



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

Petras Dragūnas, Marius Snapkauskas

**PROGRAMINIŲ STAKLIŲ PROTOTIPO SKIRTO POLIMERŲ
APDIRBIMUI PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. Dr. Sigitas Kilikevičius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(parašas) Prof. Dr. Vytautas Grigas

(data)

PROGRAMINIŲ STAKLIŲ PROTOTIPO SKIRTO POLIMERŲ
APDIRBIMUI PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

Magistro projektas

Mechanikos Inžinerija (kodas 621H30001)

Vadovas

(parašas) Doc. Dr. Sigitas Kilikevičius

(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. Dr. Marius Rimašauskas

(data)

Projektą atliko:

(parašas) Petras Dragūnas

(data)

(parašas) Marius Snapkauskas

(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino

(Fakultetas)

Petras Dragūnas ir Marius Snapkauskas

(Studentų vardas, pavardė)

Mechanikos Inžinerija (kodas 621H30001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Programinių staklių prototipo skirto polimerų apdirbimui projektavimo ir tyrimo

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

2016 m. Gegužės 19 d.

Kaunas

Patvirtinam, kad mūsų, Petro Dragūno ir Mariaus Snapkausko, baigiamasis projektas tema „Programinių staklių prototipo skirto polimerų apdirbimui projektavimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesam mokėję.

Mes suprantam, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, mums bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Dragūnas, P. ir Snapkauskas, M. Programinių staklių prototipo skirto polimerų apdirbimui projektavimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. Dr. Sigitas Kilikevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Mechanikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2016. 94 psl.

SANTRAUKA

Šiame darbe projektuojamos ir tiriamos trijų ašių programinės (CNC) staklės skirtos frezuoti poliacetalį bei kitus polimerus. Šis tyrimas aktualus šių laikų tendencijai, kada technologiniai įrenginiai tampa asmeniniais (asmeniniai kompiuteriai, asmeniniai 3D spausdintuvai ir t.t.). Pasaulyje panašios staklės nėra naujiena, bet konkretūs tyrimai apie konstrukcijos standumą ir apdirbimo tikslumą dar nebuvo atlikti. Tyrimo rezultatai bus galimai pritaikomi tolimesniam asmeninių CNC frezavimo staklių tobulinimui ir gamybai. Šio magistro projekto tikslas yra sukurti programuojamų CNC staklių prototipą, skirtą POM technologinio plastiko apdirbimui bei ištirti įlinkių įtaką staklių tikslumui.

Darbe apžvelgiama apdirbamos medžiagos, poliacetalio, mechanines charakteristikos ir palyginamos su kitų dažnai pramonėje naudojamų medžiagų charakteristikomis. Apžvalga tęsiama apie staklių konstrukcines dalis. Projektinėje dalyje išsirenkama staklių konstrukcija ir suprojektuojama *SolidWorks 2016* programine įranga. Atliekamos statinis stiprumo tyrimas, kurios pagrindžia pasirinktą konstrukciją. Suprojektuotos staklės surenkamos ir tiriamos. Pateikiama staklių sąmata ir palyginama su panašiomis staklėmis pardavime.

Tiriamajoje dalyje apskaičiuojamos pjovimo jėgos, atsirandančios apdirbant poliacetalį devyniais skirtingais frezavimo režimais. Atliekamas staklių kompiuterinis modeliavimas ir sulyginamas su realiai ištiriamais frezavimo metu atsirandančiais įlinkiais. Atliekama regresijos analizė, kuris parodo, kad konstrukcijos įlinkiams didžiausią įtaką turi pjovimo pastūma. Devyniais skirtingais režimais apdirbama po vieną detalę ir išmatuojamas tikslumas. Išrenkamas optimalus režimas pagal konstrukcijos įlinkius ir apdirbimo tikslumą. Sudaromas režimų įlinkių ir tikslumo priklausomybės grafikas. Optimaliausiu režimu frezuojamos dvidešimt vienodų detalių ir matuojamas jų apdirbimo tikslumas. Matavimų bei tyrimų rezultatai pateikiami grafiškai. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados ir patobulinimai.

Dragūnas, P. and Snapkauskas, M. Design and Analysis of a CNC Machine Prototype for Polymer Machining. Master final project / supervisor Doc. Dr. Sigitas Kilikevičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Department of Mechanical Engineering

Kaunas, 2016. 94 p.

SUMMARY

This paper covers the design and testing of a three-axis computer numerical control (CNC) milling machine for machining polyacetal (POM) and other polymers. This study is relevant in today's trend, when technological devices are becoming personal (personal computers, personal 3D printers, etc.). There are similar machines in the market, but specific studies on the structure rigidity and machining accuracy has not yet been carried out. The research results can be applied to further personal CNC milling machine development and production. This master's project aim is to create a programmable CNC machine prototype for polyacetal machining and to investigate the machine rigidity and accuracy.

The paper provides an overview of polyacetal, its mechanical characteristics and comparison with other commonly used industrial materials characteristics. Review is continued on different machine components. Then the best machine structure type is selected and modeled within SolidWorks 2016 software. Simulations of the model are performed to back up the selected structure type. The designed machine is assembled and tested. The price for constructing the machine is compared with similar machines on sale.

The study of the machine is begun by calculating cutting forces generated when machining polyacetal by nine different routing regimes. Then a simulation of the machine is performed and the result are compared with the experimentally retrieved data of the strain and deflection occurring during machining. A regression analysis is performed, which shows that the cutting feed rate has the largest effect on the machine structure deflection. With the nine different routing regimes a testing part is machined, for each regime and the accuracy of the machining is measured. The optimal regime is chosen according to the results. A graph showing the dependency of the nine regimes deflection and precision is constructed. With the optimal regime twenty same test parts are machined and measured for obtaining machine accuracy. Measurement and analysis results are presented graphically. At the end of the paper conclusions and improvements are presented.

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Tvirtinu:

Mechanikos inžinerijos katedros vedėjas
Vytautas Grigas

(Parašas, data)

Mechanikos inžinerijos krypties studijų
programų vadovas Kęstutis Pilkauskas

(Parašas, data)

MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa: MECHANIKOS INŽINERIJA - 621H30001

Patvirtinta 2016 m.. Gegužės mėn. 3 d. dekanų įsakymu Nr. V 25-11-7

Išduota MDM 4/5 gr. Studentam Petriui Dragūnui ir Mariui Snapkauskui

-
- | | |
|-------------------|---|
| 1. Darbo tema: | Programinių staklių prototipo skirto polimerų apdirbimui projektavimas ir tyrimas
Design and Analysis of a CNC Machine Prototype for Polymer Machining |
| 2. Darbo tikslas: | Sukurti programuojamų CNC staklių prototipą, skirtą POM technologinio plastiko poliacetalio apdirbimui bei ištirti įlinkių įtaką staklių tikslumui |
-

3. Darbo uždaviniai

- Apžvelgti literatūrą ir mokslinius straipsnius apie poliacetalio POM charakteristikas, apdirbimą bei CNC staklių konstrukcijos aspektus;
 - Konceptualizuoti CNC staklių modelį, atlikti paruošiamuosius supaprastintų staklių konstrukcijos stipruminius skaičiavimus;
 - Suprojektuoti detalų staklių modelį, apskaičiuoti mechaninius komponentus, surinkti stakles;
 - Sudaryti devynis frezavimo režimus ir ištirti jų metu atsiradusius įlinkius.
 - Atlikti regresinę analizę
 - Ištirti staklių tikslumą optimaliausiu režimu frezuojant 20 vienodų detalių.
 - Įvertinus gautus rezultatus, pasiūlyti staklių prototipo patobulinimų.
-

4. Specialūs reikalavimai ir sąlygos

Sukurti CNC frezavimo stakles, su kuriomis būtų galima apdirbti plastiką.

Staklių apdirbimo tikslumas turėtų siekti H14 ir h14 kвалitetus, apdirbant detales su matmanėmis nuo 15 iki 30 mm.

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis

6. Darbo pateikimo (gynimui) terminas

iki

_____ (data)

Užduotį gavau:

_____ (studento vardas, pavardė, parašas)

_____ (data)

_____ (studento vardas, pavardė, parašas)

_____ (data)

Vadovas:

_____ Doc. Dr. Sigitas Kilikevičius

_____ (pareigos, vardas, pavardė, parašas)

_____ (data)

TURINYS

ĮVADAS	9
1. APŽVALGINĖ DALIS.....	11
1.1. Temos aktualumas.....	11
1.1.1. <i>Tradiciniai medžiagų apdirbimo būdai</i>	11
1.2. Plastiko ir aliuminio palyginimas	11
1.3. Mechaninis plastiko apdirbimas	16
1.3.1. <i>Plastiko frezavimas</i>	18
1.3.2. <i>Plastiko grėžimas</i>	19
1.3.3. <i>Paviršiaus kokybė</i>	19
1.3.4. <i>Aušinimas ir lubrikacija</i>	20
1.4. Trijų ašių programuojamos staklės.....	21
1.5. Konstrukcija.....	21
1.5.1. <i>Kreipiančioji sistema</i>	22
1.5.2. <i>Pavaros sistema</i>	25
1.5.3. <i>Rėmo struktūra</i>	27
1.6. Valdymas	28
1.6.1. <i>CNC valdiklio sandara ir uždaviniai</i>	30
1.6.2. <i>Programos sudėtis</i>	31
2. PROJEKTINĖ DALIS	32
2.1. CNC staklių konceptualizavimas.....	32
2.2. Supaprastinto modelio pastūmų tyrimas BEM.....	36
2.3. Modelio detalizavimas bei elementų parinkimas	42
2.3.1. <i>Staklių mašininė nulinė pozicija</i>	45
2.3.2. <i>Valdymas</i>	46
2.3.3. <i>Savikaina</i>	48
2.3.4. <i>Sūklis</i>	49

3. TIRIAMOJI DALIS.....	51
3.1 Įlinkių paskaičiavimas.....	51
3.2 Poslinkių matavimas laikrodiniu indikatoriumi	56
3.3 Poslinkių tyrimas naudojant baigtinių elementų metodą	59
3.4 Poslinkių rezultatų suvestinė.....	67
3.4.1 Regresinė analizė.....	78
3.5 Staklių tikslumo nustatymas.....	80
IŠVADOS	90
LITERATŪROS SĄRAŠAS	91
PRIEDAI.....	93

IVADAS

Technologijos, kurios seniau būdavo prieinamos tik specializuotoms įmonėms ar gamykloms, dabar jau beldžiasi į mūsų duris. Ne veltui sakoma, kad mes gyvename technologinės revoliucijos metu. Prieš 70 metų pirmieji kompiuteriai buvo kambario dydžio ir sverdavo keletą tonų, o dabar kiekvienas žmogus kompiuterį gali nešiotis su savimi. Šiuo metu panašus reiškinys vyksta ir su programinėmis CNC staklėmis – jos iš pramonės cechų žengia į žmonių namus.

CNC staklėmis gebama automatiškai atlikti įvairias gręžimo, frezavimo ir tekimo operacijas, prieš tai paruošus programą bei nubraižius įrankių judėjimo maršrutą. Programine įranga sudaryta programa užduoda komandas besisukantiems staklių įrankiams frezuoti, gręžti ar tekinti. Gaminant vienetinius gaminius, šios staklės yra pravarčios dėl galimybės atlikti darbą iš karto – nereikalingos formos, šampai, prototipai. Toks staklių veikimo principas atvėrė galimybes pagaminti sudėtingus, rankomis nepagamintus produktus. Taip pat, dirbant CNC staklėmis optimizuojamas gamybos procesas, nes gaminius padaryti lengviau, pigiau ir greičiau nei tuomet, kai tie patys produktai gaminami kitokio tipo staklėmis arba rankomis. Įranga sukuriama trimatis gaminamos detalės modelis, tad gaminius paprasta modifikuoti ir keisti.

Šiame darbe pateikiamas mažų bei nebrangių CNC staklių kūrimas bei galimybių tyrimas. Šis tyrimas aktualus šių laikų tendencijai, kada technologiniai įrenginiai tampa asmeniniais (asmeniniai kompiuteriai, asmeniniai 3D spausdintuvai ir t.t). Pasaulyje panašios staklės nėra naujiena, bet tokių mažų gabaritų staklių, su tokia maža savikaina konkretūs tyrimai apie konstrukcijos standumą ir apdirbimo tikslumą dar nebuvo atlikti. Tyrimo rezultatai bus galimai pritaikomi tolimesniam asmeninių CNC frezavimo staklių tobulinimui ir gamybai.

Šio magistro projekto tikslas – sukurti programuojamų CNC staklių prototipą, skirtą POM technologinio plastiko apdirbimui bei iširti įlinkių įtaką staklių tikslumui.

Uždaviniai:

1. Apžvelgti literatūrą ir mokslinius straipsnius apie poliacetalio POM charakteristikas, apdirbimą bei CNC staklių konstrukcijos aspektus;
2. Konceptualizuoti CNC staklių modelį, atlikti paruošiamuosius supaprastintų staklių konstrukcijos stipruminius skaičiavimus;
3. Suprojektuoti detalų staklių modelį, apskaičiuoti mechaninius komponentus, surinkti stakles;

4. Sudaryti devynis frezavimo režimus ir ištirti jų metu atsiradusius įlinkius.
5. Atlikti regresinę analizę
6. Ištirti staklių tikslumą optimaliausiu režimu frezuojant 20 vienodų detalių.
7. Įvertinus gautus rezultatus, pasiūlyti staklių prototipo patobulinimų.

Šis tyrimas atliktas dviejų autorių. Žemiau pateikiamas indėlis į atliktą darbą procentais:

		Petras Dragūnas	Marius Snapkauskas
1.	Apžvalginė dalis	70 %	30 %
2.	Projektinė dalis	30 %	70 %
3.	Tiriamoji dalis	50 %	50 %

1. APŽVALGINĖ DALIS

1.1. Temos aktualumas

1.1.1. Tradiciniai medžiagų apdirbimo būdai

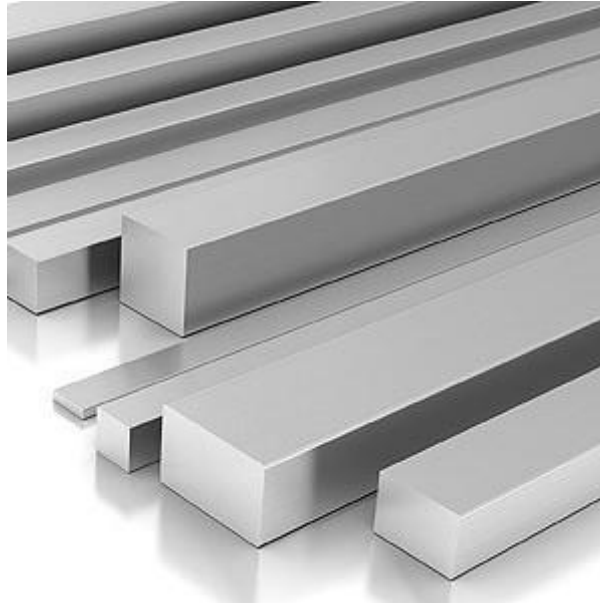
Žmonija jau tūkstančius metų tobulina minkštesnės medžiagos pjovimą ir kietesnės medžiagos apdirbimą pjovimo įrankiu. Laikui bėgant universaliąsias tekimo, frezavimo, pjovimo stakles, kuriomis dirbant darbininkai detalę pagamindavo per ilgą laiką, pakeitė kompiuterinio programavimo staklės (CNC). Tai labai palengvino ir pagreitino detalių gamybą, būtent todėl atsirado galimybė gaminti sudėtingas detales.

Tradiciniais medžiagų apdirbimo būdais galima pavadinti: a) tekimą universaliomis, paprastomis, specializuotomis staklėmis; b) frezavimą staklėmis su dalijimo galvute, universaliomis, plataus universalumo konsolinėmis, plataus universalumo bekonsolinėmis, karuselinėmis, būgninėmis staklėmis; c) pjovimą vandens srove.

1.2. Plastiko ir aliuminio palyginimas

Aliuminis yra labiausiai pasaulyje paplitęs metalas, kurio kasmet išgaunama ~35-40 mln. tonų. Grynas aliuminis yra ganėtinai minkšta ir itin lengva medžiaga. Rinkoje dažniausiai sutinkami aliuminio lydiniai – kitų medžiagų pagalba, lydinių gamybos procese medžiagai suteikiamos specifinės mechaninės savybės. Pagrindiniai aliuminio lydinių priedai – cinkas, varis, magnis, manganas ar silikonas. Aliuminio lydinių paplitimą ir įvairovę geriausiai atvaizduoja metalo panaudojimo praktika skirtinguose pramonės sektoriuose:

- Transporto sektorius (automobiliai, lėktuvai, dviračiai, laivai ir t.t.);
- Pakuočių gamyba (rėmeliai, folija, skardinės);
- Statybos sektorius (langai, durys, kabeliai, konstrukcijos, apšvietimo stulpai ir t.t.);
- Namų ūkio / sporto įranga (puodai, prietaisai, Apple produkcijos korpusai ir t.t.);
- Kiti sektoriai.



1. pav. Aliuminio ruošiniai [2]

Aliuminio lydiniai, pagal cheminę sudėtį yra skirstomi į grupes, kurių trumpas aprašymas pateikiamas žemiau [2]:

- 1xxx yra beveik gryno aliuminio lydiniai (99%). Šie lydiniai yra itin lengvi, naudojami gaminant gaminius, kurie naudojami patalpose (pavyzdžiui užrašų lentelės / šaldymo patalpų vidinės sienos ir pan. Dažniausiai pasitaikantis lydinys – 1050. Gali būti grūdinamas.
- 2xxx yra aliuminio ir vario lydinys. Gali būti grūdinamas įvairiais lygiais. Buvo plačiai naudojamas oro prietaisų – lėktuvų gamyboje, vadinamas – duraliuminiu. Tačiau dėl nepakankamo atsparumo korozijai, trūkinėjimui buvo pakeistas 7xxx grupės lydiniais.
- 3xxx yra aliuminio ir mangano lydinys. Gali būti grūdinamas. Pasižymi geromis atsparumo rūdijimui savybėmis, gali būti valcuojamas, yra lengvai apdirbamas. Plačiai naudojamas fasado plokščių – stogo skardų gamyboje.
- 4xxx yra aliuminio ir silikono lydinys, dar vadinamas siluminu. Rečiau sutinkamas lydinys, kuris naudojamas gaminant produktus, kurie būtų sunkiai deformuojami. Medžiaga pasižymi itin aukštu standumu, yra sunkiai formuojama.
- 5xxx yra aliuminio ir magnio lydinys. Visi šios grupės lydiniai pasižymi geru atsparumu rūdijimui, yra lengvai virinami. Lydiniai plačiausiai naudojami laivų gamyboje. Dažniausiai pasitaikantys lydiniai – 5005, 5754, 5083.

- 6xxx yra aliuminio, magnio ir silikono lydiniai. Lengvai apdirbama medžiaga, lengvai virinasi, taip pat, gali būti grūdinama. Tai yra dažniausiai naudojamas aliuminis – profiliai, vamzdžiai, strypai ir kt. gaminiai. Dažniausiai pasitaikantys šios grupės lydiniai yra 6060, 6082.
- 7xxx yra aliuminio ir cinko lydinys. Cinkas leidžia pasiekti didžiausią medžiagos tvirtumą grūdinimo metu, palyginus su kitomis medžiagomis.
- 8xxx grupė yra aprašoma kaip aliuminio ir kitų medžiagų lydiniai, kurie nebuvo minėti aukščiau. Tai gali būti aliuminio ir ličio lydinys, kuris yra naudojamas elektronikos pramonėje ar kitų metalų lydiniai.

Bendros aliuminio savybės: yra itin lengvas (beveik 3 kartus mažesnis medžiagos tankis už plieno tankį); itin didelė lydinių įvairovė, padedanti parinkti optimalų lydinį; perdirbamas; gali būti grūdinamas; yra atsparus rūdijimui, gali būti lengvai apdirbamas, virinamas, dažomas, anoduojamas.

Žemiau pateikiamos duraliuminio (2xxx) markės aliuminio lydinio mechaninės charakteristikos [3]. Duraliuminis dėl savo mechaninių charakteristikų yra plačiai naudojamas pramonėje, jis yra lengvai apdirbamas. Mokslininkai M. Sayuti, Tomohisa Tanaka, Ahmed A. D. Sarhan, Yoshio Saito ir M. Hamdi plačiai ištyrė AL-2014-T4 markės duraliuminio frezavimą ir tai aprašė 2012 ujų publikacijoje [11]. Straipsnyje pabrėžiama, kad ši markė pasižymi puikiomis stipruminėmis savybėmis bei yra lengvai apdirbama .

1 lentelė. Pagrindinės aliuminio 2014 mechaninės charakteristikos [3]

Charakteristika	Vertė	Vienetai
Tamprumo (Jungo) modulis, E	$7.2 \cdot 10^4$	MPa
Puansono koeficientas, ν	0,33	
Šlyties modulis, S	$2.8 \cdot 10^4$	MPa
Tankis, ρ	2800	kg/m ³
Tempimo stipris	425	MPa
Gniuždymo stipris	425	MPa
Takumo riba	290	MPa

Nepaisant aliuminio paplitimo, jam atsirado rimtas konkurentas: poliacetalis POM, dar vadinamas polioksimetilenu. Poliacetalis POM yra plačiausiai paplitęs techninis plastikas visoje judančioje technikoje, mechaniniuose įrenginiuose bei konvejeriuose. Šis plastikas pasižymi ypatingu atsparumu dilimui įvairiomis sąlygomis, taip pat puikiomis mechaninėmis savybėmis: standumu, tvirtumu, atsparumu smūgiams, UV spinduliuotei, naftos produktams ir kitiems agresyviems chemikalams. POM atlaiko dideles dinamines ir statines apkrovas, turi mažą trinties koeficientą bei pasižymi geromis elektroizoliacinėmis savybėmis. Dėl šių puikių savybių rinkinio poliacetalis yra plačiausiai paplitęs plastikas ne tik įvairiuose pramonės įrengimuose, bet ir buitiniuose prietaisuose, automobiliuose [12].



2. pav. Poliacetalio POM ruošiniai [12]

Poliacetalis POM (2 paveikslas) yra gerai apdirbamas ir nėra labai brangus plastikas, todėl frezuotojai ar tekintojai dažniausiai renkasi būtent šį plastiką ir gamina įvairiausias detales – krumpliaraičius, ratukus, ritinėlius, slydimo ar paprastas įvoves, skriemulius pluoštiniais ar plieniniams lynams, kaladėles, distancines didelių apkrovų tarpines, slydimo tarpines, kreipiančiąsias, paskirstymo žvaigždes, sraigtus, žiedus, grandiklius, įvairius dangtelius, izoliatorius ir kitas, techninės paskirties detales.



3. pav. Iš poliacetalio POM pagamintas skriemulys bei krumpliaratis [12]

Poliacetalio POM mechaninės charakteristikos yra pateikiamos lentelėje 2. Duomenys imti iš SolidWorks 2015 programinės įrangos duomenų bazės.

