovė (alyvinė kreivė).

Iš grafiko (žr. 27 pav.) matyti, kad X ašis juda koordinatėmis nuo 500 mm iki 700 mm, o Y ašis juda koordinatėmis nuo 400 mm ir 600 mm. Servo varikliais tekanti srovė siekia $\pm 3,7$ A (X ašyje) ir $\pm 5,2$ A (Y ašyje).

1	MOVE_LINEAR	X=500 Y=500 C=0 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
2	MOVE_CIRCULAR	FlowID=0 X=500 Y=500 I=100 J=0 Direction=2 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
3	MOVE_CIRCULAR	FlowID=0 X=500 Y=500 I=100 J=0 Direction=2 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
4	MOVE_CIRCULAR	FlowID=0 X=500 Y=500 I=100 J=0 Direction=2 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
5	MOVE_CIRCULAR	FlowID=0 X=500 Y=500 I=100 J=0 Direction=2 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
6	MOVE_CIRCULAR	FlowID=0 X=500 Y=500 I=100 J=0 Direction=2 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
7	MOVE_CIRCULAR	FlowID=0 X=500 Y=500 I=100 J=0 Direction=2 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
8	MOVE_CIRCULAR	FlowID=0 X=500 Y=500 I=100 J=0 Direction=2 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
9	MOVE_CIRCULAR	FlowID=0 X=500 Y=500 I=100 J=0 Direction=2 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
10	MOVE_CIRCULAR	FlowID=0 X=500 Y=500 I=100 J=0 Direction=2 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
11	MOVE_CIRCULAR	FlowID=0 X=500 Y=500 I=100 J=0 Direction=2 Acc=100 Jerk=100 Feed=500000 ContourStart=0 LeadGeometry=0
12	END_OF_PROGRAM	

26 pav. *TULUS* programos MDA langas su apskritimo formos judesio trajektorijos programos kodu



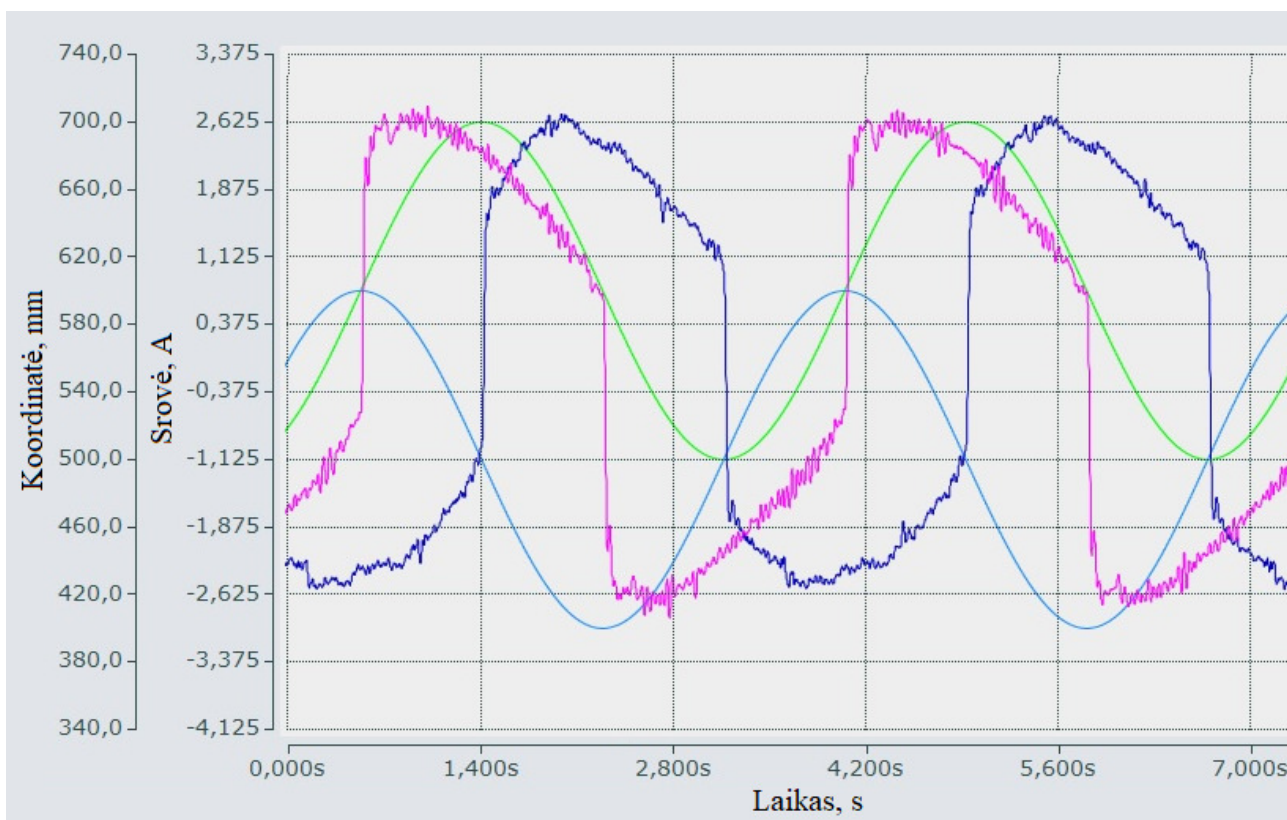
27 pav. X ir Y servo ašių koordinatinių (žalia ir šviesiai mėlyna kreivės) ir X ir Y ašių servo varikliais tekančių srovių (tamsiai mėlyna ir alyvinė kreivės) grafikai, judant 100 mm spindulio apskritimo formos trajektorija 100 % greičiu bei 100 % akseleracija

Apribojus servo ašių judėjimo greitį (angl. *Feedrate*) iki 50 % ir atlikus tą patį bandymą „ScopeView“ lange gautas grafikas pateiktas 28 paveiksle.