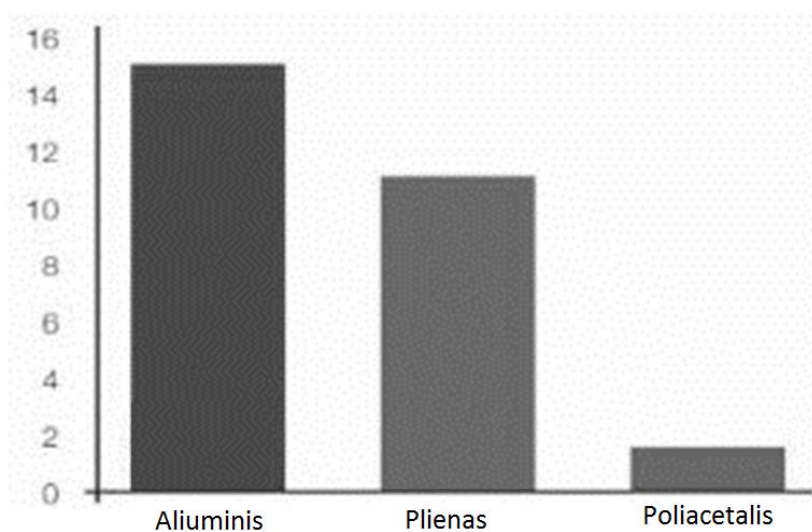
2. Lentelė. Poliacetalio POM plastiko mechaninės charakteristikos [12]

Charakteristika	Vertė	Vienetai
Tamprumo (Jungo) modulis, E	$2.6 \cdot 10^3$	MPa
Puansono koeficientas, ν	0,38	
Šlyties modulis, S	$9.32 \cdot 10^2$	MPa
Tankis, ρ	1390	kg/m ³
Tempimo stipris	71,5	MPa
Gniuždymo stipris	-	MPa
Takumo riba	150	N/mm ²

Akivaizdu, kad Aliuminis yra tvirtesnis už Poliacetalį, tačiau beveik 2,5 karto sunkesnis. poliacetalis puikiai tinka tiek statiškoms, tiek judančioms detalėms gaminti, tuo tarpu iš aliuminio pagamintos pavaros ar skriemuliai nėra patvarios, nes jos neatsparios smūgiams bei yra linkusios nusidėvėti. Peršasi išvada, kad poliacetalį galime naudoti nedideliuose judesį generuojančiuose

mechanizmuose, kurie yra skirti perduoti judesį neveikiant didelėms apkrovoms arba įvairiems laikikliams. Tokios detalės puikiai atliks savo funkciją, o jų gamyba bus paprastesnė bei pigesnė.

Poliacetalinių detalių gamyba ir platinimu užsiima Vokiečių įmonė „Igus“ [13]. Įmonė skelbiasi, kad jų produktų asortimentą sudaro net 80000 detalių bei junginių. Dėl itin glaudaus paviršiaus, jų gaminamų detalių nereikia papildomai lubrikuoti. Įmonė pateikia įdomią statistiką: pagaminti 1 kilogramą plastiko reikia 1.8 litro benzino o tai net 10 kartų mažiau nei degalų kiekis norint pagaminti vieną kilogramą aliuminio.



4. pav. Igus.lt informacija. Energijos kiekis reikalingas išgaunant aliuminį bei plastiką [13].

1.3. Mechaninis plastiko apdirbimas

Lyginant su metalais, plastikas gali būti plačiai naudojamas, tačiau egzistuoja ir šios medžiagos panaudojimo ribotumų. Plastiką pasitelkiamas, kuomet reikalingas palankus svorio ir stiprumo santykis. Plastiko sudėtis pasižymi keletu charakteristinių privalumų jo panaudojime. Tačiau siekiant panaudoti plastiko teikiamas galimybes, pakeičiant juo kitas medžiagas, sudėtinės šios medžiagos dalys taip pat turi būti pakeičiamos.

Plastiko privalumai, lyginant su metalu:

- Mažo tankio;
- Slopina triukšmą ir vibracijas;
- Elektros izoliacija, reguliuojamas laidumas;

- Chemiškai atsparus;
- Lengva modeliuoti ;
- Laidus elektromagnetinėms bangoms;
- Atsparus korozijai;
- Atsparus šilumai;
- Galimos pritaikymo modifikacijos.

Plastiko trūkumai, lyginant su metalu:

- Santykinai maža šiluminė varža;
- Didesnis šiluminis plėtimasis;
- Mažesnės mechaninės savybės;
- Mažesnis atsparumas valkšnumui.

Į aptartus plastiko privalumus ir trūkumus, lyginant su metalais, reiktų atsižvelgti tuomet, kai medžiaga yra mechaniškai apdirbama. Reikia pažymėti, jog plastikas:

- Gerai izoluoja šilumą;
- Pasižymi žemesniu šilumos laidumu;
- Kaip ir metaluose, šiluma nėra arba tik iš dalies išsklaido apdirbamuose plastiko komponentuose;
- Lyginant su metalais, būdingas didesnis šiluminis plėtimasis;
- Gera fiksacija ir išsilaikymas apdirbimo metu .

Galimos pasekmės, jei neatsižvelgiama į minėtas plastiko savybes:

- Per didelis šilumos kiekis gali sąlygoti aukštą įtampą ir komponentas gali pradėti trūkinėti;
- Per didelis šilumos kiekis gali priversti plastiką plėstis. Dėl to leistini apdirbamų dalių nuokrypiai gali būti neišlaikyti;
- Netinkama fiksacija gali daryti įtaką komponento deformacijai apdirbimo metu.

Tinkamas šilumos išsklaidymas – geriausiai per medžiagos drožles. Siekiant pasirinkti tinkamus pjovimo įrankius ir parametrus termoplastinėms medžiagoms, šis metodas taikomas atsižvelgus į plastiko rūšį. Tik tokiu būdu gali būti pagaminami geriausi komponentai.

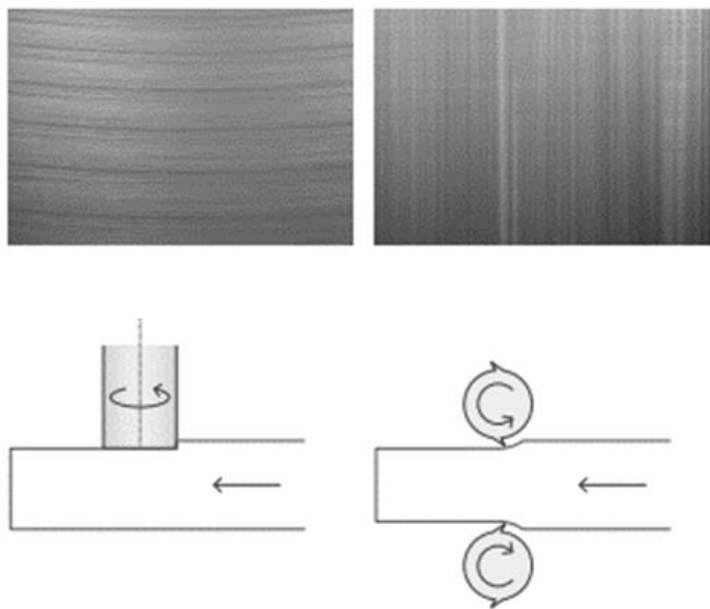
1.3.1. Plastiko frezavimas

Plastikas gali būti frezuojamas naudojant įprastas apdirbimo stakles. Frezavimas turėtų būti atliekamas naudojant įrengimus, kuriuose yra pakankamai vietos tarp staklių čipų, užtikrinant patikimą jų veikimą ir taip išvengiant medžiagos perkaitimo.

Įrankiai, tinkami dirbti su termoplastiku:

- Galinės frezos;
- Pirštinės frezos;
- Cilindrinės frezos;
- Vieno dantuko frezos;
- Diskinės frezos.

Vieno dantuko frezos įrankiai privalūs tuo, jog su jais geriausiai atliekamas vidutinio dydžio pjovimas. Taip išlaikomas aukštos kokybės komponento paviršius ir lengva pašalinti čipą.



5. pav. Plastiko apdirbimas [12]

Rekomenduojamas aukštas pjovimo greitis ir vidutiniškas padavimo dažnis. Plonos apdirbimo dalys gali būti apsaugomos naudojant siurbimo įrangą arba dvipusę lipnią juostą ant

darbinio paviršiaus. Plokštiems paviršiams galinis frezavimas yra labiau ekonomiškas negu periferinis frezavimas. Periferinio frezavimo metu įrankiai negali turėti daugiau kaip dviejų pjovimo kampų, kad užtikrintų minimalią vibracijos kiekį, kuri gali sukelti daug pjovimo kampų. Čipo erdvė turi būti tinkamai apskaičiuota. Paspirtas frezavimas rekomenduojamas tada, kai išvengiama šilumos akumuliacijos dėl geresnio jos išsklaidymo.

1.3.2. *Plastiko gręžimas*

Gręžiant plastikinius komponentus pasirenkamas metodas, tinkantis plastiko sudėčiai, tam, kad būtų išvengta defektų. Tačiau, egzistuoja rizika sulaužyti, suplėšyti, perkaitinti komponentą ar pakeisti gręžimo skylių matmenis.

Gręžiant, didžiausias dėmesys skiriamas plastiko laidumo savybėms. Šios savybės gali sąlygoti greitą medžiagos (ypač pusiau kristalinės sudėties) įkaitimą gręžiant, ypač tuomet, kai gręžimo gylis yra dvigubai didesnis nei jo diametras. Tai gali daryti įtaką grąžto „tepumui“ ir vidiniam medžiagos plėtimosi komponente, kai gręžiama į apvalaus grąžto centrą. Spaudimo lygis gali būti pakankamai aukštas atsirasti deformacijai, matmenų tikslumui ar net plyšiams, įtrūkimams ir prasivėrimams apdirbtuose komponentuose ar ruošiniuose. Tinkamai atliekant gręžimo procesą tokių defektų išvengiama.

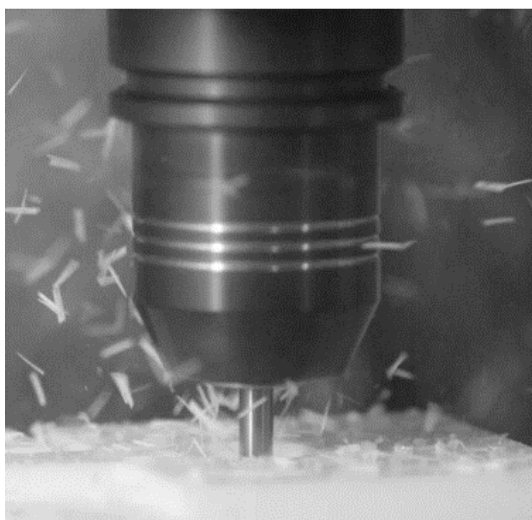
Rekomenduojama naudoti aušinimo skystį. Dažnai atitraukti grąžtą: pakeisti čipus, papildomai atvėsinti. Vengti rankinio padavimo, nes tai užtikrins, kad grąžtas neužkibs, neeis komponentui suskilinėti.

Mažo diametro skylių gręžimui naudoti didelės spartos grąžtą (HSS grąžtai), spiralinį grąžtą. Naudoti 12 – 25 laipsnių sukimosi kampus – taip užtikrinamos tolygios sukimosi briaunos; gerai prisitaikantis gręžimo kampas. Jei naudojami plonasieniai komponentai rekomenduotina pasirinkti didelį pjovimo dažnį bei neutralų (0 laipsnių) pjovimo kampą.

1.3.3. *Paviršiaus kokybė*

Norint išgauti kokybišką komponento paviršių, reikia naudotis įrankiais pritaikytai darbui su plastikais. Naudojami įrankiai turi būti aštrūs ir lygūs (užaštrinta pjovimo briauna). Atšipusi pjovimo briauna gali padidinti karščio generaciją, o tai gali daryti įtaką komponento deformacijai ir šiluminiam plėtimuisi. Įrankiai turėtų būti išdėstyti taip, kad tik pjovimo kampas liesis su

plastiku. Nepriekaištingas, aukštos kokybės paviršius gali būti apdirbtas tik žemos vibracijos staklėmis. Šlifavimui naudojama mažo šiurkštumo medžiaga. Atkreipti dėmesį į plastiko savybes (šiluminį plėtimąsi, nestiprumą, mažą šilumos laidumą). Dėl minimalaus medžiagos standumo, ruošinys turi būti tinkamai prilaikomas ir būti kaip įmanoma labiau prispaustas prie atraminio paviršiaus siekiant išvengti deformacijos ir netikslumų. Procesų, generuojančių aukštą temperatūrą, metu naudoti aušinimo skysčius. Frezuojant svarbu pasirinkti tinkamus parametrus. Išlaikytus vidutinius padavimo dažnius. Reikalingas didelis pjovimo greitis



6. pav. Plastiko apdirbimas [12]

1.3.4. Aušinimas ir lubrikacija

Pastaruoju metu pastebima tendencija atlikti sausą plastiko apdirbimą. Nors yra sukaupta pakankamai patirties šioje srityje, dažnai įmanoma apdirbti plastiką be aušinamųjų medžiagų. Išimtyms taikomos tuomet, kai dirbama su termoplastiku, taip pat gręžiamos gilios skylės ir plastikas naudojamas sriegimui. Kita vertus, pjovime galima naudoti atvėsintą medžiagos paviršių, norint pagerinti jo kokybę ir leistinus apdirbamų plastikinių dalių nuokrypius, taip pat naudoti didesnius padavimo dažnius bei nuosekliai mažinti staklių veikimo laiką.

Naudojant suspaustą orą privalumas tuo, kad vienu metu vėsinama ir pašalinami darbui naudoti čipai. Galimas aušinimas ir naudojant vandenyje tirpius aušinimo skysčius. Taip pat gali būti naudojamos gręžimo emulsijos bei pjovimo alyvos. Aerosoliniai bei suspausto oro vėsavimo skysčiai yra labai veiksmingi.

Sauso apdirbimo privalumai yra, kad nelieka likučių ant detalių. Naudingas detalėms, naudojamoms medicinos prietaisų technologijoje, maisto industrijoje. Išvengiama įtakos, kurią vėsinosios medžiagos sukelia medžiagai (išsiplėtimas, matmenų pokyčiai, įtampa, įtrūkimai). Jokio sąlyčio su medžiaga. Išvengiama klaidingo darbuotojo pasirinkimo ar situacijos įvertinimo. Pažymima, kad naudojant sausą apdirbimą vėsinimas yra būtinas šilumos slopinimui.

1.4. Trijų ašių programuojamos staklės

Computer Numerical Control (CNC) kompiuterinio programinio valdymo staklėmis vienu metu gebama vykdyti trimis ar daugiau koordinatinių ašių judančiais įrankių poslinkius. Šios valdymo galimybės leidžia išgauti sudėtingas įrankių judesių trajektorijas. Tokios trajektorijos sunkiai programuojamos prie staklių valdymo pulto, todėl šiam tikslui naudojami kompiuteriai su specialia programine įranga „Computer Aided Manufacturing“ (CAM). CAM dėka sukuriama staklių veikimo programos bei pavaizduojami detalių erdviniai modeliai. Įvardinti CNC staklių valdymo ypatumai leidžia optimizuoti gamybos įmonių veiklą, nes reikalingas mažesnis stakles valdančių žmonių kiekis. Dažnu atveju, CNC staklių valdymo programos rengiamos inžinieriaus technologo arba konstruktoriaus darbo vietoje, nevykdant tarpinės konstrukcijų ir technologinės dokumentacijos. Tad, staklių valdymas labiau priklauso nuo programuotojo gebėjimo jas paleisti, negu nuo konstruktoriaus ar kito stakles prižiūrinčio darbininko įgūdžių. CNC staklės naudojamos tiek smulkiose, tiek stambiose gamybos organizacijose. Tokiu atveju, šiuolaikiniams technologams privalu rengti staklių valdymo programas ir turėti patirties valdant stakles kompiuteriniu būdu.

1.5. Konstrukcija

CNC mechaninė konstrukcija yra vienas svarbiausių faktorių, kuris lemia staklių darbo tikslumą ir rezultatų patenkinamumą. Teisingas detalių ir medžiagų pasirinkimas turi tiesioginį poveikį staklių darbo atlikimui, tikslumui, standumui, ilgaamžiškumui ir patikimumui. CNC staklių konstrukciją būtų galima padalinti į tris pagrindines dalis:

- kreipiančioji sistema;
- pavaros sistema;
- rėmo struktūra.

Kiekviena iš šių sistemų turi tiesioginę įtaką minėtoms staklių savybėms. Šio skyriaus tikslas sutelkti dėmesį į šių sistemų tipus ir apžvelgti kiekvieno tipo privalumus ir trūkumus.

1.5.1. Kreipiančioji sistema

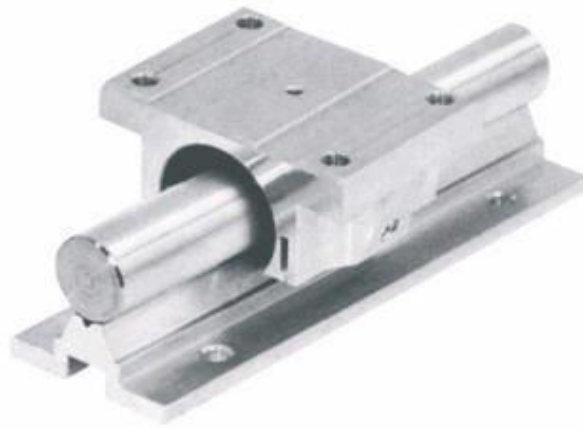
Kreipiančiosios - viena svarbiausių detalių, kurios skirtos staklių mechanizmų, kuriuose įtvirtintas įrankis arba ruošinys, judėjimui. Kreipiančiosios būna slydimo arba riedėjimo, tiesiam arba apskritimui judesiui atlikti.

Pirmas žingsnis projektuojant linijinio apdirbimo stakles yra tinkamas kreipiamosios konstrukcijos parinkimas, kuri riedėjimo ar slydimo judesiu leistų nevaržomai judėti išilgai atitinkama ašimi. Logiškiausia projektuojant kreipiančiųjų konstrukciją yra atsižvelgti ir apsvarstyti dydį ir svorį konstrukcijos, kurią neš kreipiančioji sistema, apkrovas, kurios veiks kreipiančiąsias apdirbant įvairias medžiagas. Iš to išplaukia atitinkamas atramų ir kreipiančiųjų gabaritų – skersmens, ilgio ir medžiagos parinkimas, užtikrinantis, kad apkrovimo metu būtų kuo mažesni įlinkiai ir vibracijos. Dažniausiai naudojamos medžiagos yra plienas, nerūdijantis plienas, plastikai, aliuminis. Medžiagos parenkamos pagal atsparumą korozijai, standumą, svorį. Kiti kreipiančiųjų rūši parinkti padedantys parametrai yra taškinė ar ištisinė atramos, galinės atramos, savaimė išsilyginančios.



7. pav. Velenas [10]

Šiame darbe apžvelgiamos kreipiančiųjų sistemos, kurios yra plačiai naudojamos ir laiko patikrintos. Vienas iš labiausiai paplitusių sprendimų yra strypų - velenų naudojimas kreipiamosioms. Strypo-veleno tipo kreipiančioji, matoma X pav. yra tiek paprastas, tiek efektyvus sprendimas linijiniui judesiui perduoti. Dažniausiai vienos ašies judesio kreipiamoji konstrukcija susideda iš dviejų velenų. Velenas atlaiko teikia paramą pakrovimo programų palei veleną, kartu su jėgomis, gautą iš linijinio judesio, kuris daro tai ideali koncepcija šios konkrečios sistemos.



8. pav. Linijinis guolis su įtvirtintu velenu [11]

Kitas kreipiančiosios sistemos pavyzdys yra pavaizduotas 8 paveiksle, kuris susideda iš veleno-strygo išilgai pritvirtinto prie staklių korpuso ir linijinių guolių, kurie nepilnai apgaubia veleną. Veleno su atrama konstrukcija šiuo konkrečiu atveju užtikrina didesnę atsparumą vibracijoms, sumažina veleno įlinkius apkrovimo metu ir prailgina konstrukcijos ilgaamžiškumą.



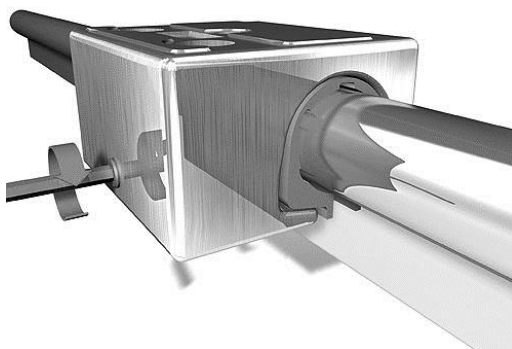
9. pav. V formos bėgelis [11]

Riedėjimo kreipiamosios su V formos bėgeliu ir M formos ratuku suteikia linijinį judesį, pakeisdamas slydimo trintį į riedėjimo trintį. Riedėjimo judesys užtikrina didelį kreipiamųjų tikslumą ir jautrumą. Šis kreipiančiųjų metodas dažnai sutinkamas 3D spausdintuvuose, foto ir vaizdo kamerų transportavimo įrenginiuose.



10. pav. Karietėlės su bėgiais [13]

Linijinės karietėlės plačiai naudojamos įvairiuose technologiniuose įrengimuose. Didelės apkrovos, greitis ir aukšta tikslumo klasė sudaro palankias sąlygas linijinio judesio panaudojimui įrengimų gamyboje. Linijiniai bėgiai nereikalauja daug techninės priežiūros, juos lengva sumontuoti ir integruoti į stakles ar automatizavimo sprendimus. Daug linijinių bėgių pritaikymo pavyzdžių mes galime netikėtai sutikti mūsų kasdiniame gyvenime, kaip pavyzdys būtų traukinio vagono durų atidarymo sistema.



11. pav. Slydimas guolis [13]

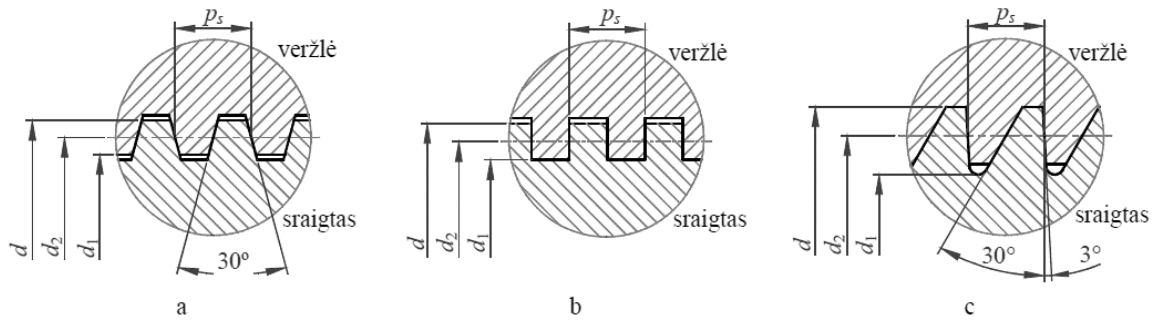
Slydimas guoliai gaminami iš antifrikcinių medžiagų, kaip specialūs plastikai, bronzos, ketaus, grafito. Privalumai, kad nereikalauja tepimo, atsparūs dulkėms. Labiau tinka mažų apkrovų darbams. Svarbiausia yra žinoti, kaip surasti tinkamiausią nukreipimo sprendimą, užtikrinantį reikiamą tikslumą, tvirtumą ir padėties nustatymą už tinkamą kainą.

1.5.2. Pavaros sistema

Pavara – tai mechanizmas, išjudinantis staklių vykdymo įrenginius bei tam tikru lygiu reguliuojantis šį greitį. Pavaros sistema skirta žingsninių variklių sukurtą sukimo momentą mechaniškai paversti į varomąjį linijinį judesį, kuris galėtų nešti įrengimą išilgai atitinkama ašimi. Metalo apdirbimo staklėse pavaros gali būti reguliuojamos laipsniškai arba belaispniškai. Pirmuoju atveju, kuomet pavarų greitis reguliuojamas laipsniškai, priskiriamos laiptuotos skriemulių pavaros, krumpliaratinės greičių bei pastūmų dėžės, daugiagreičiai asinchroniniai elektros varikliai, taip pat galimos įvairios šių pavarų kombinacijos. Jeigu greičio pavaros staklėse reguliuojamos belaispniškai, tuomet jos gali būti mechaniniai variatoriai, nuolatinės elektros srovės varikliai ar hidraulinės pavaros. Pavaros yra staklių judesio šaltinis, o pavarų energija gaunama iš elektros variklių, kurie gali turėti skirtingus tvirtinimo elementus. Tradicinių CNC frezavimo staklių paskirtis – erdvinis apdirbimas. Dėl šios priežasties tokio tipo staklėms reikalingos mažiausiai trys linijiniu būdu judančios pavaros, kurios leistų įrankiui judėti trimis ašimis.

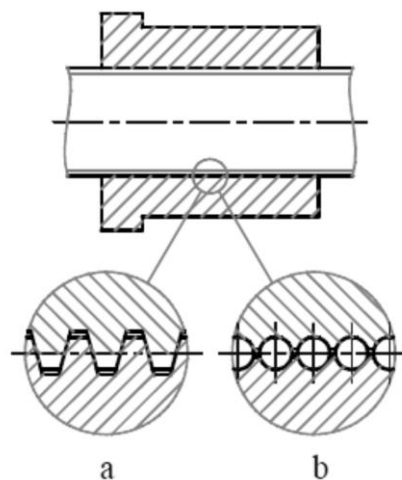
Linijinėse pavarų sistemose, norint sukamąjį judesį paversti į linijinį, dažniausiai naudojami sraigčiai. Naudojami maži ir dideli rutuliniai, atraminiai rutuliniai ar skirtingi ritininių sraigčių variantai. Šių sraigčių movos perduoda judesius iš vieno veleno į kitą. Velenai staklėse gali būti sujungti tampriais arba standžiais elementais. Movos gali būti taikytinos pastoviam arba periodiškam veiksmui. Pastovios movos tinkamos tuomet, kai darbo metu velenų nereikia atjungti. Periodiškam veiksmui labiau tinkamos sukabinimo movos. Pastarojo tipo movos naudojamos pagrindinių staklių judesių ar pastūmų pavarose, kai atjungiamos kumštelinė mova, vidinio kabinimosi krumplinė mova, frikcinė diskinė mova.

Norint sukimo judesius pavesti slenkamaisiais arba atvirkščiai, naudojamos sraigto – veržlės tipo pavaros. Šios pavaros veikimas grindžiamas nejudriu ašine kryptimi besisukančiu sraigto su slenkančia veržle, arba kitu atveju, nejudria veržle, kai sraigtas sukdamasis slenka. Pastebima, jog sraigto – veržlės pavara perduoda didelę jėgą, jos gabaritai maži, kaip ir nesudėtinga slydimo pavaros konstrukcija. Taip pat šio tipo pavaros veikia dideliu pastūmos tikslumu, dideliu perdavimų skaičiumi. Kita vertus, pastebima keli sraigto – veržlės pavarų trūkumai. Šio tipo pavara pasižymi nedideliu pavaros slydimo naudingumo koeficientu ir sudėtinga riedėjimo pavaros konstrukcija.



12. pav. Sraigto žingsniai [3]

12 paveiksle pavaizduoti sriegių tipai, naudojami slydimo sraigto – veržlės tipo pavarose. Tai trapecinio (a), atraminio (b) ir kvadratinio (c) profilio sriegiai. Trapeciniai sriegiai tinkamiausi, kuomet veikia abiejų krypčių jėga. Atraminiai sriegiai dažniausiai naudojami pavarose, veikiamose didelių vienakrypčių jėgų. Tai gali būti keltuvų, presų įrengimai ir panašiai. Tiek trapecinio, tiek atraminio tipo sriegių žingsniai yra standartizuoti. Pagal šį standartą jie skirstomi į smulkius, vidutinius bei stambius. Smulkaus žingsnio sraigčiai labiausiai tinkami tada, kai reikalingas didžiausias pastūmos tikslumas. Vidutinio žingsnio sraigčiai – naudojami dažniausiai. Stambaus žingsnio sraigto pasitelkiami tada, kai pavara dirba padidinto dilimo sąlygomis. Kai reikalingas itin didelis poslinkių tikslumas, naudingiausi kvadratinio profilio sriegiai. Tokio tipo sriegiai užtikrina mažesnę trintį, o neišvengiami radialiniai sraigto mušimai turi mažesnės įtakos įrankio poslinkių tikslumui. Kita vertus, dėl savo veikimo trūkumų kvadratiniai sriegiai naudojami nedažnai. Šio profilio sriegiai blogai centruoja, jų pagaminimas yra sunkus.



13. pav. Sraigto-veržlės pavaros [4]

13 paveiksle pavaizduotos kiti sraigto – veržlės tipai: slydimo sraigto – veržlės pavara (a) ir riedėjimo slydimo sraigto – veržlės pavara (b). Pagrįsta, jog riedėjimo slydimo sraigto – veržlės pavaros yra pranašesnės prieš slydimo sraigto – veržlės pavaras. Riedėjimo sraigto – veržlės pavaros naudojamos įtaisuose, kur reikalingas didelis tikslumas, taip pat atsakingose jėginėse pavarose. Šio tipo pavaros pasižymi didesniu naudingumo koeficientu, mažesniu išsidėvėjimu, nedideliu įšilimu nei slydimo sraigto – veržlės pavaros. Taip pat, riedėjimo sraigto – veržlės pavaroms būdingi netrūkčiojantys judesiai.

1.5.3. Rėmo struktūra

Norint užtikrinti kokybiškas darbo sąlygas, reiktų atsižvelgti, iš kokių medžiagų pagamintas staklių rėmas. Pagal Ostaševičių ir Dundulį (2004), dažniausiai staklių korpusai gaminami iš ketaus, retesniais atvejais – plieno. Ketų renkamosi dėl standumo, atsparumo gniuždymui [1]. Ši medžiaga slopina virpesius, atsirandančius mechaninio apdirbimo metu. Kita vertus, ketus naudojamas didelio svorio, seno tipo staklėms. Todėl plieninės konstrukcijos labiau tinkamos tais atvejais, kai gaminį reikalinga pagaminti per trumpą laiko tarpą. Tačiau, plienas irgi turi trūkumų. Suvirinti plieniniai korpusai labiau virpa. Dėl šios priežasties sunku išlaikyti estetišką formą jas gaminant. Be to, plieniniai korpusai yra brangesni, o tai dažnai lemia sprendimą rinktis ketų, neatsižvelgiant į teigiamas plieno savybes.

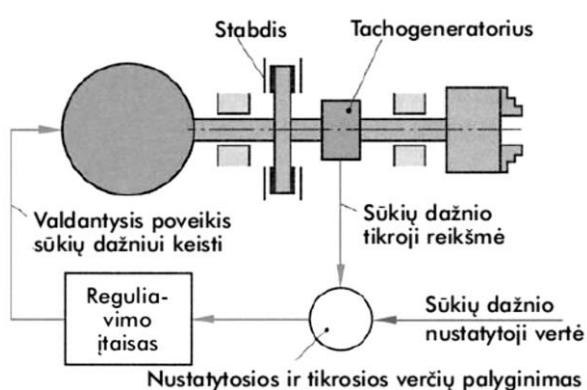


14. pav. Aliuminio profilio skerspjūvis [2].

14 paveiksle pavaizduotas aliuminio profilio skerspjūvis su T formos grioveliais. Tokio tipo aliuminio profiliai turi geriausias kainas, svorio bei lengvo surinkimo charakteristikas. Vienintelis šių aliuminių profilių trūkumas yra tas, kad reikia pakartotinai juos veržti dėl darbo metu atsiradusių virpesių.

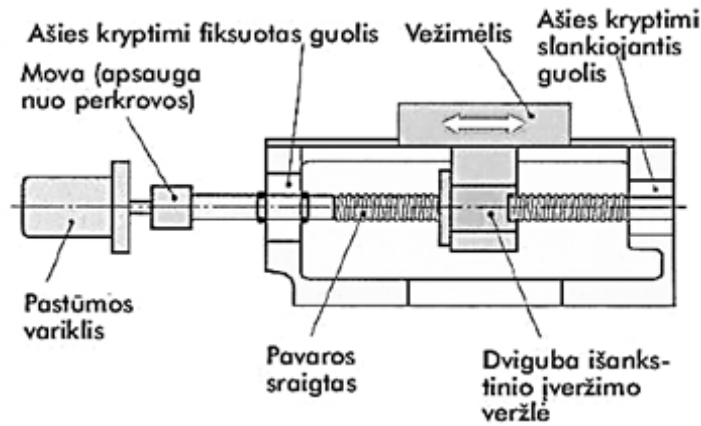
1.6. Valdymas

Pirmosios staklės, kuriuose buvo įmontuotas skaitmeninis valdymas, vykdė komandas perfokortomis ir perfojuostomis. Jomis buvo galima vykdyti tik vieną komandą, pastarosios negalėjo būti pakeičiamos kitomis. Todėl, norėjus staklėms užduoti naują komandą, tekdavo pakeisti ir perfokortas ar perfojuostas. Šiuo metu staklių valdymas tapo daug paprastesnis, nes jų valdymo sistemos geba vykdyti komandas, užkoduotas raidėmis ir skaičiais. CNC tipo valdikliuose, kuriuose yra mikroprocesorių, komandos gali būti keičiamos bet kuriuo metu. Siekiant optimizuoti programą padaryti pakeitimai valdikliuose gali būti įsimenami. DNV tipo valdikliai yra pajėgūs valdyti kelias NC tipo stakles vienu metu, kuomet joms iš centrinio kompiuterio užduodama programa.



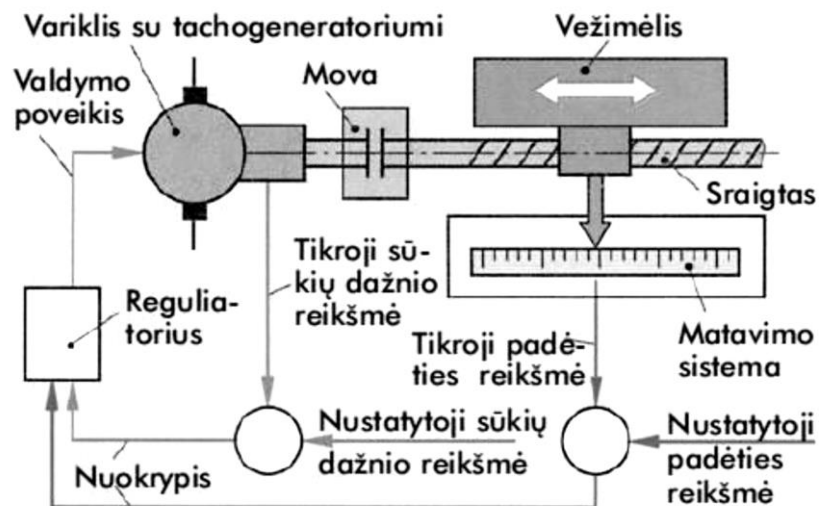
15. pav. Sūklio pavara su sūkių dažnio reguliavimu [6].

15 paveiksle pavaizduota sūklio pavara su sūkių dažnio reguliavimu. Pagrindinio sūklio pavarai naudojami trifaziai, kitais atvejais – nuolatinės srovės, varikliai su sūkių dažnių reguliavimu. Šiuos dažnius galima reguliuoti tolydžiai. Sūklio pavaros dažniai matuojami tachogeneratoriumi, kurio dėka sūkio dažnio matai generuojami į išėjimo įtampą. Generuota įtampa CNC tipo valdikliuose palyginama su nustatyta sūkių dažnio verte. Dėl šios priežasties esant variklio nuokrypiams šio tipo valdikliai geba atitinkamai jį pareguliuoti.



16. pav. Pastūmos pavara su pavaros sraigtu [6].

16 paveiksle pavaizduota pastūmos pavara su pavaros sraigtu. Kaip ir sūkljo pavarų, taip ir pastūmos pavarų sūkių dažnius galima reguliuoti tolydžiai, šiam tikslui naudojami trifaziai ar nuolatinės srovės varikliai. Pastūmos pavaros turi atlaikyti dideles pastūmos jėgas į suportą, didelius suporto pagreičius bei greitą padėties nustatymą. Taip pat, šio tipo pavaros turi turėti didelį pastūmos padėčių pakartojimo tikslumą, didelį standumą, tam, kad būtų išlaikyta ašies padėtis. Pastūmos pavara turi išvystyti labai mažus ir didelius pastūmos greičius. Kad susidūrimo atveju būtų sumažinti pažeidimai, tarp pavaros variklio ir pavaros sraigto dedama mova su perkrovos apsauga.



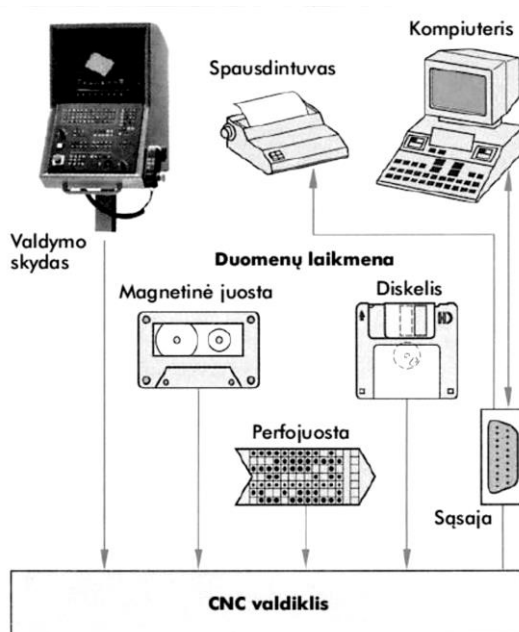
17. pav. Pastūmos pavaros padėties reguliavimo grandinė [6].

17 paveiksle pavaizduota pastūmos pavaros padėties reguliavimo grandinė. NC tipo

pastūmų pavarų sūkių dažnių reguliavimas dažniausiai papildomas padėties reguliavimu. Dėl šios priežasties kiekviena ašis turi savo poslinkio matavimo sistemą.

1.6.1. CNC valdiklio sandara ir uždaviniai

Pagrindiniai CNC tipo valdiklio uždaviniai yra duomenų įvedimas, įsiminimas, apdorojimas bei išvedimas. Taip pat svarbi pastovi staklėse vykstančio proceso kontrolė, pavyzdžiui, padedanti išlaikyti nustatytus sūkių dažnius ar vežimėlio padėtį.



18. pav. Duomenų įvesties ir išvesties galimybės [6].

18 paveiksle pavaizduotos duomenų įvesties ir išvesties galimybės CNC tipo valdikliuose. Duomenų įvedimas į valdiklius gali būti atliekamas ranka su valdymo pulto klaviatūra, duomenų laikmenomis, sąsajos (kištukinės jungties) būdais. Sudarytos detalių programos tokiais būdais įvedamos arba pakeičiamos. Įvestus duomenis valdikliai apdoroja keliuose mikroprocesoriuose. Informacija apdorojama skaičiuojant įrankio judėjimo trajektoriją, nuolat matuojant ir apskaičiuojant duomenis, kurių reikia pastūmos variklių padėčiai reguliuoti, taip pat kitais atvejais. Norint duomenis išvesti iš staklių valdiklių, tai atliekama per suderinimo modulį. Suderinimo modulis sustiprina valdymo signalus bei pakeičia juos taip, kad jie gebėtų valdyti variklius, ventilius bei kitas vykdomo grandis staklėse. Duomenys taip pat gali būti išvedami iš staklių ir per sąsajas.

1.6.2. Programos sudėtis

CNC staklių valdymo programa sudaryta iš nuosekliai išdėstytų komandų. Šios staklėms užduotos komandos vykdo procesus, kurių metu apdirbami ruošiniai ir gaunamos atitinkamų matmenų detalės. Kad staklės vykdytų šias komandas, būtina sąlyga yra valdymo sistemai suprantamais kodais parašyta programa. Tokioms programoms sudaryti dažniausiai atvejais naudojama G&M kodų programavimo kalba. Nors įvardinta programavimo kalba nėra standartizuota ir tam tikrų gamintojų valdymo sistemos gali nesuprasti G&M kodų, programos struktūra bei formatas nekinta, jos pagrindas yra toks pat.

1.6.3. Pagrindinės programos struktūra

G&M programavimo kalboje naudojami tam tikri terminai, sąvokos bei posakiai. Šią programavimo kalbą naudojant CNC staklių valdymui dažniausiai sutinkami keturios pagrindinės sąvokos:

Ženklas – žodis – eilutė – programa.

1. Ženklas – tai trumpiausias programos vienetas. Staklių valdymo pulte yra 26 anglų kalbos abėcėlės raidės, iš kurių dažniausiai naudojamos – „G“ ir „M“, nes G&M programavimo kalbos kodai prasideda šiomis raidėmis. Kitos raidės taip pat turi reikšmes: raidė „S“ reiškia sūklio apsisukimus, „F“ – pastūmą, „T“ – įrankį, „P“ – pauzę, atitinkamos ašys žymimos raidėmis „X“, „Y“, „Z“, „A“, „B“ ir „C“. Programos eilutės numeris žymimas raide „N“, įrankio ilgio kompensacija frezavimo staklėse – raide „H“. Jei kyla abejonių, kokią raidę naudoti programoje, didžiąją ar mažąją, rekomenduojama naudoti didžiąsias raides.

Reiktų paminėti, kad programuojant CNC tipo stakles ženklas reiškia ne tik raides. Tai gali būti ir skaičiai bei simboliai. Paprastai programoms rašyti naudojami pliuso ir minuso ženklai, kairysis bei dešinysis skliaustai, procentų simbolis.

2. Žodis – šis programos vienetas sudaro valdymo įrenginio komandą. Įprastu atveju, žodžiai komandose pradedami didžiosiomis raidėmis, o po jo rašomas skaičius. Kad programą būtų patogiau skaityti, kiekvienas žodis yra atskiriamas tarpais. Žodžiais programoje gali būti žymimi įrankio numeriai, sūklio sūkliai, pastūma, G, M, kodai ir kita. Pavyzdžiui, „T02“ reiškia „antrasis įrankis“, „S1500“ – „1500 sūkliai per minutę“, „F0.2“ – „0,2 milimetrų pastūmą

per sūkį“, „G03“ – „apskritinės interpoliacijos judesys prieš laikrodžio rodyklę“, „M03“ – „sūklis susimaišys į priekį“ ir panašiai.

3. Eilutė – tai sudėtinė komanda arba atliekamų kartu komandų sesija. Eilutę programoje sudaro vienas arba keli žodžiai, sudaryti iš keturių ženklų. Eilutės turi būti atskirtos viena nuo kitos. Programuojant kompiuteriu jos atskiriamos klaviatūros mygtuku „Enter“, jei programa rašoma staklių valdymo pultu – mygtuku „End of Block“. Programų eilutėse sudaryta galimybė rašyti komentarus, leidžiančius atkreipti staklių operatorių dėmesį. Pavyzdžiui, galima parašyti informaciją apie įrankius. Tačiau, komentarus būtina rašyti tik lotyniškos abėcėles raides, kurias privalu naudoti konspekte. Pavyzdžiui, programos eilutė G03 X45.0 Z-39.0 R1.5 F0.15 sudaryta iš penkių žodžių. Ši eilutė duoda komandą staklėms vykdyti apskritas interpoliacijos judesį prieš laikrodžio rodyklę. Čia X nurodo koordinatės 45, Z -39, spindulys 1.5, pastūmą 0.15.
4. Programa – tai logine tvarka viena po kitos išdėstytų eilučių darinys. Programa pradama pavadinimu, baigiama – pabaigos kodu. Kuomet programai suteikiamas pavadinimas, pravartu jį išsaugoti ir CNC įrenginio valdymo atmintyje.

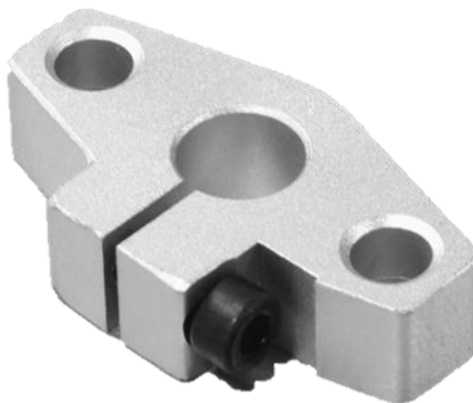
Kita dažnai sutinkama sąvoka G&M programavimo kalboje yra programavimo formatas. Tai toks formatas, naudojamas CNC įrenginių sistemose, kuomet programos žodį sudaro viena raidė ir vienas arba keli skaitmenys. Šis žodžių formatas gali būti papildytas ženklais. Tokiu būdu sudaromi programos žodžiai, turintys kreipinį, po kurio seka skaičius su simboliais ar be jų. Kreipiniai rašomi su tikslu pasiekti specialų registrą įrenginio programinio valdymo atmintyje. Kreipinį reikia užrašyti pirma skaičių ar simbolių, pavyzdžiui, X45. Priešingu atveju, staklių valdymo sistema nevykdys komandos, nes kodas parašytas neteisingai. Taip pat klaidinga tarp žodžio raidžių ir simbolių dėti tarpus. Svarbūs ir tinkamai parašyti skaičiai, esantys programos žodyje. Jie nurodo numerį arba skaitinę vertę, tad reikšmės gali būti skirtingos. Sveikieji skaičiai rašomi tuomet, kai jų reikšmės yra eilutės numeris (rašomi po raidės „N“), G ir M kodų numeriai arba kai tai yra įrankio numeris (rašomas po raidės „T“). Kitais atvejais, rašomi nebūtinai sveikieji skaičiai. Pavyzdžiui, norima užrašyti pastūmą (milimetrais per minutę arba milimetrais per sūkį, rašoma po raidės „F“, sūklis sūkius ar pjovimo greitį (po raidės „S“).

2. PROJEKTINĖ DALIS

2.1. CNC staklių konceptualizavimas

CNC staklių projektavimas prasideda nuo konceptualizavimo bei argumentavimo dėl vieno ar kito konstrukcinio sprendimo. Pirmiausia svarbu išskirti produktų kategoriją, kurio gamybai bus kuriamos staklės. Nuspręsta, kad bus gaminamos smulkios detalės iš POM poliacetalio plastiko:

- Laikikliai, profiliai (Pav. 6).
- Korpusų detalės
- Dekoratyvinės/neinžinerinės detalės;



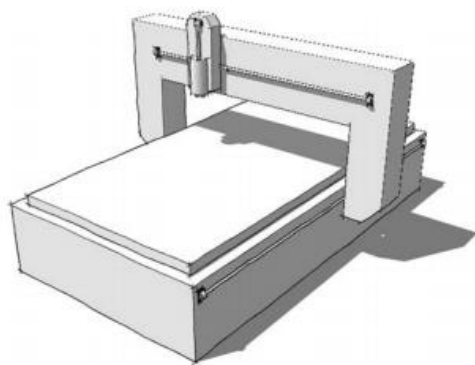
19. pav. Aliumininė detalė, kuri galėtų būti pagaminta iš plastiko [13].