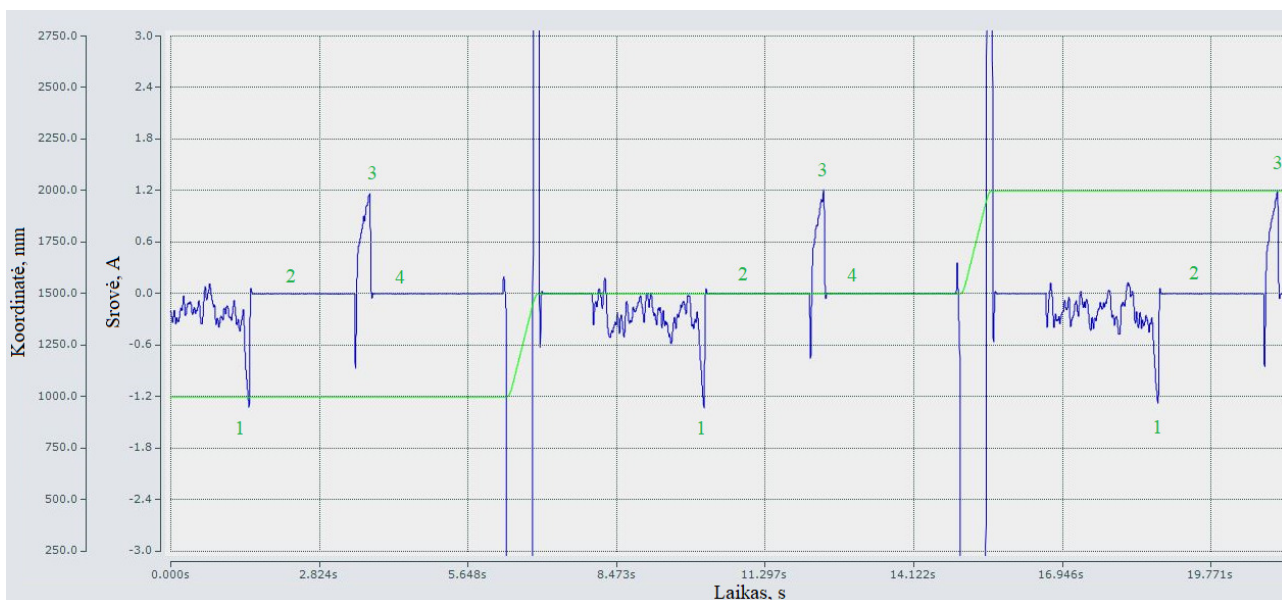
Iš grafiko (žr. 28 pav.) matyti, kad *X* bei *Y* servo ašių varikliais tekanči srovė pakito daugiau nei 30 % ir siekia $\pm 2,7$ A abiejose ašyse. Ši pokytį įtakojo servo ašių judėjimo specifiška – judant apskritimo trajektorija kiekviena servo ašis nuolat greitėja arba lėtėja, todėl apribojus maksimalų greitį pasikeičia ir akseleracija. Dėl to, servo varikliais tekančios srovės pokytis, lyginant su kvadrato formos trajektorijos judesiu, yra 3–4 didesnis (ne 10–15 %, o 30–40%).

Kito bandymo metu stebima *X* ašies servo variklio tekanči srovė, atliekant *X* ašies laisvumo matavimo ciklą (ribinė srovė 1,1 A). 29 paveiksle pateiktas „ScopeView“ lange gautas grafikas kartu su laisvumo ir elastiškumo matavimo schema (skaičiais nuo 1 iki 4 schemeje ir grafike pažymėti matavimo ciklo judesiai).

Grafike (žr. 29 pav.) matyti trys *X* ašies laisvumo ir elastiškumo matavimo ciklai, kurie atliekami *X* ašies koordinatėse 1000 mm, 1500 mm ir 2000 mm. Servo variklio tekančios srovės šablonas pasikartoja visus 3 kartus, kas leidžia identifikuoti matavimo judesius bei numatyti matavimo rezultatų pasikartojamumą.



28 pav. *X* ir *Y* servo ašių koordinatė (žalia ir šviesiai mėlyna kreivės) ir *X* ir *Y* ašių servo varikliais tekančių srovių (tamsiai mėlyna ir alyvinė kreivės) grafikai, judant 100 mm spindulio apskritimo formos trajektorija 50 % greičiu bei 100 % akseleracija



29 pav. Grafikas atvaizduojantis X ašies poziciją (žalia kreivė) ir X ašies servo variklio tekančią srovę (tamsiai mėlyna kreivė), matuojant X ašies laisvumą ir elastiškumą

Skaičiai nuo 1 iki 4 (žr. 29 pav.) rodo servo variklio tekančios srovės sąsają su laisvumo ir elastiškumo matavimo ciklo judesiais pavaizduotais 19 paveiksle.

3.2. Laisvumo matavimo rezultatų pasikartojamumas

Naudojant rekomenduojamas ribines sroves (1,1 A X servo ašies varikliui ir 0,85 A Y servo ašies varikliui) atlikti 10 laisvumo ir elastiškumo matavimo ciklų X ašies koordinatėse 500 mm, 1000 mm, 1500 mm, 2000 mm, 2500 mm bei Y ašies koordinatėje 200 mm. Matavimų rezultatai pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. 10-ties X ir Y servo ašių laisvumo matavimų rezultatai

Koordinatė, mm	Išmatuotas laisvumas (X ašis, ribinė srovė 1,1 A), mm									
	500	0,014	0,011	0,014	0,014	0,011	0,013	0,014	0,013	0,014
1000	0,02	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,019	0,018	0,018
1500	0,016	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,017	0,016
2000	0,017	0,017	0,017	0,016	0,016	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016
2500	0,018	0,018	0,018	0,018	0,017	0,017	0,018	0,017	0,017	0,018
	Išmatuotas laisvumas (Y ašis, ribinė srovė 0,85 A), mm									
200	0,005	0,005	0,006	0,006	0,004	0,006	0,004	0,004	0,006	0,005

Gauti duomenys ištiriami naudojantis statistiniais tyrimo metodais. Apskaičiuojama kiekvienos rezultatų grupės (pagal koordinatę) aritmetinis vidurkis, moda, mediana, dispersija bei standartinis nuokrypis. Gauti skaičiavimų rezultatai pateikiami 8 lentelėje.

Statistiniai tyrimo metodai parodo, kad standartinis nuokrypis nesiekia 10 % aritmetinio vidurkio ir daugeliu atveju (išskyrus X ašies 500 mm koordinatę) standartinis nuokrypis yra mažesnis už

minimalų staklių fiksuojamą matavimo vienetą (1 μm). Šis tyrimas iliustruoja aukštą bandymų pasikartojamumo lygį.

8 lentelė. 10-ties X ir Y servo ašių laisvumo matavimų rezultatų statistinis tyrimas

Koordinatė, mm	X ašis				
	Aritmetinis vidurkis	Moda	Mediana	Dispersija	Standartinis nuokrypis
500	0,0131	0,014	0,014	0,00000143	0,001197
1000	0,0183	0,018	0,018	0,00000046	0,000675
1500	0,0162	0,016	0,016	0,00000018	0,000422
2000	0,0164	0,016	0,016	0,00000027	0,000516
2500	0,0176	0,018	0,018	0,00000027	0,000516
	Y ašis				
200	0,0051	0,006	0,005	0,0000008	0,000876

Pasukamų servo ašių $Z1$ ir $Z2$ laisvumo matavimų rezultatų (naudojant rekomenduojamą 2 A ribinę srovę) statistinio tyrimo duomenys pateikti 9 lentelėje.

9 lentelė. 10-ties X ir Y servo ašių laisvumo matavimų rezultatų statistinis tyrimas

Koordinatė,	$Z1$ ašis				
	Aritmetinis vidurkis	Moda	Mediana	Dispersija	Standartinis nuokrypis
90°	0,0762	-	0,0735	0,005657	0,02379
	$Z2$ ašis				
90°	0,1362	0,1355	0,137	0,001978	0,04448

Servo ašių $Z1$ ir $Z2$ statistinis tyrimas rodo, kad standartinis nuokrypis siekia 30–35 % aritmetinio vidurkio. Šis parametras rodo žemą pasukamų ašių laisvumo matavimų pasikartojamumo lygį, o tuo pačiu ir atskleidžia šio matavimo patikimumo problemą.