Iš plastiko pagamintos detalės yra mechaniškai atsparios smūgiams, pasižymi elektroizoliacinėmis savybėmis, atsparios dėvėjimuisi, atsparios chemijai, detalių darbinė temperatūra - 40°C...+100°C o trūkumas - absorbuoja vandenį, todėl nepatartina naudoti dirbant drėgnoje aplinkoje.

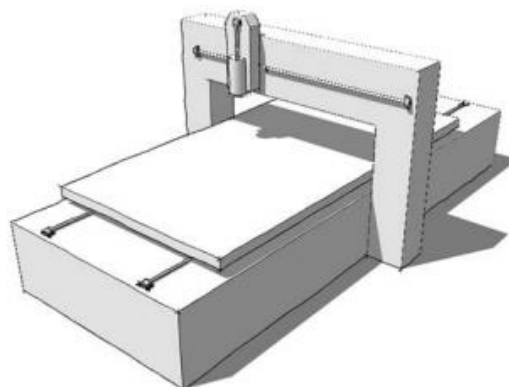
Pateiktas sąrašas apima plačią gaminių gamą, kurie reikalauja įvairaus tikslumo mechaninio apdirbimo. Pavyzdžiui, dekoratyvinės detalės nereikalauja praktiškai jokio tikslumo, nes gaminant tokias detales svarbiausia išgauti geometrinę formą. Laikikliai ir profiliai reikalauja didelio tikslumo, nes dideli geometriniai nuokrypiai sąlygotų netikslų surinkimą bei neabejotinas matmenų nuokrypas. Norint pagaminti tikslias korpuso detales, reikia standžių staklių. Staklių standumas išgaunamas pagal teorinius patarimus. Staklės turėtų būti uždaro kontūro.

Pasirinktiems gaminiams gaminti pakanka trijų (x,y,z) ašių CNC staklių. Tekinimo operacijos atliekamos nebus, todėl su paprastėja įrenginio konstrukcija bei eksploatacija. Kiekviena ašis bus valdoma atskiro valdiklio bei varoma žingsninio variklio. Staklėse bus iš viso trys žingsniniai varikliai. Svarbus sprendimas yra X ašies tipo pasirinkimas. Rinkoje plačiai paplitusi X ašis, kuomet kreipiančiosios yra tirtinamos staklių korpuso išorėje (19 paveikslas). Toks konstrukcinis sprendimas suteikia staklėms standumo bei tuo pačiu tikslumo, tačiau tokių staklių

detalių kaina yra didesnė. Nusprendėme pasirinkti gan inovatorišką sprendimą, kuomet X ašis juda Y ašies atžvilgiu (Y ir Z ašys yra stacionarios). Toks sprendimas praktiškai visada sutinkamas mažų apkrovų CNC tipo įrenginiuose, pavyzdžiui 3D spausdintuvuose arba pramoninėse CNC staklėse. Mes darome prielaidą, kad tokia konstrukcija pasiteisins, žinant, kad apdirbsime lengvai apdirbama medžiagą – techninį plastiką. Literatūros apžvalgoje susipažinome su tokio plastiko mechaninėmis savybėmis bei apdirbimo ypatumais.



20. pav. Staklių eskizas, kai X ašis stacionari [9].



21. pav. Staklių eskizas, kai X ašis mobili [9].

Amerikiečių autorius Alain Albert savo knygoje „Understanding CNC Routers“ (liet. Susipažinimas su Programinėms CNC staklėms), pateikė štai tokius staklių su stacionaria X ašimi bei mobilia X ašimi palyginimus bei pastebėjimus [5];

Staklės su stacionaria X ašimi:

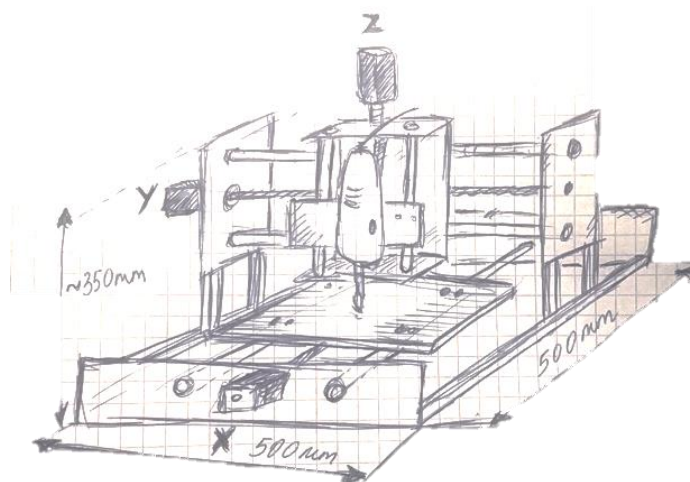
- Reikalingi du žingsniniai varikliai bei du trapeciniai sraigtai norint pajudinti Y-Z ašį. Staklėse iš viso montuojami 4 žingsniniai varikliai;
- Šio tipo staklių darbinis plotas yra dvigubai mažesnis už staklių su mobilia X ašimi;
- Galima apdirbti didelio svorio detales;
- Nepamainomos, kai apdirbamas akmuo ar plienas.

Staklės su mobilia X ašimi:

- Trys žingsniniai varikliai, po vieną kiekvienai ašiai;
- Paprastesnis valdymas bei lengvesnis kalibravimas.

Įvertinus abiejų koncepcijų plusus ir minusus, nuspręsta kurti stakles pagal koncepciją, kai X ašis yra mobili. Mūsų atveju apdirbsime lengvą medžiagą (plastiką), todėl mums

staklių savybė atlaikyti sunkias detales yra neaktuali. Taip pat tokios konstrukcijos staklės bus ženkliai pigesnės bei lengviau surenkamos ir kalibruojamos dėl mažesnio skaičiaus žingsninių variklių ir mechaninių komponentų. Staklių užimamas plotas mums neaktualus, nes tai bus prototipas ir darbinė eksperimentinė erdvė yra neribojama. Atsižvelgus į išvardintus pastebėjimus, nupiešiamas staklių eskizas (22 paveikslas), kurio pagrindu bus kuriamas trimatis modelis.



22. pav. Staklių eskizas

CNC staklės bus kuriamos kaip prototipas, kuris bus naudojamas mokymosi bei bandymų tikslams, paranku konstruoti nedidelio perimetro stakles. Pasirinktas 500x500 mm staklių gabaritas, kurių darbinis plotas turėtų būti apie 200x300 mm. Tokių staklių turėtų pakakti gaminant mažagabarites detales, be to, nedidės staklės bus standesnės naudojant mažo diametro kreipiančiąsias bei 20 mm skerspjūvio aliuminio profilius.

Kalbant apie aliuminio profilius, jie bus naudojami konstrukcijoje kaip rėmo elementai. Ekstruzinio aliuminio profilio konstrukcija yra numatyta su grioveliais, kurie gali būti naudojami kartu su jungiamaisiais elementais ir taip pat gali atlikti daug papildomų funkcijų. Lengvi aliuminio profiliai yra su optimizuotu skerspjūviu, apvalūs profiliai bei profiliai su lygiais šoniniais paviršiais, jungtys, galinčios išlaikyti dideles apkrovas, su itin tvirtomis tarpinėmis bei didelėmis centrinėmis angomis, kad profilių konstrukcijos būtų pajėgios išlaikyti dideles statiškas ir dinamiškas apkrovas (23 paveikslas).



23. pav. Naudojami aliuminio konstrukciniai profiliai [2].

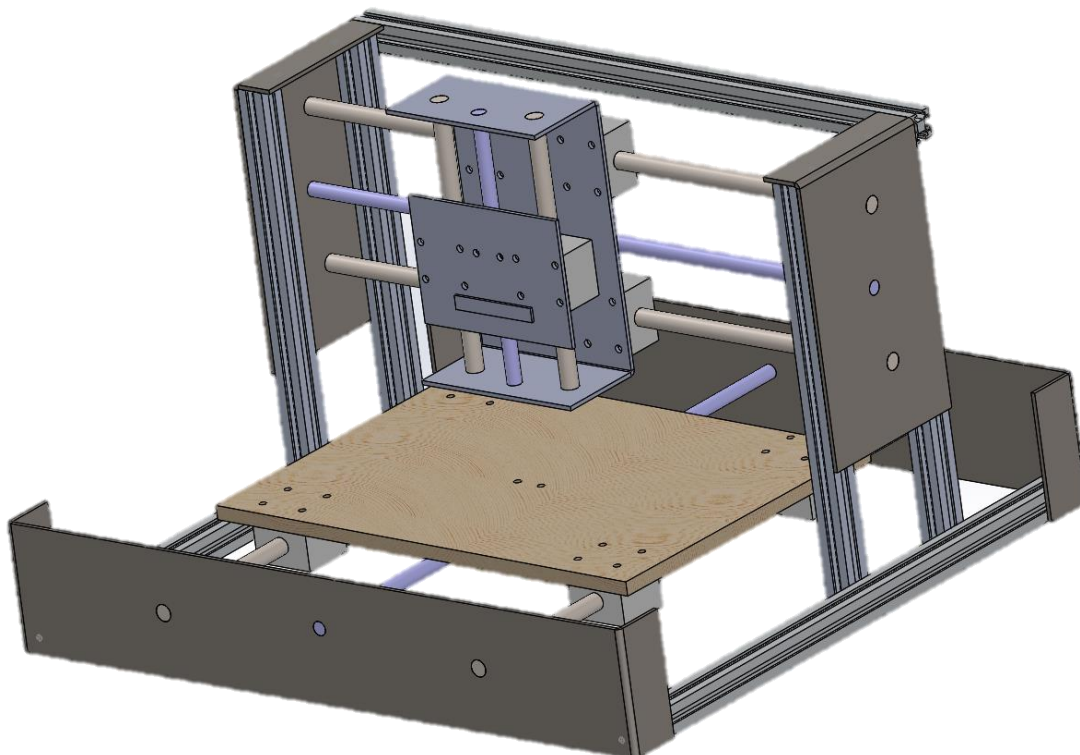
Taigi, projekto konceptualizavimo stadijoje buvo apžvelgtos pagrindinės CNC staklių projektavimo gairės. Priimti sprendimai dėl staklių darbo pobūdžio bei reikalingo staklių standumo. Nuspręsta, nebūsiant didelėms dinaminėms apkrovoms apdirbant plastiką, staklių konstrukcija bus pigesnė, nes pasirinkta konstrukcija su mobilia X ašimi. Prototipinės staklės gamins mažų gabaritų detales (laikiklius, konstrukcinius sujungimus ir t.t.), todėl pasirinkti ergonomiškai staklių darbinio ploto matmenys (200x300 mm). Nutarta, kad staklių konstrukcija bus sudaryti iš aliuminio profilių, nes jie yra lengvi, patvarūs bei tiksliai surenkami. Taip pat bus naudojami plieno lakštai, kurie suteiks standumo potencialiems įtempių koncentratoriams.

2.2. Supaprastinto modelio pastūmų tyrimas BEM

Pasitelkus programinę įrangą „SolidWorks 2016“ su papildiniu „Simulation“ galima vykdyti įvairias modeliavimo ir skaičiavimo užduotis. Modeliuojami tūriniai, kevaliniai, strypiniai baigtiniai elementai, rėminės konstrukcijos, santvaros, plonasieniai objektai (pavyzdžiui, talpyklos), tuo pačiu ir bet kokios sudėtingos geometrinės formos mechaninių sistemų elementai. Įvertinus objektų pradinės varžos charakteristikos, išsprendus įvairaus sudėtingumo kontaktinius uždavinius, nustačius pavojingumo zonas, optimizavus konstrukcijas, galima sumodeliuoti varžtines, kaištines bei virinines jungtis. Taip pat, galima įvertinti fizinį netiesiškumą, nuovargį. Turint projekto koncepciją bei apibrėžtas pagrindines konstrukcines gaires, pasitelkus šią programinę įrangą, galima sumodeliuoti trimatį objekto modelį ir baigtinių elementų metodu išanalizuoti jo stiprumo charakteristikas.

Supaprastinant geometrinį modelį paliekami tik pagrindiniai konstrukciniai elementai. Taip mes mažiau apkrausime kompiuterinę programą bei galima išvengsime modelio neišsprendžiamumo. Svarbu kiekvienam modelio elementui suteikti tikslias medžiagų savybes, kad

modelis bei rezultatai atitiktų realybę. Kuriamas supaprastintas staklių modelis (Pav. 12). Jį sudaro: aliuminio profiliai, lenkti plieno lakštai, supaprastinti linijiniai guoliai, kreipiančiosios bei supaprastintas trapecinis sraigtas, X, Y bei Z ašių laikikliai. Akivaizdu, kad buvo atsisakyta nereikalingų tokiam modeliui elementų, kaip kad žingsniniai varikliai, movos, laikikliai. Daroma prielaida, kad jie ženklios įtakos mechanizmo stiprumui neturės

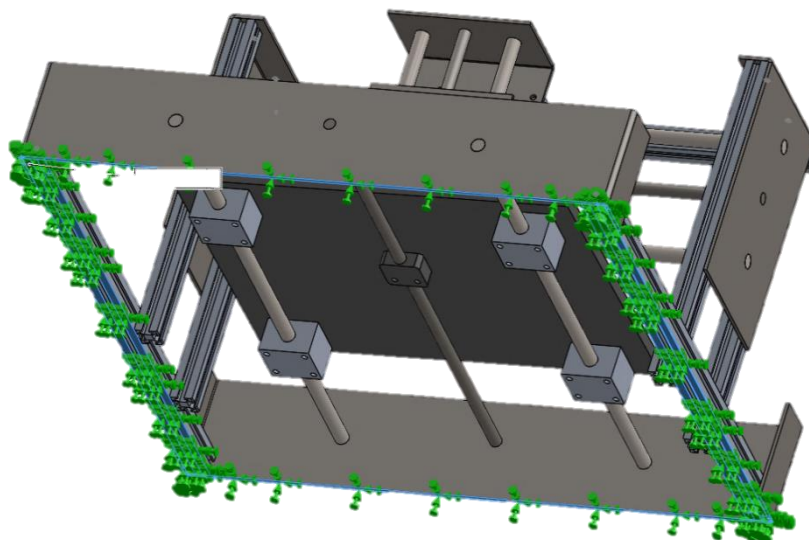


24. pav. Supaprastintas modelis

Supaprastintame modelyje atsisakyta frezos įrankio, vietoje to, palikta erdvė, prie kurios tvirtinsis freza ir ją veiks perduota jėga. Norint patikrinti ar modelis tinkamai veikia jį testuojame apraudami Z ašies plokštumą 600 Niutonų jėga. Tokia jėga pasirinkta tikintis, kad ji bus pakankama sąlygoti įlinkius bei atitiks galimus tikrųjų jėgų veikimo vertes. Tikrosios jėgos bus paskaičiuotos pagal teorines formules vėlesnėje tiriamojo darbo eigoje.

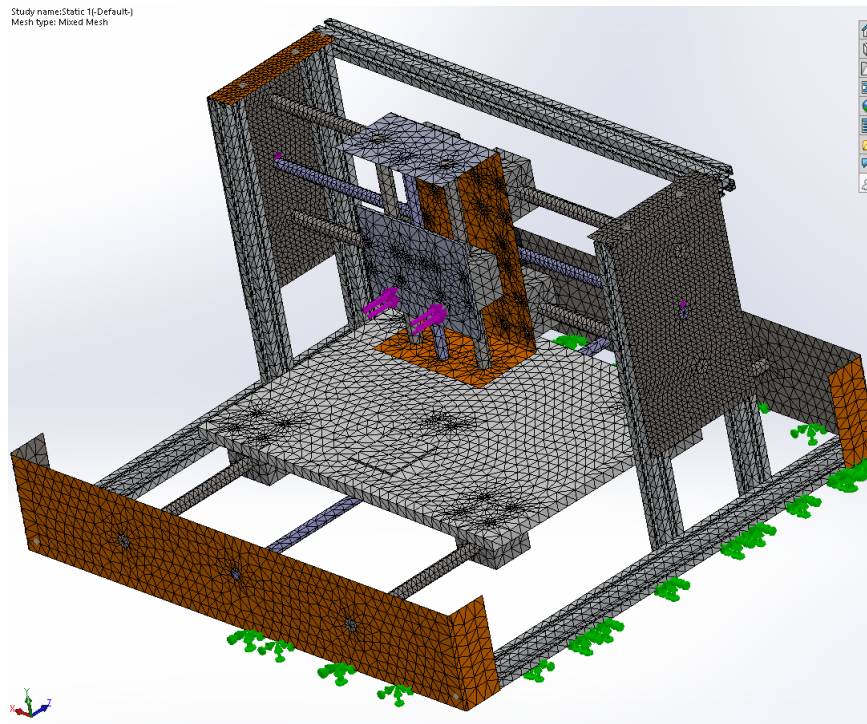
SolidWorks 2016 aplinkoje, naudojantis Simulation papildiniu, nusakomas CNC staklių modelis bei jį jungiantys ryšiai. Pirmiausia, įtvirtinamas staklių pagrindas, kuris bus stacionarus. Sekantis žingsnis yra modelio apbrėžimas, kad nei iena detalė negalėtų persikeisti su kita (ang. No Penetration). (pav. 13). Tai mums leis gauti realius rezultatus. Svarbu tinkamai

parinkti kiekvieno staklių elemento medžiagas. Konstrukciniai plieno lakštai yra pagaminti iš AISI 304 markės nerūdijančio plieno, pasižyminčio geromis stipruminėmis savybėmis bei tuo pačiu plastiškumu. Guoliai pagaminti iš 2xxx serijos aliuminio. Aliuminio profiliai, iš 6xxx serijos aliuminio. Plastikinės detalės pagamintos iš poliacetalio.



25. pav. Staklių įtvirtinimas Solidworks Simulation aplinkoje

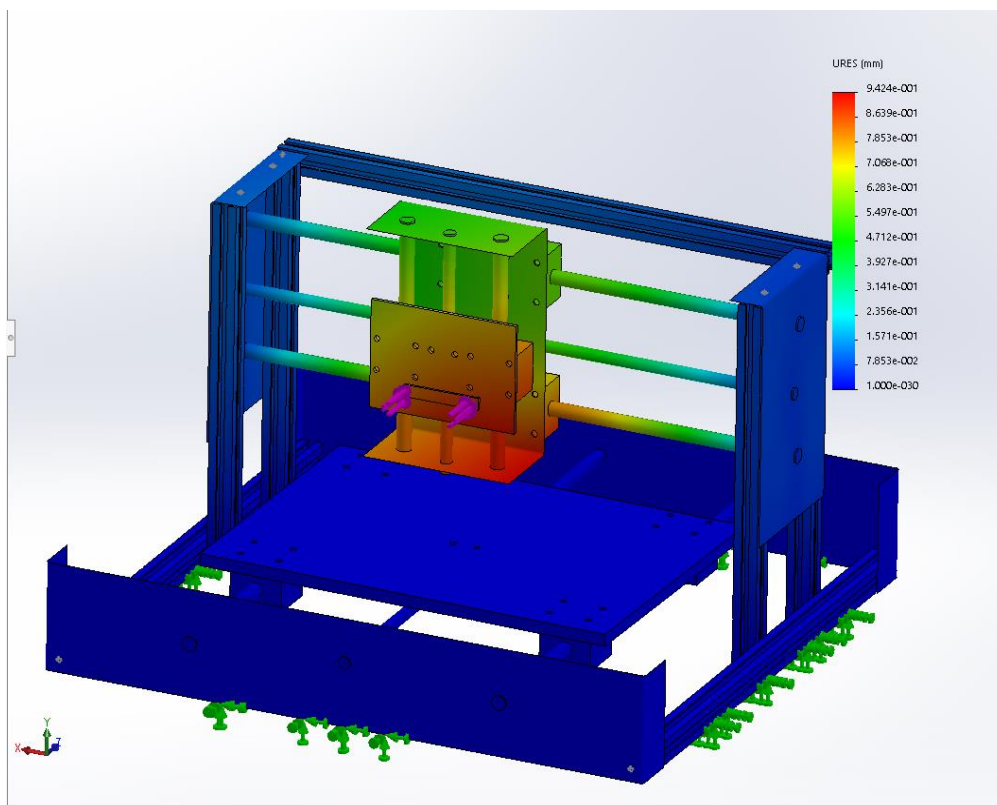
Kuriamas baigtinių elementų tinklelis. Baigtinių elementų tinklelis pasirenkamas stambus ten, kur neveiks jokios jėgos ir sutankintas ten, kur galime tikėtis įlinkių bei įtempių – kreipiančiosiose, trapeciniuose sraigtuose, guoliuose ir t.t. Vėliau bus bandoma manipuluoti tinkleliu siekiant rasti kuo tikslesnius modeliavimo rezultatus. 600 Niutonų jėga uždėta remiantis Vincent A. Balogun bei Tunde C. Akintayo moksliniu straipsniu Design of a Keypad Operated CNC Drilling Router (2015 m.) [4], kuriame autoriai paskaičiuoja 890 Niutonų jėgą savo staklėse. Tiesa, moksliniame straipsnyje minimos staklės frezuoja aliuminį, o mūsų staklės frezuos lengviau apdirbamą poliacetalį, todėl baigtiniais elementais pagrįstam bandymui ėmėme mažesnę – 600 N jėgą.



26. pav. Baigtinių elementų tinklelis

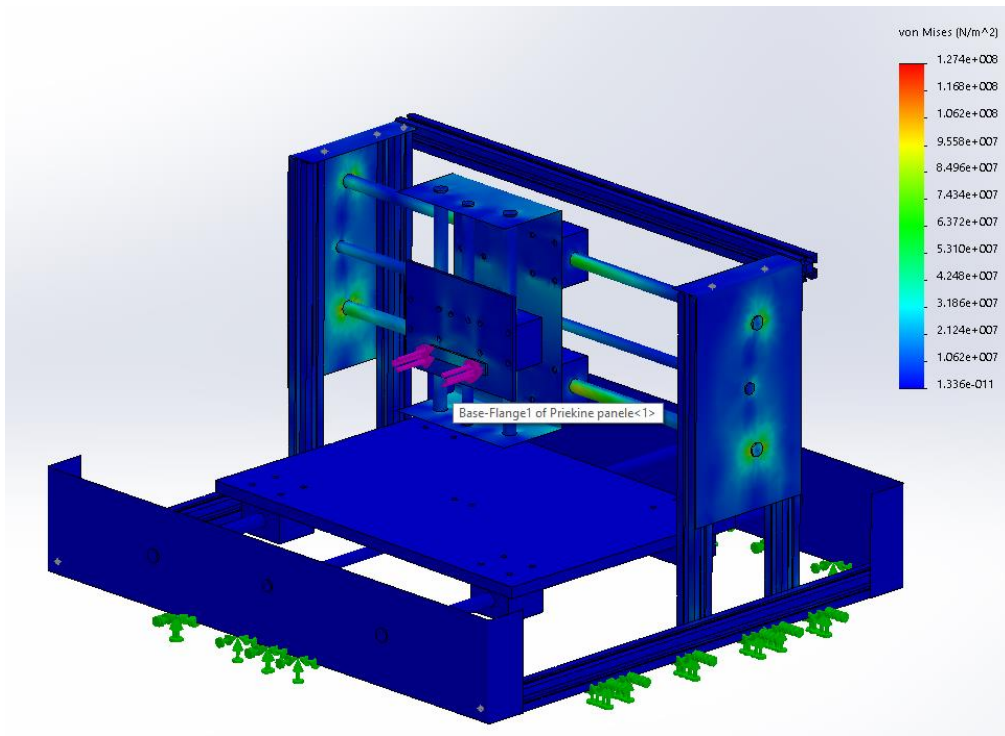
Solidworks programa susitvarkė su patikėta užduotimi ir išsprendė modelį. Mus dominantys rezultatai yra

Poslinkiai (displacement), mizoso įtempiai (von misses stress) bei deformacijos įlinkiai (strain). Matome, kad konstrukcijos maksimalus įlinkis buvo beveik 1mm, turint omenyje, kad reali konstrukcija bus standesnė, mus tokie įtempiai tenkina. Didžiausi poslinkiai susidarė apatinėje Z ašies dalyje. Svarbu ištirti modelį įvairiuose pozicijose, taip mes galėsime susidaryti tvirtesnę nuomonę apie staklių konstrukciją.

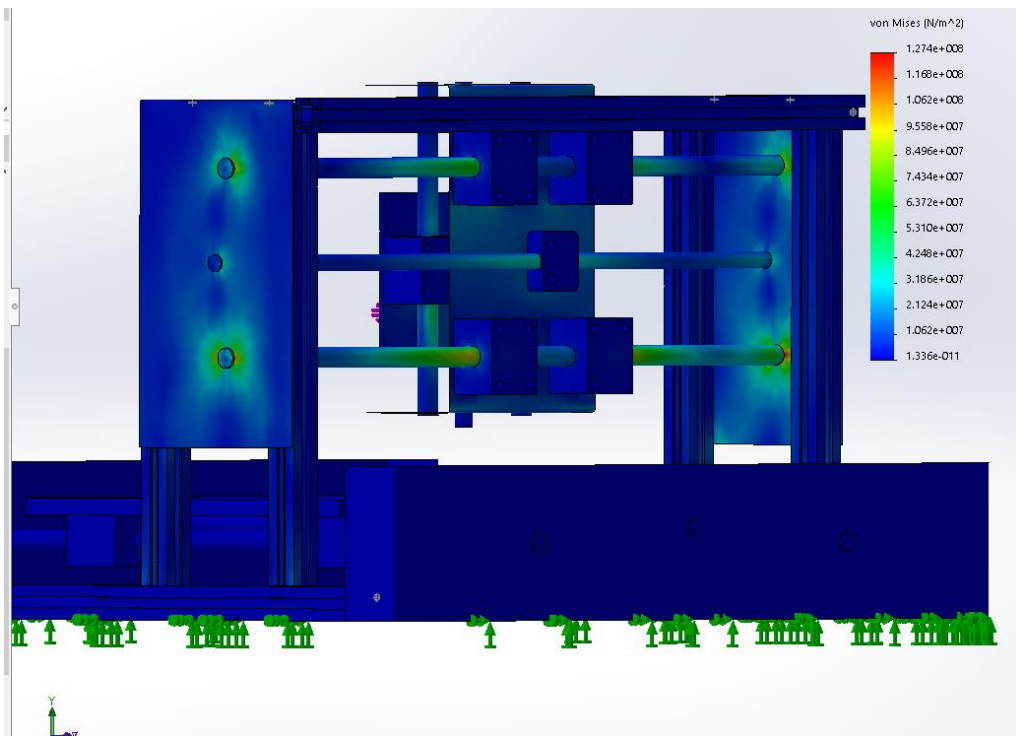


27. pav. Poslinkiai

Įtempių diagrama parodo, kurios staklės vietos yra įtempių koncentratoriai. Šio modeliavimo rezultatai parodė, kad įtempiai labiausiai kaupiasi Y ašies plokštėse (kreipiančiųjų laikikliuose), kreipiančiosiose bei linijiniuose guoliuose. Maksimalus išmatuotas įtempis - 127 MPa. Jis susikaupė nerūdijančio plieno plokštės ir kreipiančiosios sąlyčio paviršiuje. Tiesa, šis įtempis yra dukart mažesnis už AISI 304 plieno takumo ribą (285 MPa), todėl įtempiai yra nepavojingi.

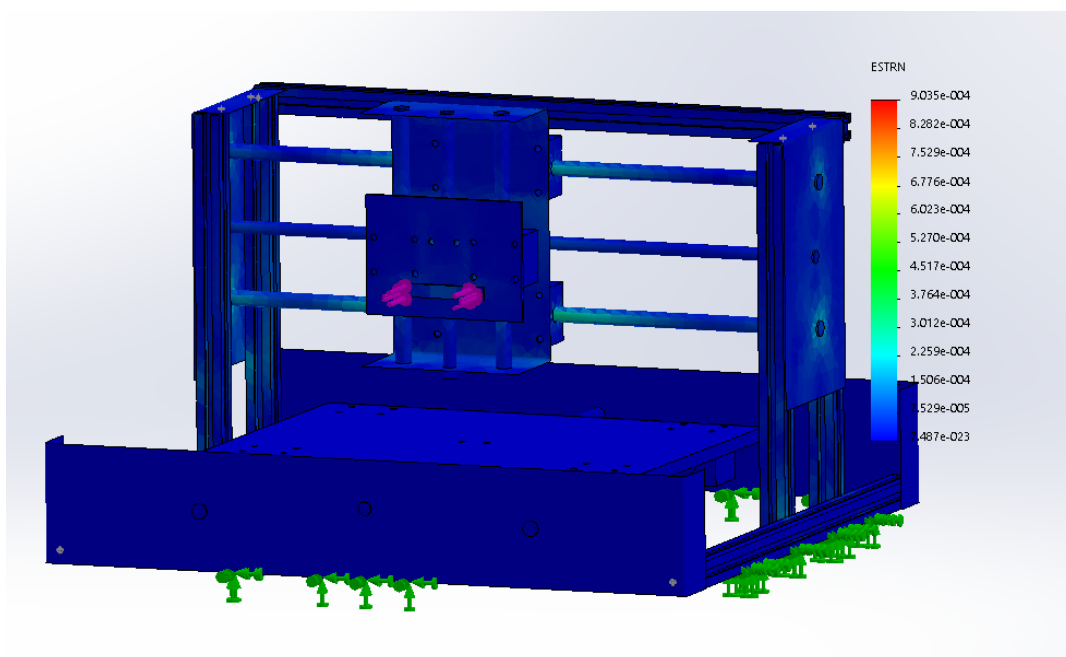


28. pav. Įtampiai



29. pav. Įtempiai

Taip pat gauti deformacijų rezultatai. Gautos labai mažos deformacijų reikšmės, todėl deformacijos yra tampriosios.



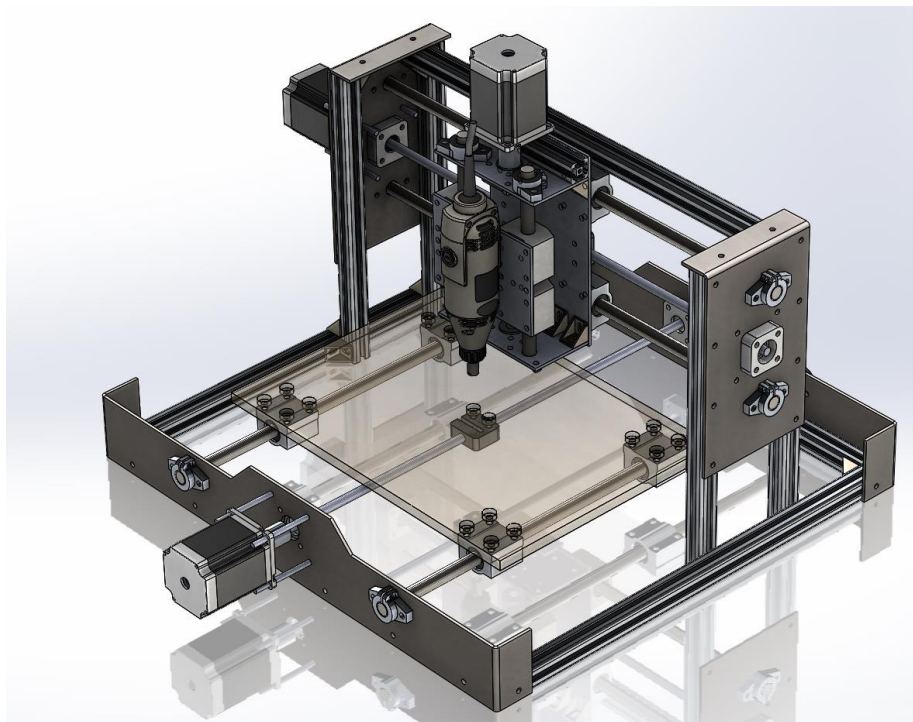
30. pav. Deformcijos

Apibendrinant supaprastinto modelio analizę baigtinių elementų metodu, galima teigti, kad pirmasis testas buvo vykęs ir nedidelės matuotų dydžių reikšmės leidžia detalizuoti staklių modelį sekančiame projekto etape. Žinoma, analizės vienoje pozicijoje neužtenka, norint priėti argumentuotų išvadų, todėl planuojamas didesnės apimties tyrimas, kuomet matuosime įlinkius bei įtempius aštuoniuose pozicijose veikiant paskaičiuotoms teorinėms apkrovomis. Taip pat planuojamas modelio detalizavimas bei medžiagų mechaninių charakteristikų pateikimas lentelėse.

2.3. Modelio detalizavimas bei elementų parinkimas

Konceptualizavus bei ištestavus supaprastintą CNC staklių modelį sekantis projektinės dalies etapas - detalaus staklių modelio kūrimas bei realaus modelio surinkimas. Šio etapo metu svarbu suprojektuoti pagaminamas įrenginio detales, kurios atitiktų mūsų konstrukcinius reikalavimus bei nenukryptų nuo koncepcinio modelio. Taip pat svarbu parinkti tinkamos galios elektrinius įrenginius, kad būtų užtikrinta sklandi ašių pastūma bei reikiama galia. Reikėtų nepamiršti ir mechaninių komponentų, kaip kad guoliai bei movos svarbos. Detalaus modelio

vizualizacija pateikiama žemiau. Šis modelis pilnai atitinka realų modelį, Solidworks 2014 programinės įrangos dėka galima paskaičiuoti reikiamų komponentų parinktį, staklių svorį (22 kilogramai) bei greitai sudaryti reikiamus gamybinius brėžinius.

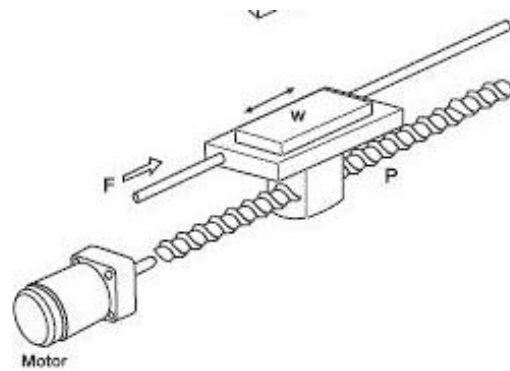


31. pav. Detalaus staklių modelio vizualizacija

Pirmiausia parenkamas variklis. CNC staklių konstrukcijose labiausiai paplitę žingsniniai varikliai. Žingsninis variklis – elektros variklis, kurio ašis apsisuka per daugelį vienodų žingsnių. Toks variklis gali atlikti reikiamą kiekį žingsnių, rotorui užimant norimą padėtį. Žingsninis variklis keičia elektrinį signalą į reikiamą sukimą ar tiesinį judėjimą. Šiose staklėse bus tai pat naudojami žingsniniai varikliai. Reikalingas variklio sukimo momentas paskaičiuojama pagal formulę [9]:

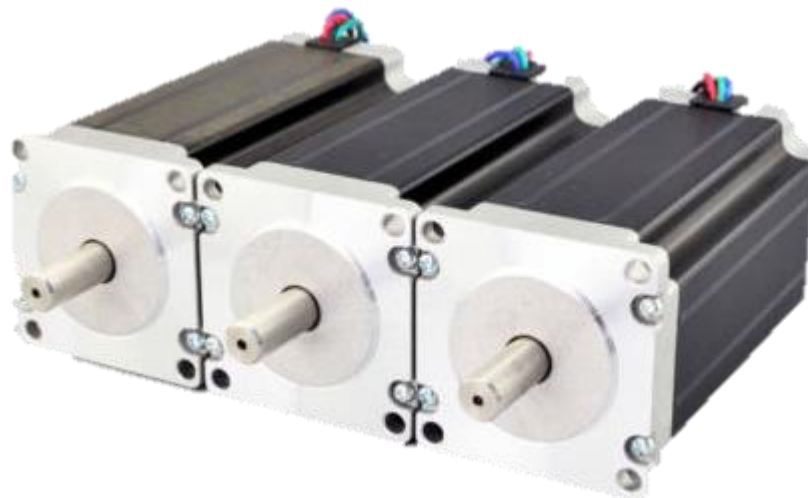
$$T = \frac{1}{2\pi} P \cdot (F + \mu \cdot W); \quad 2.1$$

Čia F – išorinė veikianti jėga, N; P – sraigto flanšo ilgis, m; μ – slydimo trinties koeficientas, paprastai tarp 0.05 ir 0.2, W – padėklo svoris, kg.



32. pav. Pavaros schema [9].

Skaičiavimas imamos tokios vertės: $P = 0,03 \text{ m}$, $F = 500 \text{ N}$, $\mu = 0.2$, $W = 0,5 \text{ kg} = 5 \text{ N}$. Paskaičiavę gauname, kad reikalingas žingsninio sukimo momentas yra $2,4 \text{ Nm}$. Išsirenkamas Nema 23 markės žingsninis dvipolis variklis, generuojantis 3 Nm sukimosi momentą. Skaičiavimai buvo atlikti tik X ašiai, nes ją išjudinti prireiks daugiausiai sukimo momento. Kitoms ašims bus montuojami analogiški varikliai, siekiant išlaikyti mechanizmo homogeniškumą. Vienas toks variklis sveria 1.8 kg , ir gali atlikti 200 žingsnių per vieną apsisukimą, t.y. vienas variklio žingsnis yra 1.8° .



33. pav. Pasirinkti Nema 23 žingsniniai varikliai [13]

2.3.1. *Staklių mašininė nulinė pozicija*

Esant tikslui pasiekti didelį serijinį apdirbimo tikslumą, negana tik turėti aukšto tikslumo mechaninę staklių dalį. Darbinė staklių konstrukcija turi turėti nekintamas judesių ribas su savo centru ir žinoti, skaičiuoti savo poziciją ribų atžvilgiu, bet kuriuo metu. Kompiuterinių staklių valdyme labai svarbus elementas yra staklių mašininė nulinė pozicija ir galimybė grąžinti stakles į tą pačią poziciją, bet kuriuo metu. Ši padėtis tai yra skirtingų staklių ašių ribinei atraminiai taškai nuo kurių yra fiksuojami staklių poslinkiai koordinačių erdvėje, staklių gamintojo, jie gali būti parenkami atitinkamai teigiamoje arba neigiamoje pusėje, bet standartiškai būna teigiamoje pusėje, jeigu žiūrėti koordinačių ašies atžvilgiu. Ši pozicija operatoriaus negali būti keičiama ir grįžimas į šią poziciją yra automatinis, operatoriumi suvedus atitinkamą kodą programinio valdymo įrenginio programoje.

Galimybė turėti nekintamą koordinačių ašies centrą staklėse labai padidina apdirbimo tikslumą, leidžia neprarasti apdirbimo koordinačių pakeitus įrankį, perkrovus stakles, išplečia kitas apdirbimo galimybes ir leidžia smarkiai palengvinti gamybą serijinių detalių, jeigu yra sureguliuojamas nekintantis ruošinių įtvirtinimas.



34. pav. Staklių ribų jutiklis

Ijungus stakles valdymo programa neturi domenų apie esamą poziciją ribų atžvilgiu, todėl tęsiant darbą, be tikslios įrankio padėties gali įvykti avarija. Kiekvieną kartą įjungus stakles iš naujo, būtina nukreipti stakles į ribinius taškus, tai yra nulinę, namų poziciją, nuo kurios galės fiksuoti savo poziciją ir atkurti darbo koordinates, naudotas prieš išjungimą.

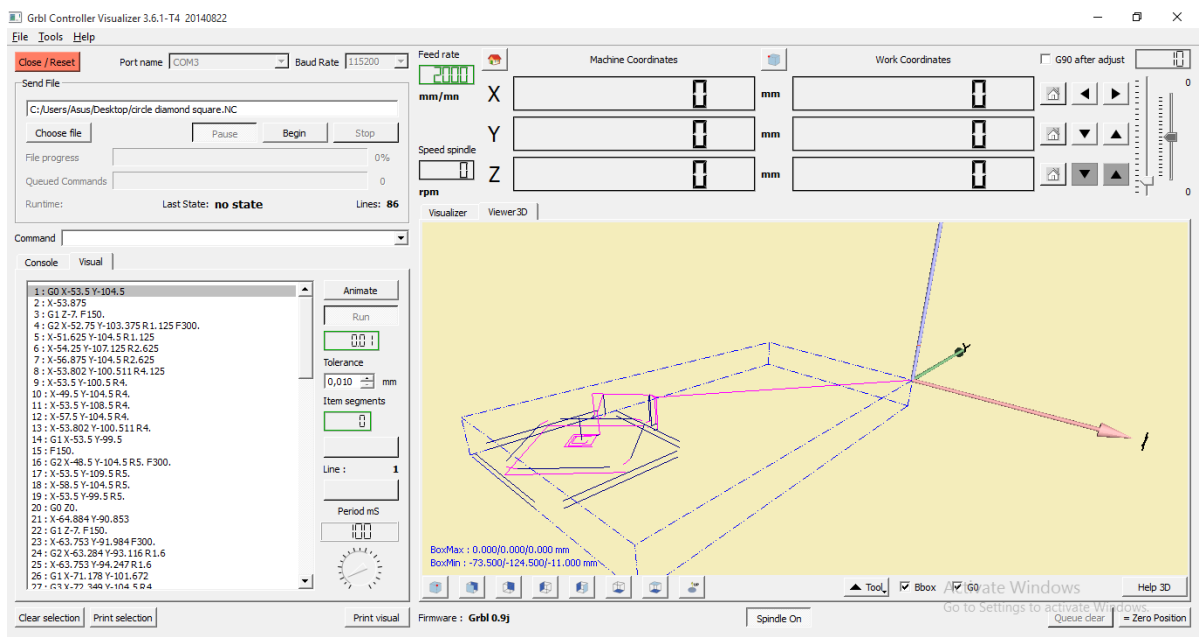
Nulinė pozicija yra ribinė įrankio padėtis, kada judančioji vienos iš trijų ašių staklių dalis atsiremia į mechaninį jungtuką, kuris paduoda signalą į staklių mikrovaldiklį ir sustabdo judesį toje pozicijoje ir koordinatinė pozicija nusistato į nulį. Tai atliekama su visomis ašimis atskirai. Visų ašių automatinis grįžimas į nulius, tai yra judėjimas link mechaninių atramų yra užprogramuotas į teigiamą pusę koordinačių ašies atžvilgiu. Pirmoji savo grįžimą pradeda Z ašis, kadangi judėdama teigiama linkme įrankis yra iškeliamas į aukščiausią tašką ir taip yra išvengiama susidūrimo su detale ar įvirtinimo įtaisais. Tik po to grįžimo į nulius programą atlieka X ir Y ašyse.

2.3.2. Valdymas

Sukonstruoto staklių prototipo valdymas atliekamas naudojant GRBL platforma. Ši cnc valdymo platforma yra nemokama ir laisvai prieinama visiems konstravimo entuziastams. Ji pritaikyta dirbti su Arduino Atmega 328 mikrovaldikliais, kuri per USB jungtį iš kompiuterio perduoda judėjimo komandas žingsninių variklių valdikliams. Pagrindinė GRBL programa, kurios paskirtis yra siųsti signalus tiksliai ir sinchroniškai į stakles, yra parašyta C++ sintakse, kurią vartotojas gali pasikeisti pagal savo nuožiūrą, jeigu jam nepakanka jau parašytos programos galimybių. Originalioji GRBL programa, jau daugelio vartotojų išbandyta ant įvairių CAM įrenginių, leidžia lengvai konfiguruoti variklių pagreitį, žingsnį, kryptį, nulinės pozicijos nustatymą, palaiko daugelį reikalingų G kodo funkcijų. Jos pateiktos žemiau:

- G38.3, G38.4, G38.5;
- G40;
- G61;
- G91.1;
- G38.2;
- G43.1, G49;
- G0, G1;
- G2, G3;
- G4;
- G10 L2, G10 L20;

- G17, G18, G19;
- G20, G21;
- G28, G30;
- G28.1, G30.1;
- G53;
- G54, G55, G56, G57, G58, G59;
- G80;
- G90, G91;
- G92;
- G92.1;
- G93, G94;
- M0, M2, M30;
- M3, M4, M5;
- M8, M9.



35. pav. GRBL valdymo programos langas

2.3.3. Savikaina

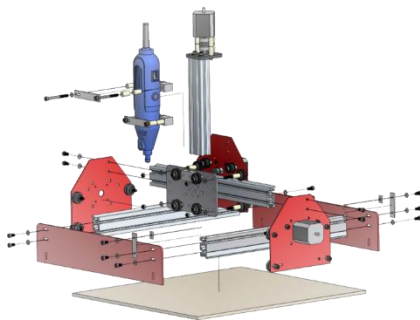
Sukonstruotų staklių prototipo vienas iš didžiausių privalumų ir pranašumų prieš panašius projektus yra jo savikaina, todėl šio darbo autorių nuomone yra būtina trumpai apibendrinti išlaidas šio projekto ir palyginti su panašios paskirties, galimybių, gabaritų ir tikslumo staklių pasiūla pasaulio ir Lietuvos rinkoje. Pabrėžiame, kad panašaus profilio staklių Lietuvoje masinės gamybos nėra.

Pateikiame tris alternatyvas:

1. Kinietiškos trijų ašių graviravimo staklės iš Aliexpress internetinės parduotuvės už 982 eurus, be špindelio, su 400x250x100 mm darbinio plotu, abejotinu tikslumu ir trimis 0,7 Nm žingsniniais varikliais [18].
2. Amerikietiškos trijų ašių graviravimo staklės iš Fablab internetinės parduotuvės už 1356 eurus, su 500 W špindeliu, 350x300x100 mm darbinio plotu, ir trimis 0,7 Nm žingsniniais varikliais [19].
3. Vokiečių įmonės HIGH Z gamybos trijų ašių frezavimo ir graviravimo staklės Lietuvoje parduodamos iš Cncstep tinklapio už 2517 eurų su 1000 W Kress špindeliu 400x300x110 mm, 0,02 mm tikslumo [20].



Kinietiškos staklės iš „Aliexpress“ [18]



Amerikietiškos staklės iš „Fablab“ [19]



Vokiečių įmonės „HIGH Z“ staklės [20]

36. pav. Staklių pasirinkimo alternatyvos

Prieš pradėdant įgyvendinti staklių projektą buvo išsikeltas tikslas išlaidų ribą išlaikyti iki 700 eurų. Žemiau pateiktoje lentelėje galima įsitikinti, kad išsikeltas tikslas buvo įvykdytas ir staklių savikaina vos viršijo 650 eurų. Gautas staklių tikslumas ir savikaina leidžia teigti, kad šis projektas turi gerą kainos ir kokybės santykį, kuris realiai leistų konkuruoti pardavimuose su panašių staklių gamintojais.