3.3. Laisvumo matavimų rezultatai naudojant skirtingas ribines sroves

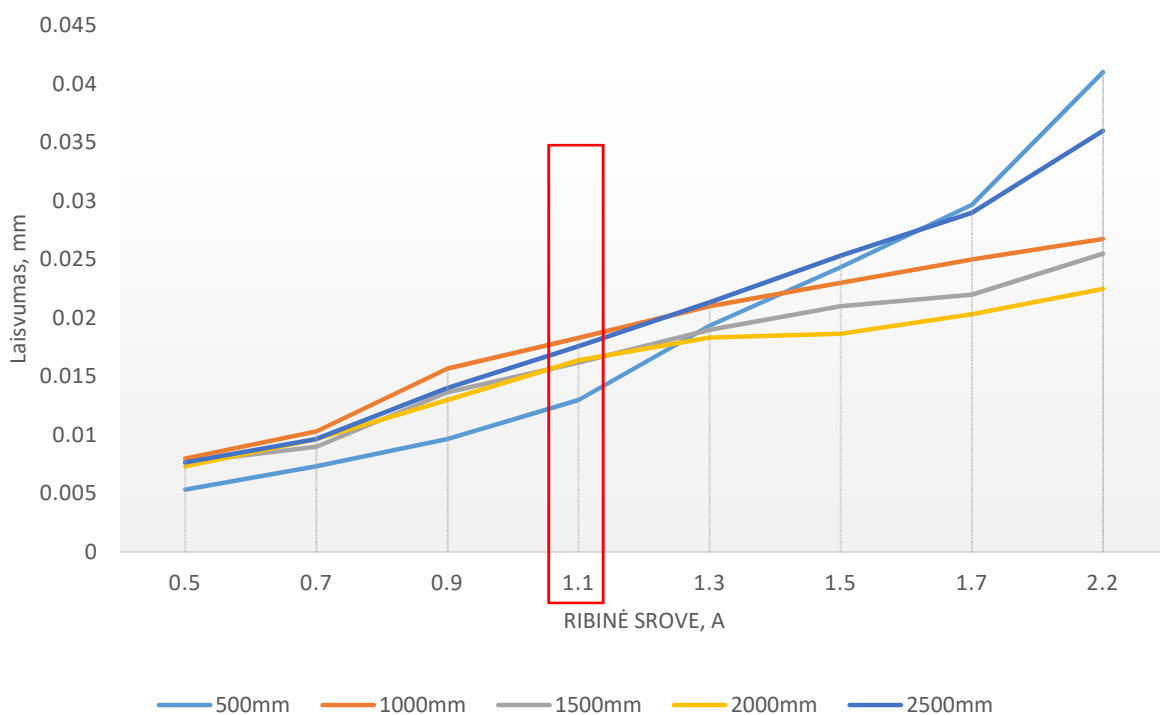
Skirtingo senumo (ir susidėvėjimo) staklėse mechaninis servo ašių pasipriešinimas ir servo varikliu tekančios srovės dydis gali skirtis. Siekiant įvertinti mechaninio pasipriešinimo įtaką servo ašių laisvumo matavimų rezultatams eksperimentai buvo atlikti, pasirenkant skirtingas ribines sroves (nuo 50 % iki 200 % rekomenduojamos ribinės srovės vertės). Siekiant minimizuoti atsitiktinės matavimo paklaidos įtaką bandymų rezultatams, su kiekviena pasirinkta ribine srove atlikti po 3 bandymus. 10, 11 bei 12 lentelėse ir grafikuose (30, 31 ir 32 paveikslai) naudojamas šių bandymų rezultatų aritmetinis vidurkis.

10 lentelėje pateikti X servo ašies laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis rezultatų aritmetiniai vidurkiai, naudojant skirtingas ribines sroves. Iš lentelės duomenų matyti, kad matavime naudojamos ribinės srovės dydis turi įtakos ir matavimų rezultatus (naudojant didesnę ribinę srovę – matavimo rezultatas gaunamas didesnis).

10 lentelė. X servo ašies laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis rezultatai, naudojant skirtingas ribines sroves

mm\A	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,2
500	0,005333	0,007333	0,009667	0,013	0,019333	0,024333333	0,029667	0,041
1000	0,008	0,010333	0,015667	0,0183	0,021	0,023	0,025	0,02675
1500	0,007667	0,009	0,013667	0,0162	0,019	0,021	0,022	0,0255
2000	0,007333	0,009667	0,013	0,0164	0,018333	0,018666667	0,020333	0,0225
2500	0,007667	0,009667	0,014	0,0176	0,021333	0,025333333	0,029	0,036

30 paveiksle pateiktas išmatuotų X ašies laisvumų aritmetinių vidurkių, skirtingose koordinatėse, naudojant skirtingas ribines sroves, grafikas. Nors rezultatų reikšmės kinta nuo 0,005 mm (X ašies koordinatė 500 mm, ribinė srovė 0,5 A) iki 0,04 mm (X ašies koordinatė 500 mm, ribinė srovė 2,2 A), akivaizdu, kad rekomenduojama ribinė srovė (pažymėta raudonos spalvos stačiakampiu) yra plokščiausios kreivės dalies viduryje. Tai reiškia, kad esant nežymiams (iki 20 %) mechaninio pasipriešinimo svyravimams matavimo rezultatai skiriasi ne daugiau nei 10–15 %.



30 pav. Vidutinio išmatuoto X ašies laisvumo (mm) priklausomybės nuo ribinės srovės (A), skirtingose koordinatėse, grafikas