3 lentelė. Staklių komponentų savikaina

	Komponentai	Tinklapis/Tiekėjas	Kaina Eurais
1	Žingsniniai varikliai 3 vnt.	Omc-stepperonline	154.03
2	Sraigtinės pavaros	qtecstore	74.76
3	Kreipiančiosios	Dagmita	43.44
4	Linijiniai guoliai 8 vnt	ebay	25.58
5	DB25 - USB kabelis	ACC Acme	4.92
6	Arduino mikrovaldiklis	Lemona	23.10
7	Movos 3 vnt.	Aliexpress	4.18
8	Valdikliai 4 vnt.	Aliexpress	22.83
9	Laidai/Litavimo priemonės	Lemona	10.14
10	Paskirstymo plokštė	Aliexpress	7.94
11	Stop grybas - apsaugai (Siemens)	Elinta	13.32
12	Maitinimo šaltinis	Lemona	8.69
13	Montažiniai bėgeliai/loveliai/tvirtinimo elementai	Elinta	0.29
14	Varžtai, veržlės, poveržlės	Senukai	4.34
15	Kreipiančiosios atraminė mova x10	Aliexpress	13.90
16	4 papildomi linijiniai guoliai	dold-mechatronik.de	44.20
17	Trapecinis sraigtas su 2 veržlėmis	Anjesė	19.09
18	Veržlės laikiklis	KTU dirbtuvės	15.00
19	Aliuminio profiliai	Motedis	54.00
20	Freza DeWalt	Stokker	203.00
		Viso:	651.47

2.3.4 Sūklis

Staklių špindeliu buvo pasirinktas De Walt kompanijos elektrinės frezos variklis. De Walt yra Amerikiečių įmonė gaminanti profesionalius ir industrinius įrankius nuo 1923 metų. Dabar De Walt kompanija pagamina ir prekiauja daugiau nei dviem šimtais įvairių rūšių elektrinių įrankių. Staklėse naudojama freza, kodu D26204K, yra su apsisukimų reguliatoriumi, išoriniu veleno užraktu greitam ir patogiam įrankių keitimui ir su vientisu cilindrinio korpusu, lengvai tvirtinamu su laikikliais.

4 lentelė. Detali špindelio specifikacija [21]

Spyruoklinis griebtuvas	8 mm
Variklio svoris	2,1 kg
Naudojamoji galia	900 W
Sūkių skaičius tuščiaja eiga	16000-27000 aps/min
Maksimalus sūkių skaičius	27000 aps/min
Tvirtinamų įrankių koto diametras	8 mm



37. pav. De Walt elektrinės frezos variklis [21]

3. TIRIAMOJI DALIS

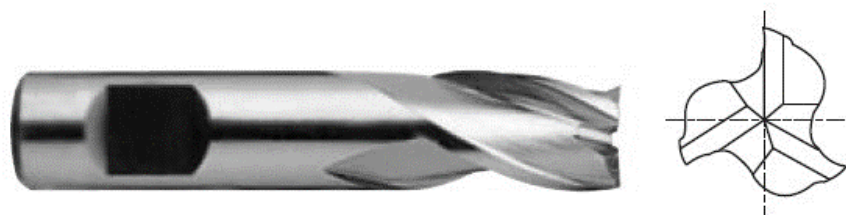
3.1 Įlinkių paskaičiavimas

Remiantis V.Ostaševičiaus ir R.Dundulio knyga, „Technologiniai įrenginiai ir įrankiai“ [1] galima teigti, kad įtempius, kurie deformuoja staklių elementus sukelia:

- Statinės apkrovos, tokios kaip staklių komponentų svoriai;
- Dinaminės apkrovos, tokios kaip judančių ar besisukančių masių inercijos jėgos paleidimo ir stabdymo metu;
- Pjovimo jėgos;
- Terminai įtempiai, kylantys dėl šilumos išsiskiriančios mechaninio apdirbimo metu.

Pjovimo įrankį veikiančios pjovimo jėgos veikia staklių konstrukciją, todėl būtina išnagrinėti jėgas atsirandančias pjovimo proceso metu. Šiame tyrime yra atliekami poliacetalio frezavimo metu atsirandančių pjovimo jėgų skaičiavimai, atliekamas konstrukcijos standumo kompiuterinis statinis stiprumo tyrimas ir išmatuojamos realūs konstrukcijos poslinkiai frezavimo metu. Gauti duomenys sulyginami ir jeigu konstrukcija įvertinama, kaip galinti apdirbti detales, tada atliekamas staklių tikslumo tyrimas.

Frezavimui naudojama galinė freza, pagaminta iš HSSCo8%, su trimis dantukais, 8 mm koteliu, 8 mm diametro ir 43 mm ilgio pjaunamąją dalimi (pav.). Plastikui apdirbti reikalingas visiškai naujas, nenaudotas kitoms medžiagoms apdirbti ir aštrus įrankis. Naudojamas įrankis įsigytas iš Mstools įmonės, pagamintas vokiečių įmonės YG. Pasirinktas 8 mm diametro kotelis, kad būtų tiesiai tvirtinamas prie špindelio laikiklio, kuris irgi yra 8 mm diametro ir taip išvengti mušimo, kuris galėtų atsirasti jeigu būtų naudojamas mažesnio diametro įrankis ir tvirtinamas per papildomą movą. Ilgis įrankio pasirinktas mažas, nes apdirbama detalė nėra gili ir darbo metu išvengiama vibracijų ir mušimo, kuris galėtų atsirasti naudojant ilgą įrankį. Kitus įrankio parametrus galima pamatyti lentelėje.



38. pav. Naudojamas frezavimo įrankis [22]

5 lentelė. Įrankio parametrai [22]

Gamintojas	YG
Aušinimas	Išorinis Aušinimas
Įrankio medžiaga	HSSCo8%
D mm, Diametras	8 mm
I mm, Darbinis Ilgis	11 mm
D2 Įrankio Laikiklis	8 mm
L mm, Bendras Ilgis	43 mm
Plunksnų Z	3 plunksnų
Radiusas	Be Radiuso
Vijos Kampas	30 laipsnių

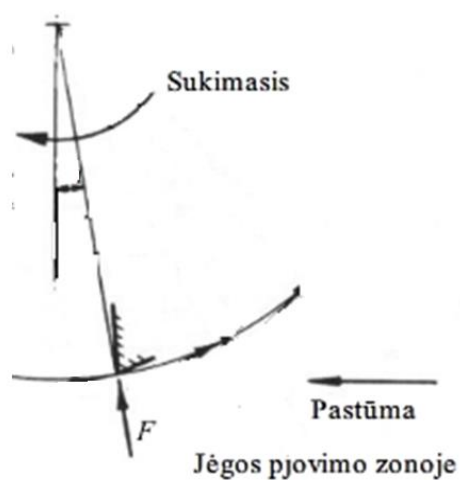
Sukonstruotos staklės išmėginamos devyniais skirtingais darbo režimais. Darbo režimų kintamieji – špindelio apsisukimų skaičius per minutę, įrankio pastūma milimetrais per minutę ir pjovimo gylis, kuris visais režimais yra pasirinktas vienodas, tai yra 4 mm. Apdirbama medžiaga, poliacetalis, yra palanki medžiaga apdirbimui su dideliais špindelio apsisukimų skaičiais, nes ji nekaista, nesivelia ir nesilydo, todėl tyrimo metu bus naudojami aukšti apsisukimų režimai. Pagal medžiagos apdirbimo charakteristikas ir naudojamo špindelio technologines galimybes yra pasirenkami trys apsisukimų režimai – 27000; 20000; 16000 apsisukimai per minutę.

Kompiuteriniu staklių vienas iš didžiausių privalumų – galimybė užduoti įrankiui pastovų ir nekintamą judėjimo greitį – pastūmą. Pastūma išreiškiama milimetrais per minutę ir parenkama pagal medžiagos apdirbimo charakteristikas, naudojamo įrankio parametrus, pjovimo gylį ir žingsniųjų variklių galimybes. Pagal visas sąlygas išreiškiami tokie pastūmos režimai 300; 200; 100 milimetrų per minutę. Suvedus visus parametrus gaunami devyni skirtingi apdirbimo režimai, kurie pavaizduoti 6 lentelėje.

6 lentelė. Pastūmos režimai

N	Apsisukimų skaičius S , aps/min	Pastūma V_f , mm/min	Pjovimo gylis b_p , mm
1	27000	300	1
2	27000	200	1
3	27000	100	1
4	20000	300	1
5	20000	200	1
6	20000	100	1
7	16000	300	1
8	16000	200	1
9	16000	100	1

Frezuojant pagal pastūmą su ruošiniu kontaktuoja dantukai ir frezavimo procesu metu atsiranda jėgos, kurios sukelia reakciją į ruošinį ir į staklių konstrukciją (pav.).



39. pav. Frezavimo procesu metu atsiranda jėgos [4]

Pjovimo įrankį veikiančios pjovimo jėgos veikia staklių komponentus, todėl būtina išnagrinėti pjovimo procesą. Pjovimo jėga apskaičiuojama pagal įrankių gamintojų pateikiamas formules. Skaičiavimai pradami nuo pirmojo režimo, kurio sąlygos:

Pastūma	$V_f = 300 \text{ mm/min}$	[1]
Apsisukimų skaičius	$S = 27000 \text{ aps/min}$	[1]
Dantukų skaičius	$Z = 3$	[1]
Įrankio diametras	$D = 8 \text{ mm}$	[1]
Poliacetalio (POM) kietumas	$k_s = 150 \text{ N/mm}^2$	[1]
Pjaunamas plotis	$a_p = 8 \text{ mm}$	[1]
Pjaunamas gylis	$b_p = 1 \text{ mm}$	[1]

Apskaičiuojama pastūma vienam dančiui f_z [9]:

$$f_z = \frac{V_f}{S \cdot Z} = \frac{300}{27000 \cdot 3} = 0.0037 \text{ mm} \quad 3.1$$

Čia V_f – įrankio pastūma,
 B_p – pjovimo gylis,
 S – apsisukimų skaičius,
 Z – dantukų skaičius.

Toliau randamas pjovimo plotas A [9]:

$$A = a_p \cdot f_z \cdot Z = 8 \cdot 0.0037 \cdot 3 = 0,081 \text{ mm}^2 \quad 3.2$$

Čia a_p – pjovimo plotis,
 Z – dantukų skaičius,
 f_z – pastūma vienam dančiui.

Pjovimo jėga F randama pjovimo ploto ir medžiagos kietumo sandauga [9]:

$$F = A \cdot k_s = 0,081 \cdot 150 = 12,155 \text{ N} \quad 3.3$$

Čia k_s – poliacetalio kietumo koeficientas.

Iš pjovimo jėgos išvedam sukimo momentą M [9]:

$$M = \frac{F \cdot D}{2000} = \frac{12,155 \cdot 8}{2000} = 0,04862 \text{ Nm} \quad 3.4$$

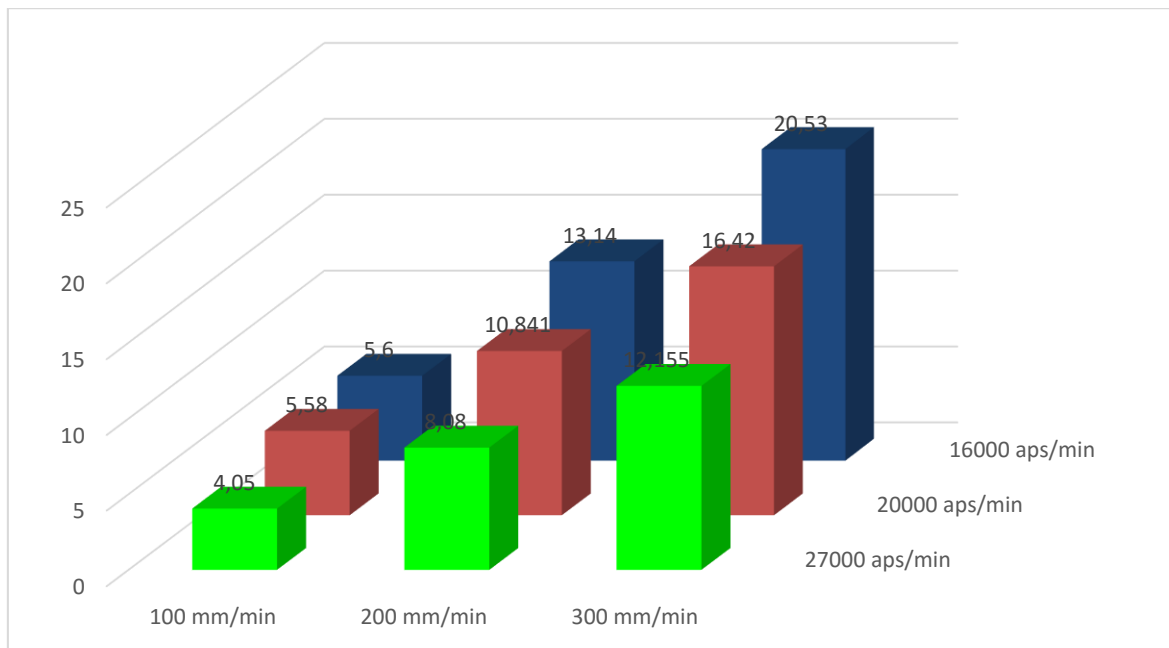
Čia D – įrankio diametras.

Likusių režimų skaičiavimai nevaizduojami, o rezultatai suvedami į lentelę, pateiktą apačioje.

7 lentelė. Likusių režimų skaičiavimai

	$V_f, \text{ mm/min}$	$S, \text{ aps/min}$	$D, \text{ mm}$	Z	$a_p, \text{ mm}$	f_z	$F, \text{ N}$	$M, \text{ Nm}$
1	300	27000	8	3	8	0,0037	12,155	0,05
2	200	27000	8	3	8	0,0025	8,08	0,03
3	100	27000	8	3	8	0,0012	4,05	0,02
4	300	20000	8	3	8	0,005	16,42	0,07
5	200	20000	8	3	8	0,0033	10,841	0,04
6	100	20000	8	3	8	0,00165	5,58	0,02
7	300	16000	8	3	8	0,00625	20,53	0,08
8	200	16000	8	3	8	0,00415	13,14	0,05
9	100	16000	8	3	8	0,002	5,6	0,02

Gautus duomenis pavaizdavus grafike lengva pamatyti, kad trečiuoju apdirbimo režimu su greičiausiomis apsuksomis ir lėčiausia pastūma pjovimo jėga yra mažiausia.



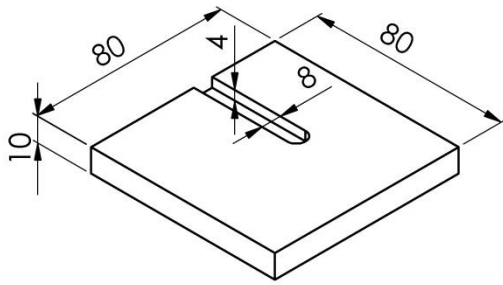
40. pav. Apsisukimų, pastūmos ir pjovimo jėgos priklausomybė

Su turimais pjovimo jėgos rezultatais atliekami kiekvieno režimo poveikio konstrukcijai realūs eksperimentiniai tyrimai ir kompiuterinis modeliavimas.

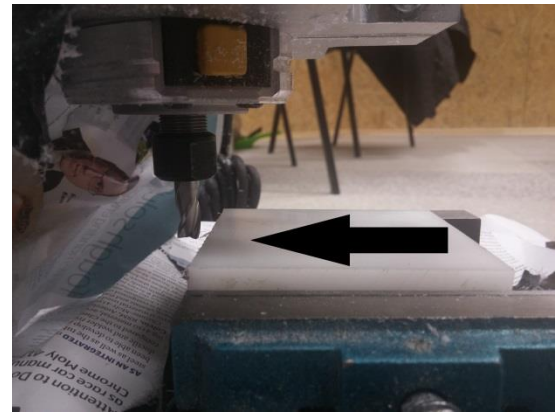
3.2 Poslinkių matavimas laikrodiniu indikatoriumi

Vienas iš tiriamosios dalies tikslų – ištirti frezavimo metu staklėse atsiradusius poslinkius. Staklių konstrukcijos poslinkius sukelia frezos ir ruošinio kontakto metu atsiradusios jėgos, kurios stumia staklių konstrukciją. Šie postūmiai turi tiesioginę įtaką staklių tikslumui, todėl svarbu įvertinti kuriuo režimu poslinkiai yra mažiausi ir tuomet tirti, kokį tikslumą detalių tikslumą galima išgauti dirbant šiomis prototipinėmis staklėmis. Kadangi neįmanoma žinoti, kuriame konstrukcijos taške įlinkiai bus didžiausi, indikatoriumi matuojami du atsitikusiai parinkti taškai dviejuose skirtinguose plokštumose ir gauti rezultatai lyginimi su rezultatais, gautais baigtinių elementų metodu išsprendus modelį.

Poslinkių matavimo eksperimentas vyko frezuojant 80 mm ilgio, 80 mm pločio bei 10 mm ilgio poliacetalio ruošinį, įtvirtinant jį tarp spaustuvo (41 paveikslas). Frezuojamas 4 mm gylio ir 8 mm pločio griovelis, stumiant stalą (Y ašį) į frezą. X ir Z ašis frezavimo metu yra nejudančios – stacionarios (42 paveikslas). Tačiau stumiant ruošinį į frezą neabejotinai atsiranda poslinkiai, kurie išjudina X ir Z ašis. Mūsų tikslas – šiuos poslinkius išmatuoti.



41. pav. Ruošinio eskizas



42. pav. Pastūmos kryptis

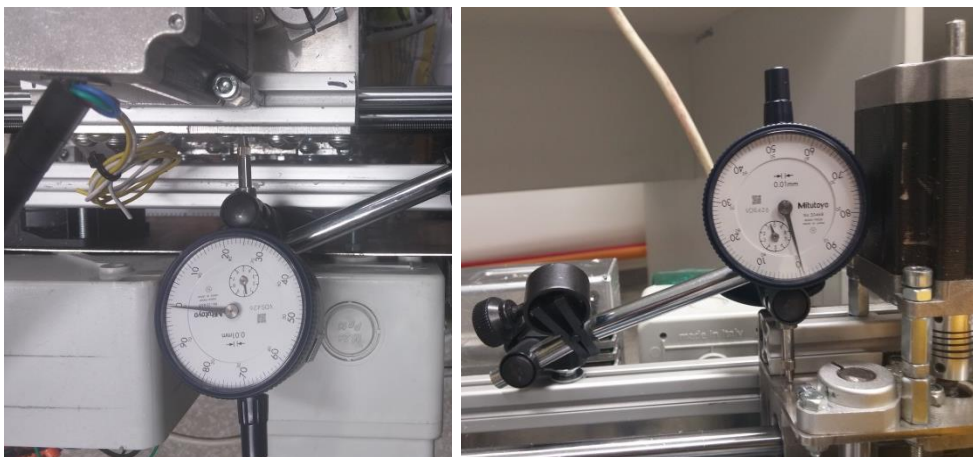
Atsiradę poslinkiai matuojami laikrodiniu japonų gamintojo *Mitutoyo* indikatoriumi 10/58B [Pav. 3]. Indikatoriaus vienos padalos vertė yra 0,01 mm, o pats indikatorius geba išmatuoti iki 10 mm siekiančius geometrinius pokyčius. Šio tipo indikatoriai yra plačiai naudojami medžiagų apdirbimo pramonėje kalibruojant stakles ar pozicijuojant detales. Taip pat indikatorius naudojamas vykdant gaminių kokybės kontrolę. Indikatorius rodmenys yra fiksuojami užrašant rodyklės parodytą maksimalią reikšmę. Siekiant rodmenis įvertinti itin tiksliai, kiekvieno matavimo metu buvo daromi vaizdo įrašai ir juos peržiūrint įvertinama maksimali matavimų reikšmė.



43. pav. Mitutoyo 10/53B indikatorius su stovu.

Frezavimo staklės yra pagamintos iš feromagnetinių medžiagų – aliuminio ir AISI 304 nerūdijančio plieno, todėl tvirtinimas prie korpuso su magnetiniu laikikliu buvo netinkamas.

Pasirinktas sprendimas tvirtinti stakles prie aliuminio profilio su tvirtinimo detalėmis. Lankstus kaip minėta anksčiau, mes nežinome, kur tikėtis didžiausių poslinkių, todėl matavimai vyko atremiant indikatorų statmenai į X ašies ir Z ašies plokštumą [Pav. 5]. Atramos taškai buvo pasirinkti atsitiktinai, tačiau kiekvieno matavimo metu jie išliko toje pačioje vietoje.



45. pav. Indikatorius atremtas statmenai į X ir Z ašį.

Išmatavus devynių režimų metu atsiradusius įlinkius, sudaroma duomenų lentelė [L1]. Duomenys yra naudojami lyginimui su duomenimis, gautais modelį tiriant baigtinių elementų metodu. Pastebėta, kad poslinkiai į Z ašį kinta minimaliai, tačiau yra pastovūs – apie 0,03 mm. Tačiau Poslinkiai į X ašį svyruoja nuo 0.03 mm iki 0.06 mm.

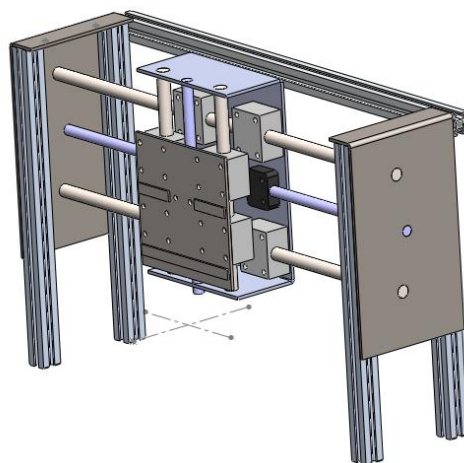
8 lentelė. Poslinkiai

Rėžimos nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X poslinkis, <i>mm</i>	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.06	0.04	0.03
Z poslinkis, <i>mm</i>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

3.3 Poslinkių tyrimas naudojant baigtinių elementų metodą

Poslinkių išmatavimas su laikrodiniu indikatoriumi mums nesuteikė jokių rezultatų, kuriais galėtume remtis vertindami galutinę staklių tikslumą. Indikatoriumi užfiksuoti rezultatai naudojami patikrinti, kiek realūs yra rezultatai, gauti staklių trimatį modelį simuliuojant baigtinių elementų metodu. Eksperimento idėja paprasta – tuose pačiuose laukuose palyginti indikatoriumi išmatuotus poslinkius su poslinkiais, gautais kompiuterinio statinio stiprumo tyrimo metu. Jeigu poslinkiai abiem atvejais sutampa, arba jų vertę skiria maža paklaida, tuomet priimame, kad modeliavimo metu gauti maksimalūs poslinkiai atitinka realybę. Užfiksuotus maksimalius poslinkius vertiname tirdami staklių tikslumą ir pasirinkdami darbinį režimą.

Baigtinių elementų metodu paremtas kompiuterinis statinis stiprumo tyrimas atliekamas naudojant *SolidWorks 2016* programinę įrangą, naudojant papildinį *SolidWorks Simulation*. Prieš atliekant modeliavimą, svarbu tinkamai supaprastinti modelį [Pav. 7]. Supaprastintas modelis leidžia sumažinti elementų skaičių ir taip pagreitinti skaičiavimus. Tiriant X ir Z ašių poslinkius, Y ašis yra neaktuali, todėl ji iš modelio ištrinama. Supaprastinama profilių bei guolių geometrija, atsisakoma tvirtinimo detalių, nes jos pakeičiamos komandomis, jau integruotomis į *SolidWorks Simulation* papildinį. Jėgos konstrukciją veiks vietose, į kurias remsis frezavimo įrankio laikikliai. Pačios frezos ir laikiklių buvo atsisakyta dėl modelio paprastumo. Supaprastinti ir aliuminio profiliai. Jų pozicija bei skerspjūvis leidžia daryti prielaidą, kad poslinkių jie nesąlygos. Keliama hipotezė, kad didžiausias poslinkių kaltininkas – kreipiančiosios.



46. pav. Supaprastintas modelis. Z ašis centre

Prieš skaičiuojant modelio poslinkius baigtinių elementų metodu, reikia atlikti eilę paruošiamųjų darbų. Darbai išrikiuojami eilės tvarka:

1. Modelio supaprastinimas;
2. Medžiagų priskyrimas;
3. Įtvirtinimų bei ryšių apibrėžimas;
4. Veikiančių apkrovų apibrėžimas;
5. Baigtinių elementų tinklelio sukūrimas;
6. Kompiuterinis statinis stiprumo tyrimas bei rezultatai.

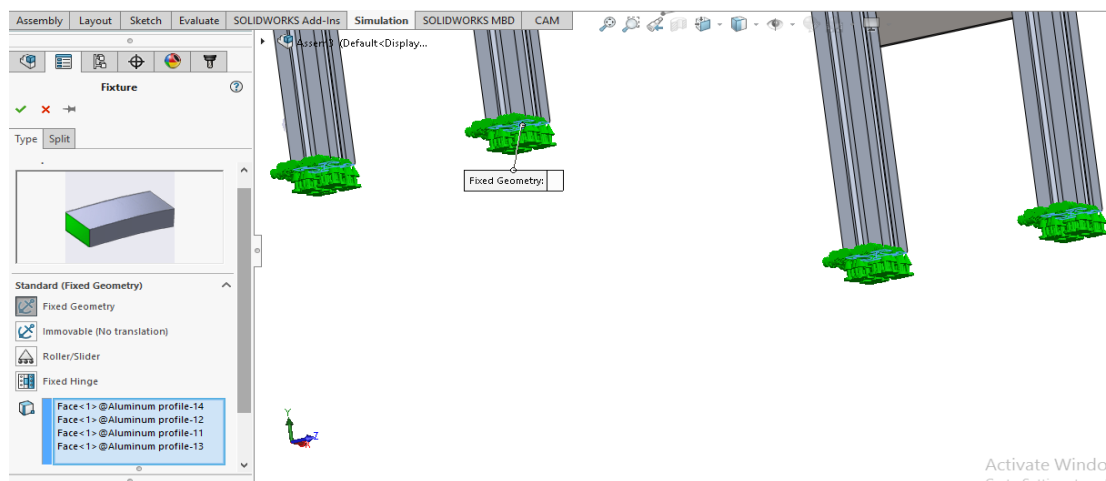
Medžiagų paskyrimas – atsakingas procesas. Netinkamas medžiagos parinkimas gali būti netikslių skaičiavimų priežastimi, nes skirtingos metalo markės turi skirtingas mechanines charakteristikas. *SolidWorks* turi daugybės populiariausių medžiagų duomenų bazę, iš kur ir yra imami duomenys apie medžiagų mechanines charakteristikas mūsų skaičiavimams. *SolidWorks* bendradarbiauju su įmone *Materiality*, kuri yra atsakinga už tikslias medžiagų charakteristikas. Visų detalių medžiagų markės buvo gautos iš tiekėjų perkant detales. Supaprastintas modelis sudarytas iš 4 skirtingo tipo detalių (47 paveikslas). Norint detalei priskirti medžiagą *SolidWorks 2016* aplinkoje, dešiniu pelės klavišu pažymime detalę junginio medyje ir pasirenkame funkciją *Add/Apply Material* ir naviguojame po duomenų bazę kol randame reikalingą medžiagą. Pasirinktų medžiagų sąrašas:

- Aliuminio profiliai (6063 T5 Aliuminio lydinys). Lydinys plačiai paplitęs profilių gamyboje, galimas virinimas.
- Lakštinės detalės (AISI 304 nerūdijantis plienas). Plačiai naudojamas plienas, lengvai valomas, atsparus aplinkos poveikiui.
- Kreipiančiosios (AISI 1045 grūdintas plienas).
- Movos (poliacetalis). Medžiaga dažnai naudojama pavarų, skriemulių gamybai.



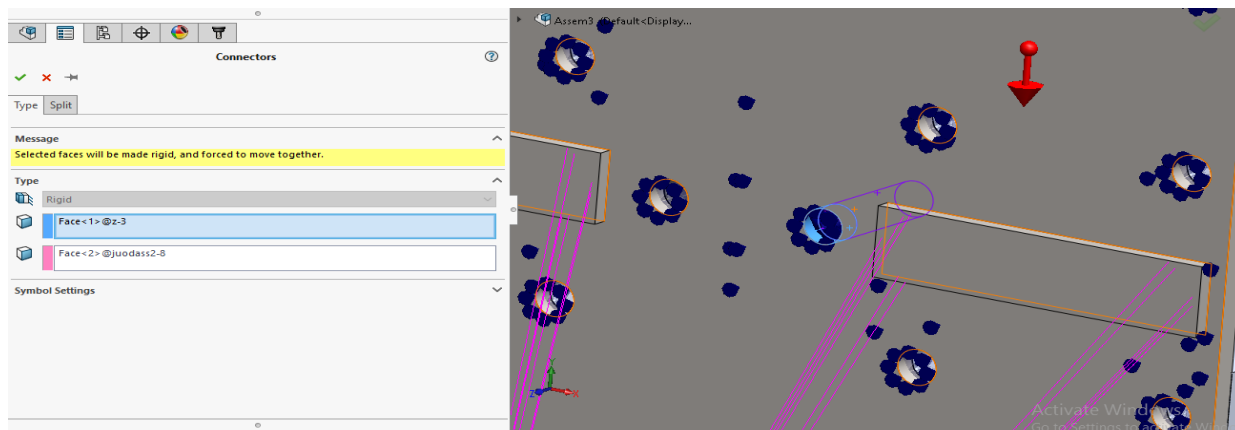
47. pav. Medžiagų sąrašas

Įtvirtinimo bei ryšių apibrėžimas tai žingsnis, kuris turėtų sekti priskyrus detalėms medžiagas. Modelis įtvirtinamas pasirenkant papildinio *SolidWorks Simulation* funkciją *Fixture* -> *Fixed Geometry*. Ši funkcija visiškai įtvirtina pažymėtą paviršių, tačiau leidžia deformuotis detalei (48 paveikslas). Pažymimi keturių vertikaliai pozicijuotų aliuminio profilių apatiniai paviršiai, kurie realioje konstrukcijoje yra pritvirtinti prie Y ašies konstrukcijos varžtais.



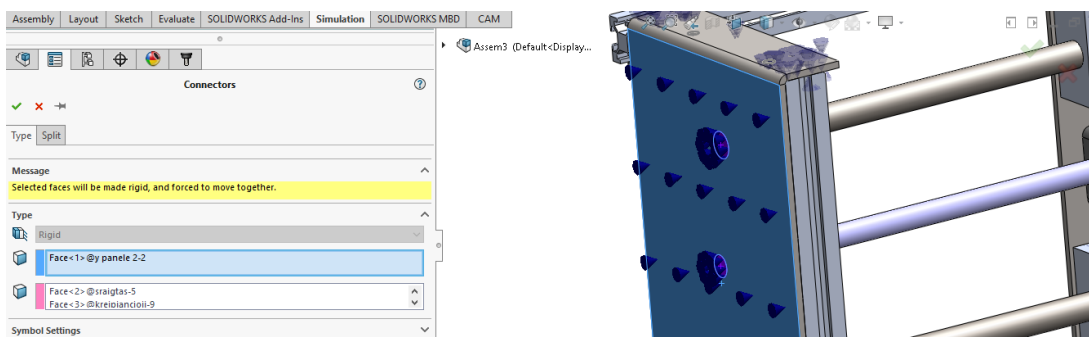
48. pav. Įtvirtinti profiliai

Baigtinių elementų modelis bus neišsprendžiamas, jeigu bus palikta detalių turinčių keletą laisvės laipsnių. Nereikalingi laisvės laipsniai sukurs klaidingą modelio interpretaciją, detalės gali nuslinkti erdvėje taip sukurdamos nelogiškus poslinkius. Norint sudaryti gerą virtualų modelį, rankiniu būdu reikia sužymėti visus mazgus, kurie egzistuoja ir realiame modelyje. T. y., varžtų, guolių, suvirinimo ar kiti tvirtinimo būdai turi būti analogiškai sukurti ir programoje. Realiame modelyje guoliai ir movos prie lakštinių AISI 304 detalių yra tvirtinami varžtais. *SolidWorks* programoje šis įtvirtinimas keičiamas standžiu įtvirtinimu (*Connectors* - > *Rigid Connection*). Komanda sujungia du paviršius, ir nuo šiol jie deformuojasi kartu, t. y. atstumas tarp pažymėtų paviršių visada išlieka toks pat.



49. pav. Standžių ryšių kūrimas

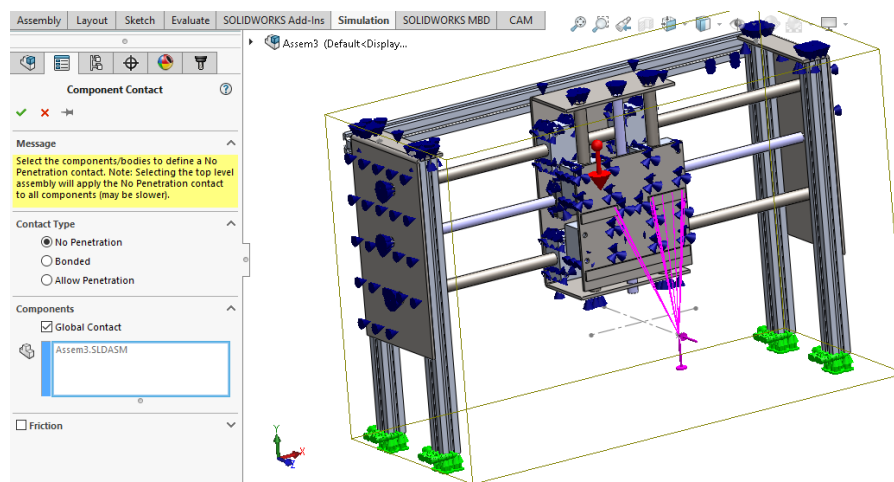
49 paveiksle galima matyti, kad varžtas, jungiantis guolio korpusą su lakštu, yra pakeičiamas standžia jungtimi pažymint guolio ir lakšto skylių paviršius. Nuo šios atstumai tarp visų šių paviršių taškų išliks vienodi. Panašiai apibrėžiamos kreipiančiųjų ir lakštinės detalės jungtis. Laikoma, kad šie du elementai yra sujungti standžiai, t. y., negalimas joks kreipiančiosios judėjimas iš skylės (50 paveikslas).



50. pav. Kreipiančiųjų įtvirtinimas

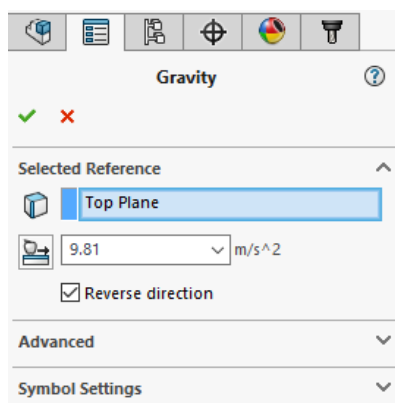
Norint, kad modelyje detalės remtųsi viena į kitą ir taip sukeltų įtempimus ir deformacijas, būtina apibrėžti modelį uždraudžiant prasiskverbimą tarp detalių. Tai daroma naudojant funkciją *Component Contact* -> *No Penetration*. Ši komanda neleidžia detalėms prasiskverbti vienai su kita, tačiau leidžia atsirasti tarpams tarp detalių. Pavyzdžiui, stumiamas plieninis strypas įdėtas į plonasienio aliuminio lakšto skylę pastarąją ištempės iki elipsės formos, bet negalės įsirežti į aliuminį. Nagrinėjamu atveju, pažymimas visas modelis (*Global Contact*), nes modelyje nėra elementų, kurie turėtų prasiskverbti (51 paveikslas). Taip automatiškai sukuriami

ryšiai tarp visų besiliečiančių paviršių. Šios funkcijos vienas iš privalumų yra greitesni skaičiavimai nei naudojant kitus modelio kontaktų apibrėžimo būdus *SolidWorks Simulation* aplinkoje.



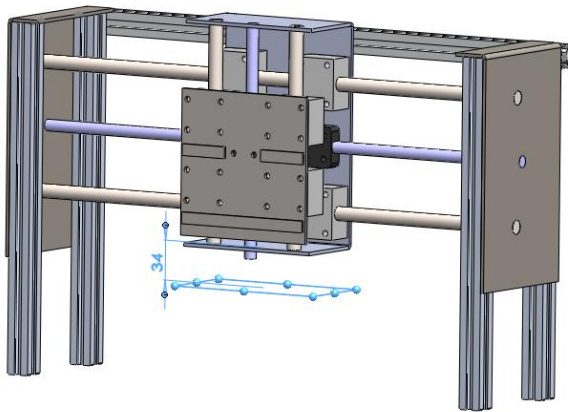
51. pav. Komponentų kontaktų apibrėžimas

Modelį veikiančių apkrovų apibrėžimas yra paskutinis žingsnis prieš kuriant baigtinių elementų tinklą. Pirmiausia, norint pasiekti kuo realesnį rezultatą, uždedama gravitacijos jėga. Tai paprasta procedūra, nes gravitacijos reikšmė ir atskira reikšmė jau yra sukurta *SolidWorks* programoje. Jėga uždedama naudojant funkciją *External Loads* -> *Gravity*. Programa pati automatiškai aptinka masės centrą, todėl vartotojui papildomai žymėti nieko nereikia (52 paveikslas).

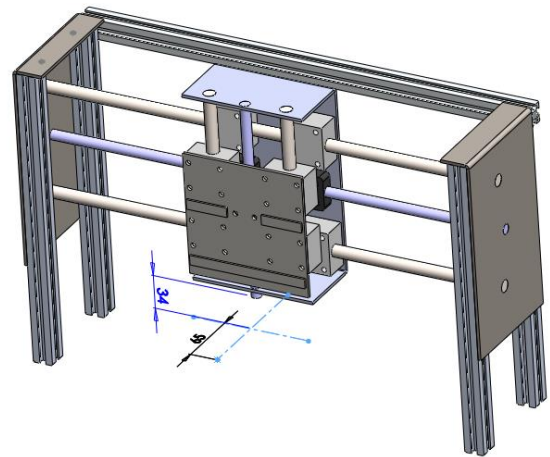


52. pav. Gravitacijos jėga

Šiek tiek sudėtingesnė procedūra yra uždėti jėgas, veikiančias korpusą frezavimo metu. Supaprastintame modelyje atsisakius frezos ir jos laikiklio, jėgą uždėsime nuo naujos koordinatinių sistemos, kurios pradžia yra vietoje, kur frezos peilis liečiasi su ruošiniu. Išmatavus tikruosius atstumus, sukuriama plokštuma, atitolusi 34 milimetrus nuo Z ašies apačios (*Reference Geometry -> Plane*) (Pav. 53 paveikslas). Šioje vietoje yra 4 mm įfrezuotos ruošinio plokštuma. Ant plokštumos atidedamas taškas (*Sketch-> Point*), kuris atitolęs 65 milimetrus nuo Z ašies priekinės lakštinės detalės, prie kurios tvirtinasi frezavimo įrankio laikiklis (54 paveikslas). Sukurtame taške brėžiama nauja koordinatinių sistema (*Reference Geometry -> Coordinate System*), pavadinant ją „Frezos pozicija“. Ši koordinatinių sistema bus atskaitos taškas, nuo kurio bus perduodama jėga į korpusą.



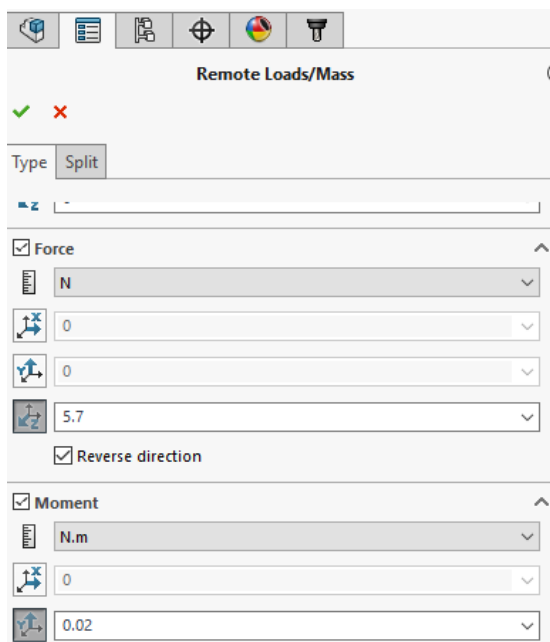
53. pav. Nauja plokštuma



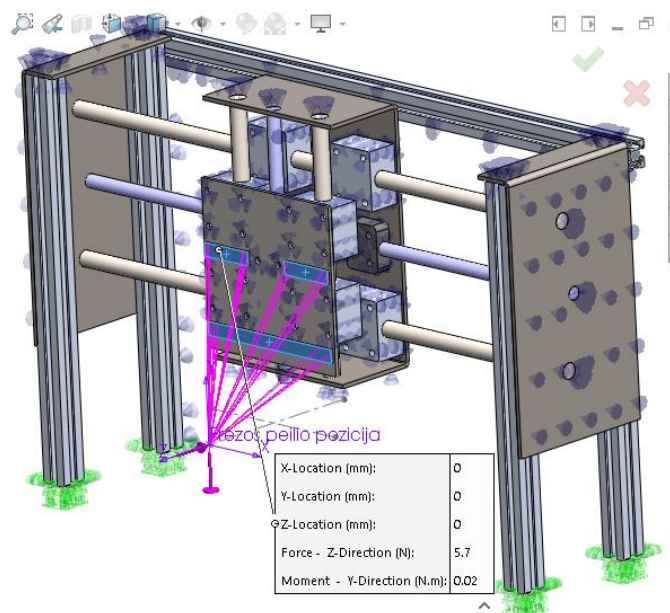
54. pav. Nauja koordinatinių ašis

Sukūrus naują koordinatinių sistemą kuri atkartoja frezos ir ruošinio sąlyčio tašką, ant jos pradinio taško (koordinatės 0,0,0) uždėdamos frezavimo metu atsiradusias jėgas, paskaičiuotos teoriškai pagal formulę (---). Tai atliekama naudojantis *SolidWorks Simulation* papildinio funkcija *External Loads -> Remote Load/Mass*. Ant šio taško uždengtas jėgas pavadiname nuotolinėmis jėgos. Atsiradusiame aktyviajame lauke pasirenkami tokie parametrai: *Type -> Direct Transfer*. Šis pasirinkimas nuotolinei jėgai sukuria petį, ir taip ji yra perduodama į pasirinktą paviršių. Taigi, į sukurtą tašką veikia jėga ir momentas, kurių dydį pasirenkame pagal režimo tipą. Jėgos nuo nuotolinio taško į korpusą persiduos per frezos įrankio laikiklio tvirtinimo paviršius, todėl būtent jie ir yra pažymimi laukelyje. Programai paprašius pasirinkti koordinatinių sistemą, atžymimas pasirinkimas *Global* ir pasirenkama *User Defined (Vartotojo apibrėžta „Frezos Peilio Pozicija“)* koordinatinių sistema. Verta pabrėžti, kad naujos koordinatinių sistemos ašių kryptys sutampa su globalios koordinatinių sistemos. Uždėdama jėga (*Force*), kurios kryptis pažymima tik į Z ašį, nes

šia kryptimi yra stumiamas ruošinys į frežą. Taip pat Y ašies krypti uždedamas frezavimo metu atsiradęs momentas, kuris veikia pagal laikrodžio rodyklę. Tiek momento, tiek jėgos dydis keičiamas priklausomai nuo pasirinkto režimo, todėl bus simuliuojami iš viso devyni skirtingi variantai siekiant išsiaiškinti maksimalius poslinkius kiekvieno režimo metu.



55. pav. Jėgų kryptys

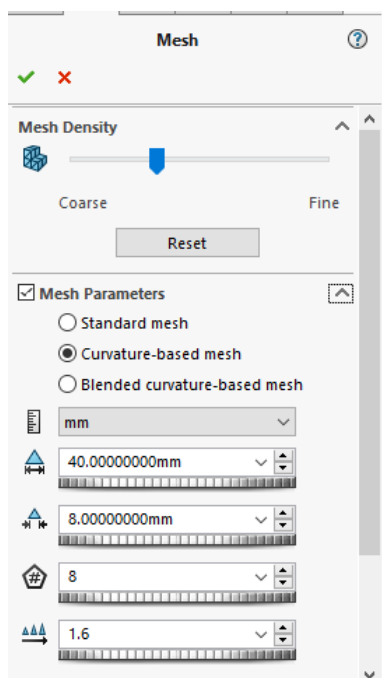


56. pav. Nuotolinė jėga

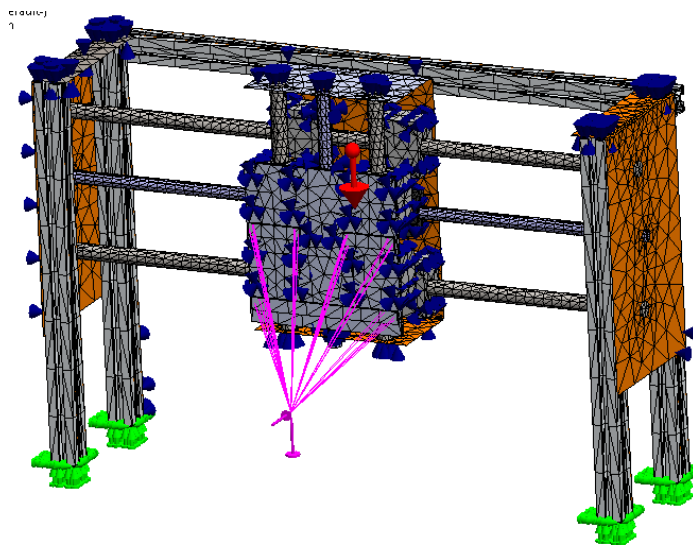
Baigtinių elementų tinklelio kūrimas yra paskutinis žingsnis prieš pradedant kompiuterinį statinį stiprumo tyrimą. Svarbu yra rasti optimalų tinklelį. Šiuo atveju, konstrukcijai esant gana didelių gabaritų ir tiriant šimtąsias milimetro dalis, pasirenkamas gana stambus tinklelis, kuris leis minimizuoti laiką, reikalingą programai atlikti skaičiavimus.