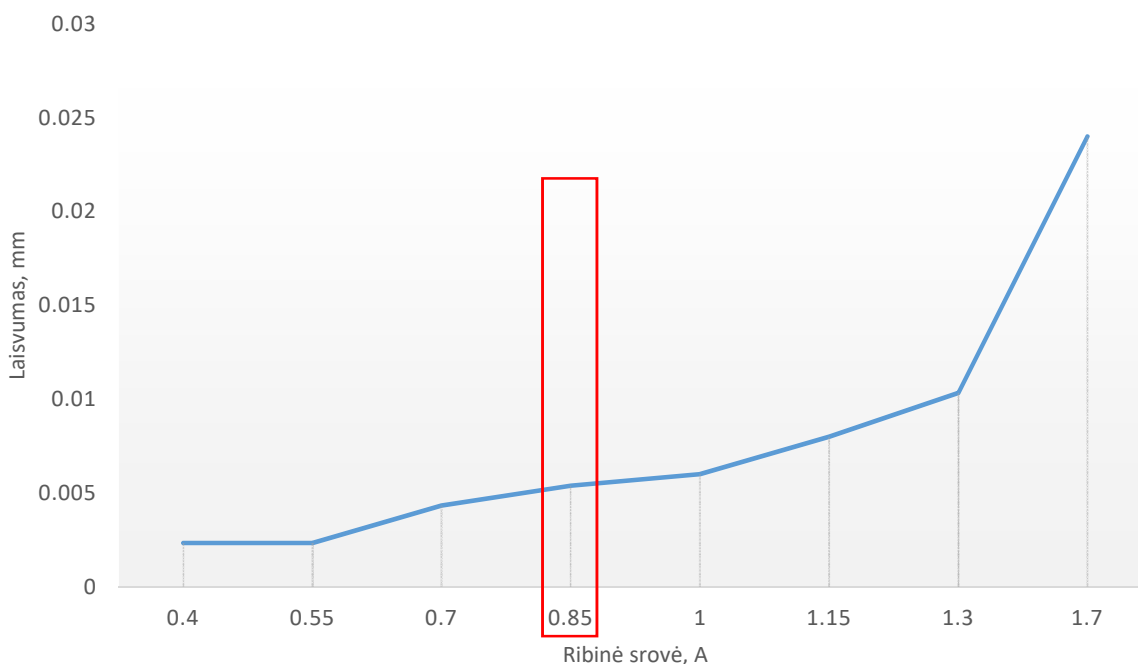
11 lentelėje pateikti Y servo ašies laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis rezultatų aritmetiniai vidurkiai, naudojant skirtingas ribines sroves. Iš lentelės duomenų matyti, kad, kaip ir X ašyje, matavime naudojamos ribinės srovės dydis turi įtakos ir matavimų rezultatams (naudojant didesnę ribinę srovę – matavimo rezultatas gaunamas didesnis).

31 paveiksle pateiktas išmatuotų vidutinių Y servo ašies laisvumų 200 mm koordinatėje, naudojant skirtingas ribines sroves, grafikas. Nors rezultatų reikšmės kinta nuo 0,003 mm (ribinė srovė 0,4 A)

iki 0,025 mm (ribinė srovė 1,7 A), rekomenduojama ribinė srovė (pažymėta raudonos spalvos stačiakampiu) yra plokščiausios kreivės dalies viduryje.

11 lentelė. Y servo ašies laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis rezultatai, naudojant skirtingas ribines sroves

mm\A	0,4	0,55	0,7	0,85	1	1,15	1,3	1,7
200	0,002333	0,002333	0,004333	0,0054	0,006	0,008	0,010333	0,024



31 pav. Vidutinio išmatuoto Y ašies laisvumo (mm) priklausomybės nuo ribinės srovės (A) grafikas koordinatėje 200 mm

Tai reiškia, kad esant nežymiams (iki 20 %) mechaninio pasipriešinimo švytavimams matavimo rezultatai skiriasi ne daugiau nei 10 %. Be to daugiau nei 100 % viršijus rekomenduojamą ribinę srovę, išmatuoto laisvumo pokytis viršija 400 %. Tai reiškia, kad matavimo metu (naudojant 200 % ribinės srovės) atsirado papildomas parametras – mechaninis praslydimas. Kadangi mechaninį praslydimą sunku identifikuoti ir išmatuoti siūloma matavimus atlikti 70–150 % rekomenduojamos ribinės srovės diapazone.

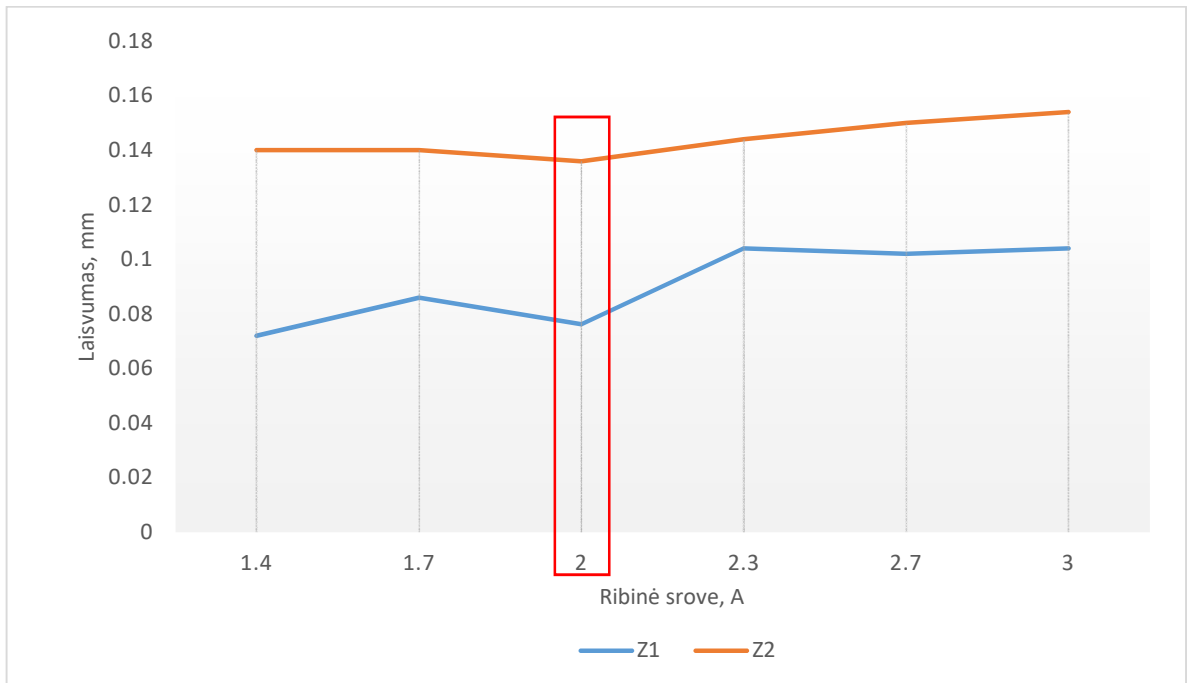
12 lentelėje pateikti Z1 ir Z2 pasukamų servo ašių laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis rezultatų aritmetiniai vidurkiai, naudojant skirtingas ribines sroves. Iš lentelės duomenų matyti, kad išmatuoto servo ašių laisvumo priklausomybė nuo naudojamos ribinės srovės nėra akivaizdi, o matavimo rezultatai kinta chaotiškai. Tai rodo, kad matavimo rezultatams didesnę įtaką daro matavimo paklaida (chaotiškas rezultatų išsibarstymas), o ne naudojamos ribinės srovės dydis.

12 lentelė. Z1 ir Z2 servo ašių laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis rezultatai, naudojant skirtingas ribines sroves

Ašis /A	1,4	1,7	2	2,3	2,7	3
Z1 90°	0,072	0,086	0,0762	0,104	0,102	0,104

Z290°	0,14	0,14	0,136	0,144	0,15	0,154
-------	------	------	-------	-------	------	-------

32 paveiksle pateiktas išmatuotų vidutinių Z1 ir Z2 servo ašių laisvumų priklausomybės nuo naudojamos ribinės srovės grafikas.



32 pav. Vidutinių išmatuotų Z1 ir Z2 servo ašių laisvumo priklausomybės nuo ribinės srovės grafikas koordinatėje 90°

Z1 ir Z2 pasukamų servo ašių laisvumo matavimų pagal servo variklių duomenis rezultatų grafikas parodo, kad naudojamos ribinės srovės (65–150 %) įtaka matavimo rezultatams yra mažesnė už matavimo rezultatų išsibarstymą, todėl dėsningumas sunkiai išvelgiamas. Tai parodo, kad pasukamų servo ašių laisvumo matavimai pagal egzistuojantį algoritmą yra netikslingi dėl per didelio matavimų rezultatų išsibarstymo bei neprognozuojamos paklaidos.

Toliau šiame darbe tiriami tik tiesiaeigių servo ašių laisvumo matavimai.

3.4. Laisvumo matavimo rezultatų palyginimas su kitomis matavimo metodikomis

Siekiant palyginti skirtingų tikslumo matavimų rezultatus, reikia įvertinti, kuriose kiekvienos servo ašies koordinatėse matavimai buvo atliekami. 13 lentelėje pateikiami trims matavimo būdais (pagal VDI/DGQ 3441 ir LKP-7100 standartus bei naudojant servo variklio duomenis) koordinatėse X ir Y atliktų laisvumo matavimų rezultatai.

13 lentelė. Laisvumo matavimų koordinatės, matavimus atliekant skirtingais matavimo būdais

Servo ašies koordinatė, mm	VDI/DGQ 3441	LKP-7100	Pagal variklio duomenis
<i>X</i> servo ašis			
0	Taip	Ne	Ne
50	Ne	Taip	Ne

100	Taip		Ne
150	Ne		Ne
200	Taip	Ne	Ne
250	Ne		Ne
300	Taip	Taip	Ne
350	Ne		Ne
400	Taip	Ne	Ne
450	Ne		Ne
500	Taip	Taip	Taip
550	Ne		Ne
600	Taip	Ne	Ne
650	Ne	Ne	Ne
700	Taip	Ne	Ne
750	Ne	Ne	Ne
800	Taip	Ne	Ne
850	Ne	Ne	Ne
900	Taip	Ne	Ne
950	Ne	Ne	Ne
1000	Taip	Ne	Taip
>1000	Atliekami kas 100 mm	Neatliekami	Atliekami kas 500 mm
Y servo ašis			
0	Taip	Ne	Ne
50	Ne	Ne	Ne
100	Taip	Ne	Ne
150	Ne	Ne	Ne
200	Taip	Ne	Taip
250	Ne		Ne
300	Taip	Taip	Ne
350	Ne		Ne
400	Taip	Ne	Ne
450	Ne		Ne
500	Taip	Taip	Ne
550	Ne		Ne
600	Taip	Ne	Ne
650	Ne		Ne
700	Taip	Taip	Ne
750	Ne		Ne
>750	Atliekami kas 100mm	Neatliekami	Neatliekami

Išanalizavus 13 lentelėje pateiktus duomenis, skirtingų matavimo būdams palyginti, pasirinkta X servo ašies laisvumo matavimų rezultatai 500 mm koordinatėje (pagal LKP-7100 standarto matavimo

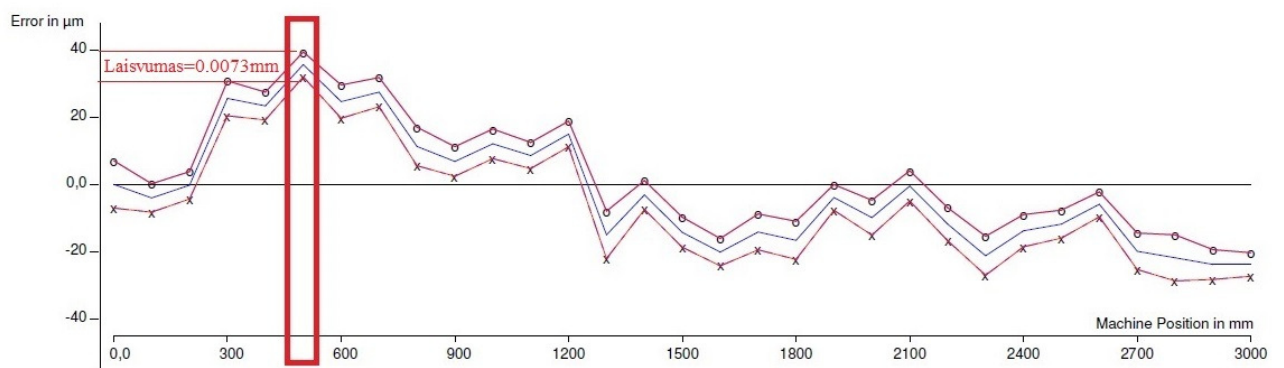
rezultatus 450–550 mm koordinatėje), kadangi šioje koordinatėje servo ašies laisvumas nustatomas visais trimis laisvumo matavimo būdais (pagal LKP-7100 standarto matavimo ataskaitą analizuojama 19 ir 20 kiaurymės pozicijos nuokrypis X ašimi).

33 paveiksle pavaizduoti X servo ašies tikslumo matavimo rezultatai 500 mm koordinatėje, taikant tris projekte aprašytus matavimo būdus.

a)

M	0.036	0.000	0.036	0.100	0.000	0.000	
HOLE NO:19 PLACE							
X	549.990	550.000	0	0	0		
Y	150.027	150.000	0	0	0		
TP	0	RFS	0.200	0	0.000		
$Laisvumas=(550-549.99)+(450.19-450)=0.029mm$							
M	0.028	0.000	0.028	0.100	0.000	0.000	
HOLE NO:20 PLACE							
X	450.019	450.000	0	0	0		
Y	150.019	150.000	0	0	0		
TP	0	RFS	0.200	0	0.000		

b)



c)

Settings		
Current filter frequency	Max. clearance motion	Current threshold
7	1	1.1
X-axis		
Position	Clearance	Elasticity
500	0.013	0.008
1000	0.020	0.018
1500	0.016	0.018
2000	0.017	0.018
2500	0.018	0.013

33 pav. X servo ašies laisvumo 500mm koordinatėje matavimų rezultatų palyginimas, naudojant skirtingus paklaidos matavimo būdus: a) pagal LKP-7100 standartą; b) pagal VDI/DGQ 3441 standartą; c) pagal servo variklio duomenis [23], [28]

Iš 33 paveiksle pateiktų duomenų matoma, kad X servo ašies laisvumas 500 mm koordinatėje yra 0,0073 mm (pagal VDI/DGQ 3441 standartą), arba 0,013 mm (pagal servo variklio duomenis), arba 0,029 mm (pagal LKP-7100 standartą).

Nors skirtingais matavimo būdais gauti laisvumo rezultatai skiriasi 400 %, reikia įvertinti, kad laisvumą ir paklaidas sudaro skirtingos dedamosios. 14 lentelėje pateiktos paklaidos dedamosios turinčios įtaką skirtingų matavimo būdų rezultatus.

14 lentelė. Skirtingų staklių komponentų įtaka laisvumo matavimų rezultatams

Matavimo būdai	Servo pavara	Mechaninė judesio perdavimo grandis	Lakšto laikikliai (angl. <i>Sheet Clamps</i>)	Lakšto plokštiškumas ir kitos savybės	Įrankio laikiklis	Štampavimo įrankis
VDI/DGQ 3441	Taip	Taip	Ne	Ne	Ne	Ne
Pagal servo variklio duomenis	Taip	Taip	Taip	Taip	Ne	Ne
LKP-7100	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip

Iš 14 lentelės matyti, kad skirtingų staklių komponentų laisvumas gali turėti įtakos servo ašių laisvumo matavimų rezultatams. Kadangi tiriamųjų staklių servo ašių laisvumas buvo išmatuotas skirtingais būdais, galima daryti prielaidą, kad:

- X ašies servo pavaros ir mechaninės judesio perdavimo grandies laisvumas 500 mm koordinatėje – 0,0073 mm;
- lakšto laikiklių ir lakšto plokštiškumo įtaka X servo ašies tikslumui 500 mm koordinatėje yra 0,0057 mm (0,013–0,073 mm);
- įrankio laikiklio ir paties štampavimo įrankio įtaka bendrai paklaidai X ašyje yra 0,016 mm (0,029–0,013mm).

Kadangi tikslumo matavimai pagal LKP-7100 standartą neatliekami kitose X ir Y servo ašių koordinatėse, sutampančiose su kitų matavimų rezultatais, toliau matavimo pagal servo variklio duomenis rezultatai lyginami tik su matavimo pagal VDI/DGQ 3441 standartą rezultatais. 15 lentelėje pateikiami pagal servo variklio duomenis išmatuotų servo ašių laisvumų aritmetinis vidurkis X ašies koordinatėse: 500; 1000; 1500; 2000; 2500 bei Y ašies koordinatėje 200 ir šių rezultatų palyginimas su matavimo, pagal VDI/DGQ 3441 standartą, rezultatais.

15 lentelė. Laisvumo matavimo rezultatų palyginimas naudojant skirtingus matavimo būdus

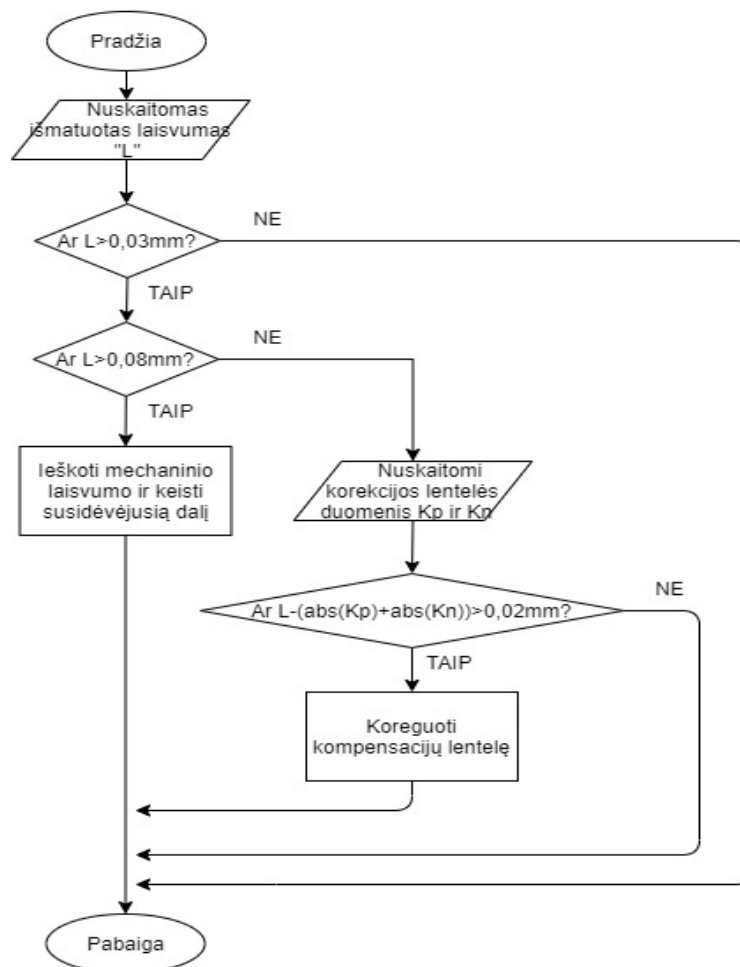
Servo ašis / koordinatė, mm	Laisvumas išmatuotas pagal VDI/DGQ 3441 standartą L1, mm	Laisvumų išmatuotų pagal servo variklio duomenis aritmetinis vidurkis L2, mm	Skirtumas L2-L1, mm	Santykis, L1/L2
X / 500	0,0073	0,0131	0,0058	0,56
X / 1000	0,0085	0,0183	0,0098	0,46

$X / 1500$	0,009	0,0162	0,0072	0,56
$X / 2000$	0,01	0,0164	0,0064	0,61
$X / 2500$	0,0083	0,0176	0,0093	0,47
$Y / 200$	0,0042	0,0051	0,0009	0,82

Iš 15 lentelės matyti, kad skirtingais matavimo būdais gauti X servo ašies laisvumo reikšmių skirtumai siekia 0,0058–0,0098 mm, o laisvumas išmatuotas pagal VDI/DGQ 3441 standartą sudaro 46–61 % nuo, pagal servo variklio duomenis, išmatuotų laisvumų vidurkių. Y servo ašies laisvumo matavimų duomenų sutapimas siekia 82 %, dėl sraigtinės servo ašies judesio perdavimo grandies (X servo ašyje naudojama krumpliastiebinė judesio perdavimo grandis) bei kitų sisteminių paklaidų (lakšto laikiklio, lakšto ploštiškumo) įtakos matavimo rezultatams.

3.5. Laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis panaudojimas

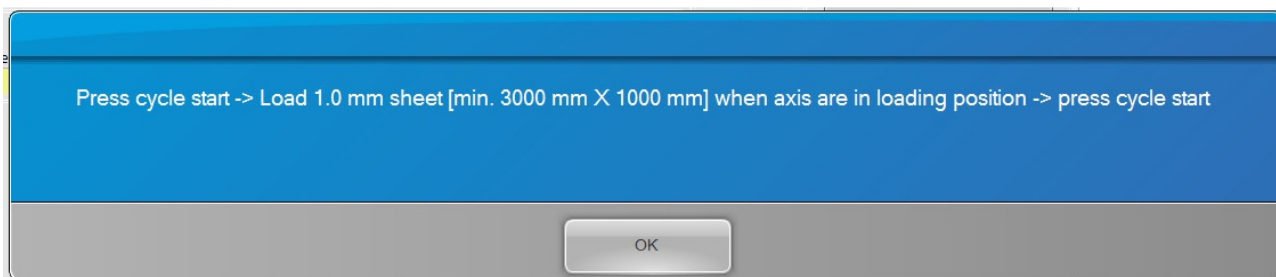
Įvertinus laisvumo matavimų, pagal servo variklio duomenis, rezultatus, ir palyginus juos su standartizuotų paklaidų matavimų rezultatais, matyti, kad servo ašių laisvumo matavimams gali būti naudingas serviso diagnostinis įrankis. Šiuo įrankiu būtų įvertinti bendrą staklių tikslumą bei diagnozuoti susidėvėjusias staklių mechanines dalis. 34 paveiksle pateiktas rekomendacinis algoritmas, parodantis kaip reiktų vertinti servo ašių laisvumo matavimo, pagal servo variklio duomenis, rezultatus.



34 pav. Rekomendacinis staklių laisvumo matavimų rezultatų vertinimo algoritmas

Servo ašių laisvumo matavimų pagal servo variklio duomenis rezultatams įtakos turi bent keli veiksniai nesusiję su servo ašimis (lakšto laikiklis, plieno lakšto savybės), todėl koreguoti pozicionavimo paklaidos kompensavimo algoritmo lenteles remiantis tik šiais matavimais nerekomenduojama. Siekiant išlaikyti VDI/DGQ 3441 standarte numatytą staklių ašių pozicionavimo tikslumą prieš koreguojant kompensacijų lenteles būtina atlikti servo ašių matavimus lazeriniu interferometru. Taigi šiuo atveju laisvumo matavimai pagal servo variklio duomenis atliktų tik indikacinę / įspėjamąją funkciją.

Siekiant didesnės pridėtinės vertės staklių naudotojui, galima būtų šį įrankį (servo ašių laisvumo matavimą pagal servo variklio duomenis) padaryti prieinamą ir staklių operatoriui. Tokiu atveju kas mėnesį staklių valdymo sistemoje būtų sugeneruojamas pranešimas, apie tai, kad atėjo laikas kasmėnesinei staklių laisvumo matavimų procedūrai. Staklių operatoriui sutikus atlikti matavimus staklės turėtų pateikti aiškius nurodymus, kokius veiksmus turėtų atlikti operatorius. 35 paveiksle pateiktas instrukcijų, pasirodančių staklių valdymo kompiuterio ekrane, pavyzdys.



35 pav. Staklių valdymo ekrane pasirodančių nurodymų, staklių operatoriui pavyzdys

Užtikrinus, kad šie servo ašių laisvumo matavimai atliekami reguliariai ir teisingai, matavimo rezultatai galėtų būti kaupiami *PRIMA POWER* serveryje ir analizuojami, siekiant diagnozuoti staiga atsiradusį gedimą arba numatyti artėjančius komponentų ribinius nusidėvėjimus. Tokiu atveju neplanuoti gedimai būtų aptinkami operatyviai, o natūraliai besidėvinčių dalių keitimas būtų planuojamas ir grupuojamas su planiniais serviso inžinierių vizitais.

Toks bendradarbiavimas būtų naudingas ir staklių gamintojui *PRIMA POWER*, nes leistų sumažinti skubių serviso iškvietimų skaičių ir padėtų lengviau planuoti serviso inžinierių darbo krūvį. Be to, nuolat atnaujinami staklių komponentų susidėvėjimo duomenys papildomi staklių darbo valandų skaitliukų parodymais, leistų lengviau prognozuoti gedimų skaičių net ir klientų, kurie nesinaudoja reguliaria laisvumo matavimų paslauga, staklėse. Šis įrankis taip pat padėtų įvertinti tiekiamų staklių komponentų (tokių kaip sraigtai ar krumpliaštiebiai) kokybę ir pastebėjus kokybės pablogėjimą (pastebėjus, kad keliose staklėse komponentai susidėvėjo greičiau nei planuota) – nedelsiant informuoti apie tai tiekėjus.

Išvados

1. Mokslinės literatūros analizėje apžvelgus servo pavarų klasifikaciją pagal mechaninius sprendimus nustatyta, kad pramoninėse skaitmeninio programinio valdymo staklėse naudojamos sraigtinė arba krumpliaštiebinė mechaninė perdavimo grandis. Trumpos eigos (iki 1500 mm) tiesiaieigėse servo ašyse dėl tikslumo naudojamos sraigtinės mechaninės perdavimo grandys, o ilgesnės eigos (daugiau nei 1500 mm) servo ašyse – krumpliaštiebinės dėl mažesnės kainos (krumpliaštiebinė mechaninė perdavimo grandis ilginama pridėjus papildomą krumpliaštiebio segmentą, o sraigtinėje grandyje reikia keisti visą sraigą) ir mažesnių su inercija susijusių problemų (Sraigto standumas turi ženklų poveikį servo ašies tikslumui. Ilgesnėje sraigtinėje perdavimo grandyje sraigto standumas užtikrinamas didinant jo skersmenį. Didesnio skersmens sraigto masė yra didesnė, todėl turi didesnę inerciją, kuriai suvaldyti reikalingi galingesni ir brangesni servo varikliai). Apžvelgus servo ašių klasifikaciją pagal pozicijos valdymo sistemą nustatyta, kad tiksliausia (iš apžvelgtų pozicijos valdymo sistemų) yra mišri pozicijos valdymo sistema (kadangi matuojamas ir servo variklio pasisukimo kampas ir staklių įrankio/ruošinio linijinis poslinkis, pozicionavimo paklaida sumažėja 10–30 %), tačiau dėl kainų skirtumo (valdymo sistemai reikalingi ir apskritiminis ir linijinis enkoderiai, kurie ir sudaro pagrindinį kainos skirtumą) ir atsparumo išoriniam poveikiui (vibracijos, tepimo ir aušinimo skysčiai, mechaninis poveikis ir t. t.) pramoninėse staklėse su skaitmeniniu programiniu valdymu dažniausiai naudojama pusiau uždara pozicijos valdymo sistema. Nepriklausomai nuo pasirinktų staklių konstrukcinių sprendimų, pasiekti reikalaujamą servo ašių pozicionavimo tikslumą padeda laisvumo kompensacijos algoritmai, tačiau tam kad šie algoritmai korektiškai veiktų, servo ašių netikslumai ir laisvumai kiekvienoje koordinatėje turi būti tiksliai išmatuoti bei suvesti į kompensacijų lenteles. Tikslus mechaninių paklaidų ir laisvumo identifikavimas, kompensaciniais algoritmais leidžia eliminuoti iki 70–80 % paklaidos.
2. Nustatyta, kad koordinatinio šampavimo staklėse, tiesiaieigėse X ir Y servo ašyse, pozicionavimo tikslumas (arba paklaida) turi tiesioginę įtaką gaminamų detalių kokybei, todėl labai svarbu išlaikyti reikalaujamą tikslumą visą staklių naudojimo laikotarpį. Tikslus servo ašių paklaidos ir laisvumo identifikavimas leidžia programiškai kompensuoti pozicionavimo netikslumus, o pasiekus ribinį mechaninių judesio perdavimo grandžių laisvumą (kuris nebegali būti efektyviai kompensuotas) laiku pakeisti susidėvėjusias dalis. Dėl šios priežasties reguliarius staklių tikslumo matavimas rekomenduojamas visoms koordinatinio šampavimo staklėms.
3. *PRIMA POWER* koordinatinio šampavimo staklių tikslumui įvertinti naudojami du pagrindiniai tikslumo matavimo būdai. Pirmas būdas tai servo ašių pozicionavimo tikslumo matavimas naudojant lazerinį interferometrą (pagal VDI/DGQ 3441 standartą). Antras būdas tai staklių tikslumo įvertinimas matuojant tomis staklėmis pagamintą specialią bandomąją detalę (pagal LKP-7100 standartą). Abu šie matavimo būdai yra nepatogūs staklių naudotojui, nes reikalauja sudėtingos matavimo įrangos (lazerinio interferometro arba matavimo staklių). Siekiant supaprastinti pirminį servo ašių laisvumo identifikavimą, buvo sukurtas programinis serviso įrankis – laisvumo matavimas pagal servo variklio duomenis. Šis įrankis leidžia išmatuoti servo ašių laisvumą nenaudojant jokios papildomos įrangos, be to matavimo rezultatai pateikiami nedelsiant.

Ištyrus servo ašių matavimo pagal servo variklio duomenis rezultatus nustatyta, kad matavimo rezultatų pasikartojamumas siekia 90–110 % nuo aritmetinio vidurkio, o apskaičiuotas standartinis nuokrypis neviršija absoliutinės matavimo paklaidos. Ištyrus matavimo metu pasirenkamos ribinės srovės poveikį matavimo rezultatams, nustatyta, kad rekomenduojama

ribinė srovė (kuri atitinka ~300 N pastūmos jėgą) yra „plokščiausioje“ kreivės dalyje – tai reiškia, kad servo ašiai judėti reikalingos jėgos pokytis (dėl mechaninių priežasčių, temperatūros, naudojamo tepalo savybių) turi mažiausią įtaką matavimo rezultatams visame tirtame ribinių srovių diapazone.

Literatūros sąrašas

1. XU, X. W. ir S. T. NEWMAN. Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent - A review of the technologies. *Computers in Industry*. 2006. ISSN 01663615.
2. SUK-HWAN SUH, I. S., Seong KYOON KANG, Chung DAE-HYUK. *Theory and Design of CNC Systems*. 2003.
3. ISO 6983-1: 1982. *Numerical Control of Machines. Program Format and Definition of Address Words, Part 1. Data format for positioning, line motion and contouring control systems*. 2009.
4. PRIMA POWER. Shear Genius – new generation of integrated punching and shearing technology. Seinajoki. 2017.
5. MEONI, F. ir M. CARRICATO. Optimal selection of the motor-reducer unit in servo-controlled machinery: A continuous approach. *Mechatronics*. 2018, 56, 132–145. ISSN 09574158.
6. CUSIMANO, G. ir F. CASOLO. Mechatronics An almost comprehensive approach for the choice of motor and transmission in mechatronics applications: Motor thermal problem. *Mechatronics*. 2016, 40, 96–105. ISSN 0957-4158.
7. VERL, A. ir T. ENGELBERTH. Adaptive preloading for rack-and-pinion drive systems. *CIRP Annals*. 2018, 67(1), 369–372. ISSN 17260604.
8. FREY, S., A. DADALAU, ir A. VERL. Expedient modeling of ball screw feed drives. *Production Engineering*. 2012, 6(2), 205–211. ISSN 09446524.
9. ENGELBERTH, T., S. APPRICH, J. FRIEDRICH, D. COUPEK, ir A. LECHLER. Properties of electrically preloaded rack-and-pinion drives. *Production Engineering*. 2015, 9(2), 269–276. ISSN 18637353.
10. *Linear drives: 8 advantages of rack and pinion* [Interaktyvus]. 2011 [Žiūrėta: 2020-02-12]. Prieiga per: <https://www.apexdyna.nl/en/news/linear-drives-advantages-rack-pinion/>.
11. VAN DE STRAETE, H. J., P. DEGEZELLE, J. DE SCHUTTER, R. J. M. BELMANS ir S. MEMBER. Servo Motor Selection Criterion for Mechatronic Applications. *IEEE/ASME Transaction on MECHATRONICS*. 1998, 3(1), 43–50.
12. VÖRÖS, J. Modeling and identification of systems with backlash. *Automatica*. 2010, 46(2), 369–374. ISSN 0005-1098.
13. SHI, S., J. LIN, X. WANG, ir X. XU. Analysis of the transient backlash error in CNC machine tools with closed loops. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015, 93, 49–60. ISSN 08906955.
14. TARNG, Y. S., J. Y. KAO, ir Y. S. LIN. Identification of and compensation for backlash on the contouring accuracy of CNC machining centres. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1997, 13(2), 77–85. ISSN 02683768.
15. PAPAGEORGIOU, D., M. BLANKE, S. MEMBER, H. H. NIEMANN, ir J. H. RICHTER. Robust Backlash Estimation for Industrial Drive-Train Systems — Theory and Validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2019, 27(5), p. 1847–1861.
16. ENGELER, M., A. ELMIGER, A. KUNZ, D. ZOGG, ir K. WEGENER. Online Condition Monitoring Tool for Automated Machinery. *Procedia CIRP*. 2017, 58, p. 323–328, ISSN 2212-8271.
17. PRIMA POWER. Machine condition monitoring monthly report. Seinajoki. 2018.
18. *Prima Power* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-12-05]. Prieiga per: www.primapower.com.
19. PRIMA POWER. Punch Genius – new-generation turret punch press. Seinajoki. 2017.
20. *Interferometry explained* [Interaktyvus]. 2001-2020 [žiūrėta 2020-01-05]. Prieiga per: <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>.
21. VDI / DGQ 3441. *Statistical Testing of the Operational and Positional Accuracy of Machine Tools*. 1982 .
22. LKP - 7100. *Finn-Power LKP - 7100 Punching accuracy test standard*. 1989.
23. PRIMA POWER. LKP-7100 measurement report for 16.21-SG0142. Seinajoki. 2020.

24. FRANK, A. G., L. S. DALENOGARE, ir N. F. AYALA. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*. 2019, 210, p. 15–26, ISSN 09255273.
25. KURFESS, T. A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing. *Manufacturing Letters*. 2018, 15, p. 60–63, ISSN 2213-8463.
26. CHOI S., E. PAZOUKI, ir S. MEMBER. Iterative Condition Monitoring and Fault Diagnosis Scheme of Electric Motor for Harsh Industrial Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015, 62(3), p. 1760–1769, ISSN 0278-0046.
27. SCHOEN R. R., T. G. HABETLER, F., KAMRAN, ir R.T. BARTHELD. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1995, 31(6), p. 1274–1279, ISSN 4840085.
28. PRIMA POWER. VDI/DGQ 3441 measurement report for 16.21-SG0142. Seinajoki. 2020.