Tinklelio kūrimo langas atidaromas įvykdant komandą *Mesh -> Create Mesh*. Atsidariusiame komandos lange galima pasirinkti įvairius parametrus, kaip kad tinklelio tankį, elemento formą, elemento dydį ir t.t. Tinklelio parametrų (*Mesh Parameters*) laukelyje pasirenkame variantą *Curvature Based Mesh* (Tinklelis pagal formą). Pažymėjus šį pasirinkimą, programa pati sugeneruoja skirtingo dydžio tinklelį, atsižvelgiant į detalių geometriją, tačiau elementai nebus didesni nei vartotojo nurodyti. Pasirinkus variantą *Standard Mesh*, visas modelis būtų suskaidomas į vienodo dydžio elementus, kad šiuo atveju yra netinkama dėl daug detalių kurių dydis ir forma yra skirtinga. Tinklelis gautųsi itin smulkus, nes ploniausia rėmo dalis yra 3 mm storio. Dėl ribotų kompiuterio resursų, tinklelis kuriamas stambesnis nei vidutinio smulkumo. Pav. 16 matyti, kad didžiausias elementas bus 40 mm pločio ir 8 mm ilgio. Iš stambiausių elementų sudaryti aliuminio profiliai, kurie neturėtų sukurti jokių poslinkių. Programa sutankina tinklelį

aplink problemines zonas, pavyzdžiui skyles. Šiuose vietose galime tikėtis didelių įlinkių, įtempių ar deformacijų koncentracijų, todėl gauti rezultatai aplink skyles bus tikslesni dėl tankesnio tinklelio. Kadangi lakštinės detalės buvo sukurtos naudojantis *SolidWorks* funkcija *Sheet Metal*, jos automatiškai yra vertinamos kaip kevalo tipo struktūros. Sukuriamas tinklelis kuris turi 43553 elementus.



57. pav. Tinklelio parametrai

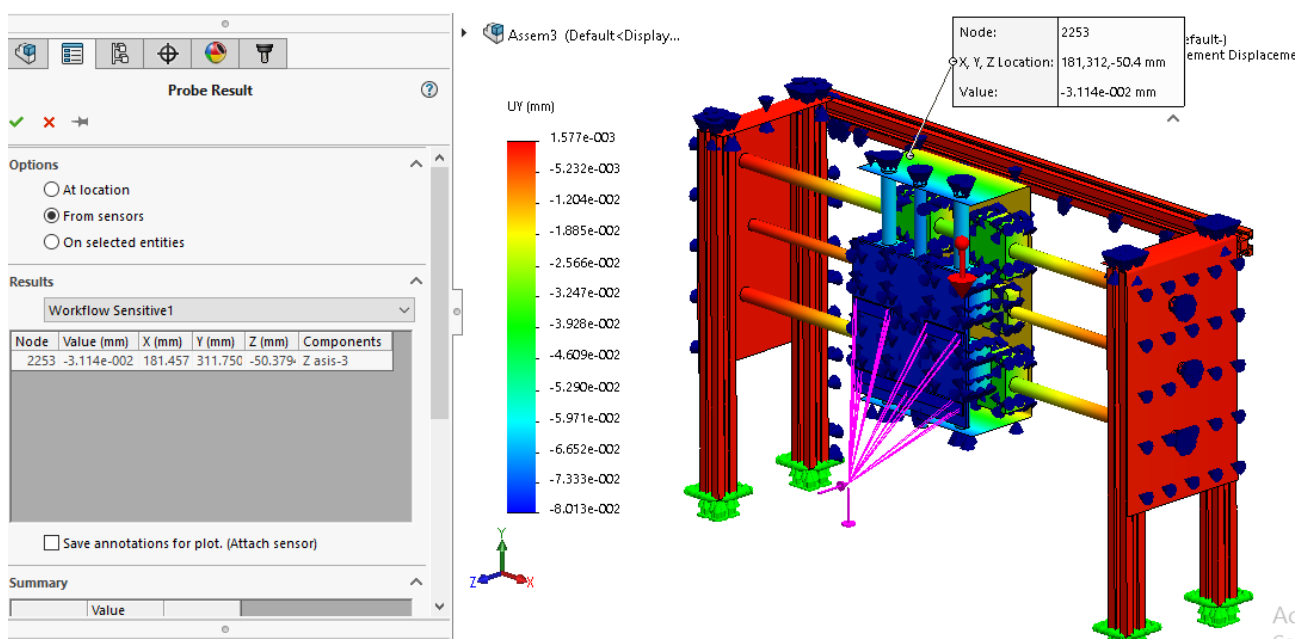


58. pav. Sukurtas tinklelis

Apibrėžus modelio ryšius ir sukūrus baigtinių elementų tinklelį pradedamas modeliavimas įvykdant komandą *Run*. Iš viso modelis yra simuliuojamas devynis kartus, nes yra tiriami devyni staklių darbiniai režimai. Rezultatų parinktyje pasirenkamas pokyčių grafikas. Taip pat sukuriama du nauji grafikai poslinkių į Z ir poslinkių į X ašį (*Displacement*). Būtent į šias ašis ir buvo atremtas laikrodis vykdamas matavimus. Svarbu tiksliai pažymėti taškus, į kuriuos buvo atremtas indikatorius jutiklis. Norint, kad taškas kiekvieno simuliuoto režimo metu būtų toje pačioje vietoje, *SolidWorks* aplinkoje reikia sukurti sensorius. Tai padaroma naudojant funkciją *Probe*. Tvarkyklėje paspaudžiamas dešinys pelės klavišas ant grafiko *Displacement Y axis* -> *Probe*. Modelyje pasirenkamas 2253 mazgas, kurio pozicija atitinka realią laikrodinio indikatorius poziciją. Programa parodo, koks poslinkis yra šiame taške. Laukelyje *Options* pasirenkama funkcija *Save as Sensor*. Ši funkcija išsaugo pasirinktą tašką kaip sensorius, todėl atlikus modeliavimą kitiems režimams, visada bus galima greitai gauti įlinkių reikšmę esančią 2253

mazge (Probe -> Options -> From Sensor). Analogiškai sukuriamas sensorius ir Z ašies poslinkių grafike, pagal laikrodinio indikatorius poziciją pasirenkamas 1497 mazgas.

59 paveiksle matomi poslinkiai į Y ašį esant penktam režimui. Sulyginus programos poslinkių rezultatus su poslinkių rezultatais užfiksuotais laikrodiniu indikatoriumi, akivaizdu, kad jie yra beveik identiški, todėl priimame, kad *SolidWorks* 2016 aplinkoje sugeneruotas suminių poslinkių grafikas taip pat atitinka realius poslinkius ir gauta maksimalių poslinkių reikšmė bus naudojama tolimesniuose tyrimuose.



59. pav. Poslinkiai į Y ašį atitintina poslinkius gautus matuojant laikrodiniu indikatoriumi.

3.4 Poslinkių rezultatų suvestinė

Devyni darbiniai režimai buvo simuliuojami *SolidWorks 2016* papildiniu *Simulation*. Gauti rezultatai išraiškingi – jie, su mažom paklaidomis, sutampa su rezultatais, gautais įlinkius matuojant laikrodiniu indikatoriumi. Tai leidžia daryti prielaidą, kad programos apskaičiuotas maksimalus įlinkis atitinka realius maksimalius įlinkius. Kaip bus apžvelgiama vėliau, gautos išfrezuotų detalių paklaidos greičiausiai yra sąlygotos staklių poslinkių, atsiradusių frezavimo metu. Verta pabrėžti, kad šioje tyrimo stadijoje dėmesys į konstrukcinius įtempius, atsiradusias deformacijas ir atsargos koeficientą nebuvo kreipiamas, nes projektinėje dalyje staklių konstrukcija buvo ištestuota esant ekstremalioms sąlygoms ir jokių pastebimų pavojingų nuokrypių nuo leistinų

limitų pastebėta nebuvo. Todėl modeliavimo metu gauta informacija apie deformacijas ir įtempius šiame baigiamajame darbe pateikta nebuvo.

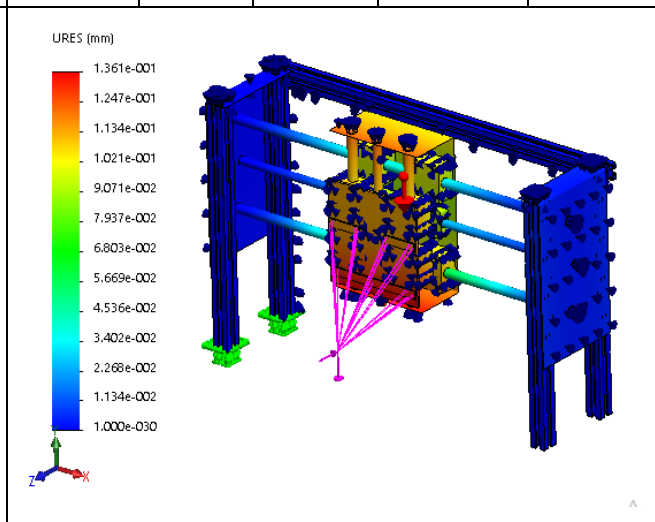
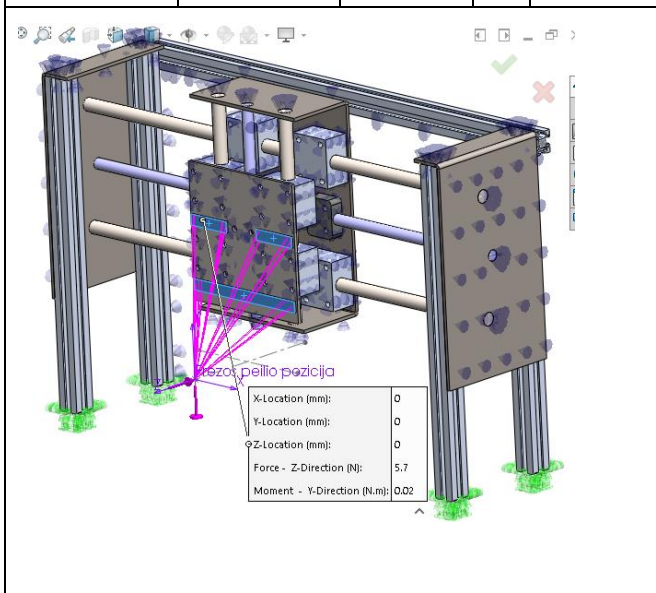
Rezultatų suvestinė pateikiama devyniuose lentelėse. Lentelės viršuje parašytas režimo numeris. V_f tai frezos pastūmos greitis, matuojamas milimetrais per minutę. Dydis S rodo, kokių greičiu sukasi frezos sūklis. Šie du paminėti dydžiai yra vieninteliai kintamieji kiekviename režime, kurie, kaip rodo rezultatai, ženkliai įtakoja gautąsias jėgas atsirandančias frezavimo metu. Konstanta D žymi frezavimo įrankio diametrą, o Z – frezos įrankių dantukų dantukų skaičių. Dydis rodo frezuojamo griovelio plotį, o a_p – griovelio gylį. Dydis A rodo frezos paviršiaus plotą. Galiausiai, pagal formulę 1.1. apskaičiuojami likę du dydžiai. F ir M . F tai jėga, atsiradusi stumiant peilį į ruošinį pjovimo metu, matuojama Niutonais. M tai momentas, atsiradęs pjovimo metu. Momentas, kaip įprasta, matuojamas niutonmetrais.

Kiekvienoje lentelėje galia išvysti keturis paveikslėlius iš *SolidWorks 2016* programos. Pirmasis paveikslėlis rodo kokio dydžio nuotolinės jėgos uždėtos ant pasirinktų frezos tvirtinimo paviršių. Antrasis paveikslėlis rodo maksimalų įlinkį režimo metu. Pagal spalvinę įlinkių gamą galima suprasti, kuri konstrukcijos dalis palinksta labiausiai (raudona spalva rodo didžiausių įlinkių koncentracijos vietas). Trečias paveikslėlis rodo įlinkius pasirinktame Y ašies taške. Įlinkiai palyginami su išmatuotaisiais įlinkiais. Analogiškai, ketvirtasis paveikslėlis rodo įlinkius pasirinktame taške Z ašyje. Verta priminti, kad pasirinktųjų taškų pozicija sutampa su laikrodinio indikatoriaus pozicija atliekant realius įlinkių matavimus pagal devynis režimus. Kitame puslapyje pateikiamos devynios rezultatų lentelės su trumpais komentarais.

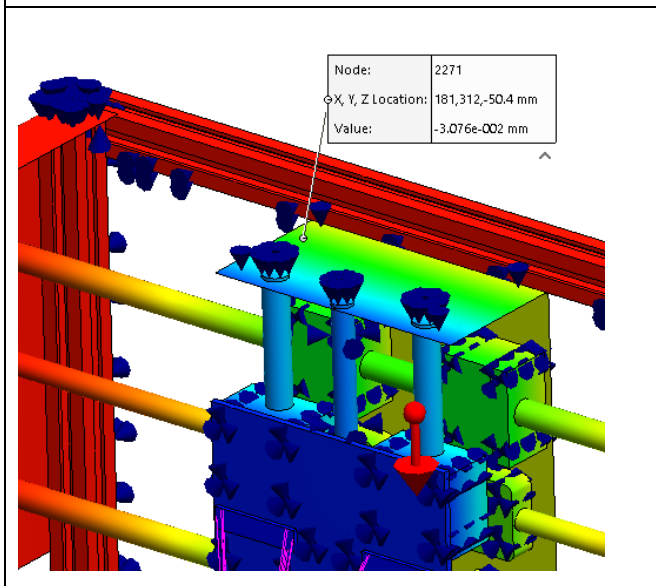
Pirmasis režimas yra kraštutinis – darbas vyksta esant didžiausioms špindelio apsukoms ir didžiausiai pastūmai (300 mm/min). Matavimų metu buvo pastebėta, kad šis režimas, nors ir greitas, bet ne pats tiksliausias – programa suskaičiavo, kad režimo metu maksimalūs įlinkiai siekia $0,136 \text{ mm}$. Pastebimi nuokrypiai nuo išmatuoto ir apskaičiuoto įlinkio Z ašiai, todėl rezultatai gali turėti maža paklaidą.

Apdirbimo režimas Nr. 1

$V_f, mm/min$	$S, aps/min$	D, mm	Z	a_p, mm	b_p, mm	f_z	A, mm^2	F, N	M, Nm
300	27000	8	3	8	4	0,015	0,36	12,155	0,05

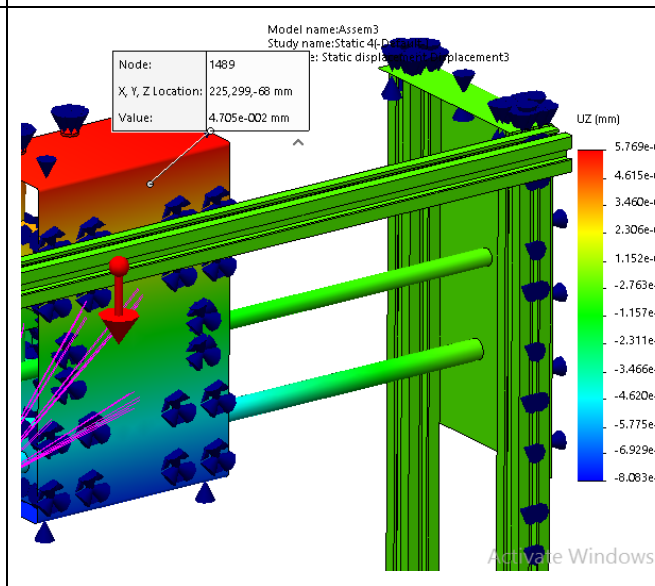


Maksimalus įlinkis: 0.136 mm



Išmatuotas įlinkis Y ašiai: 0.03 mm

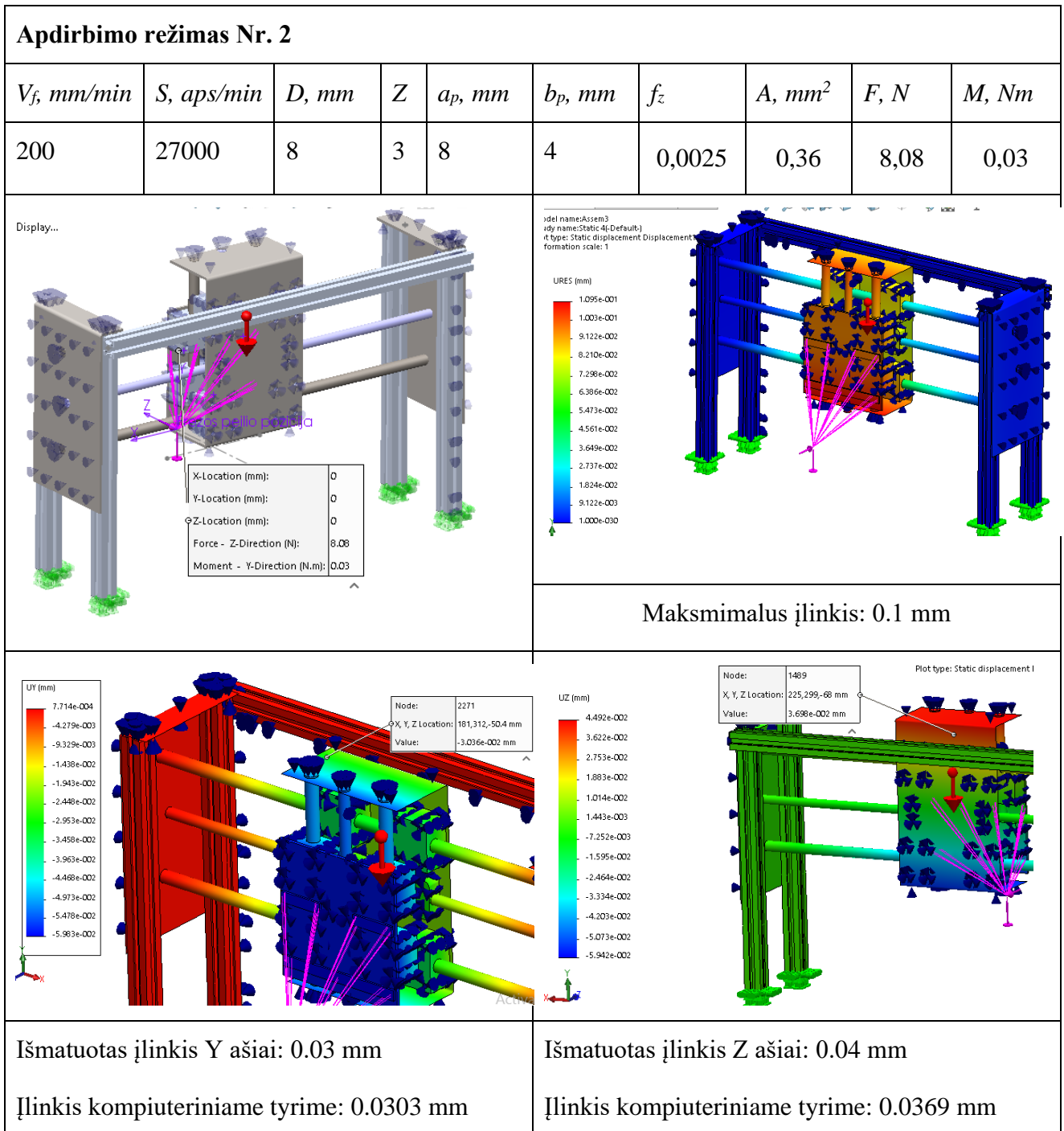
Įlinkis kompiuteriniame tyrime: 0.0307 mm



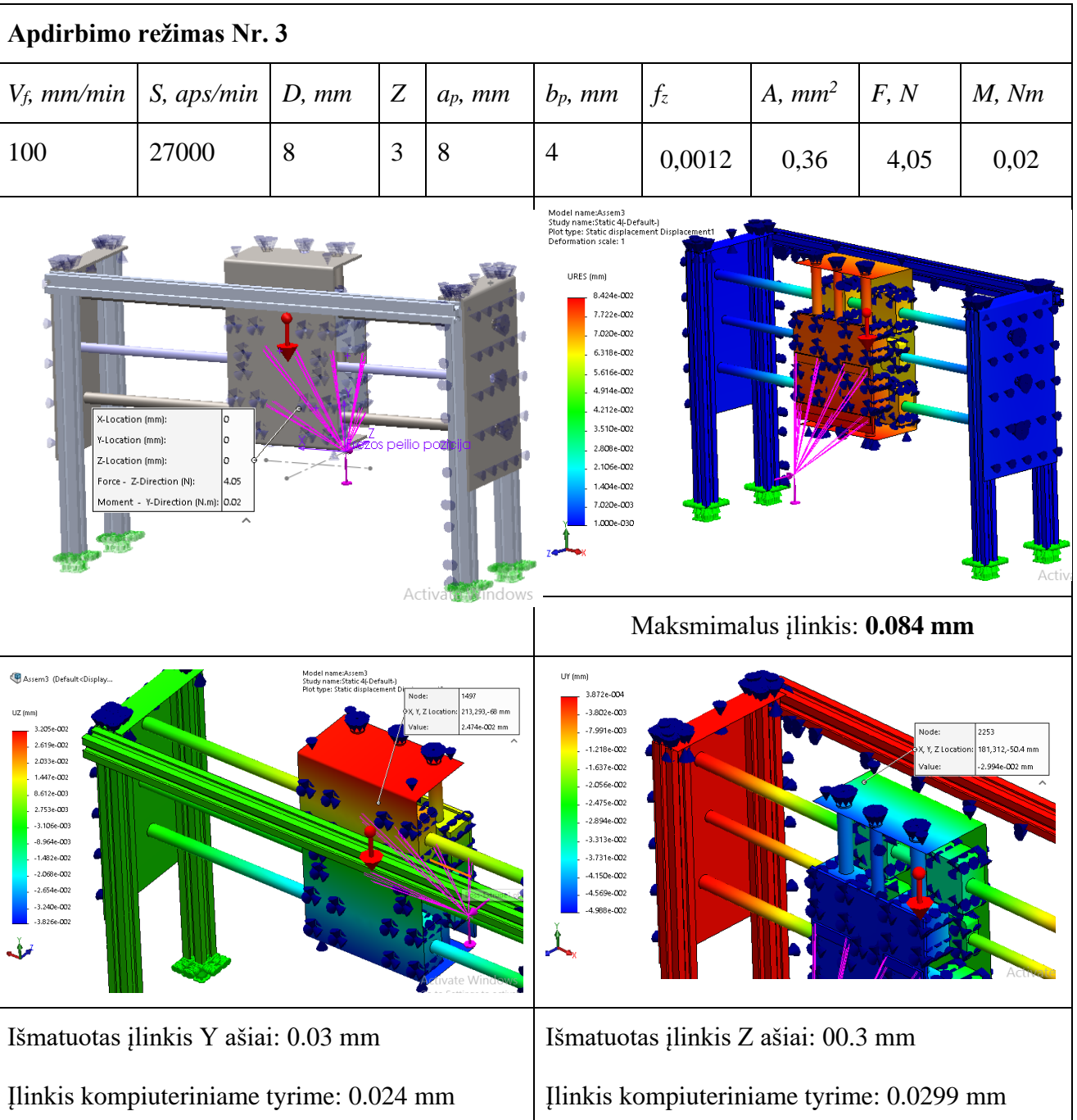
Išmatuotas įlinkis Z ašiai: 0.04 mm

Įlinkis kompiuteriniame tyrime: 0.0471 mm

Antruoju režimu keičiasi pastūmos greitis, o špindelio apsisukimų per minutę skaičius išlieka nepakitęs. Remiantis teoriškai apskaičiuotomis jėgos galima išvelgti tendenciją, kad pastūmos sumažinimas sumažina frezavimo metu atsiradusias jėgas. Modeliavimas parodė, kad sumažėja ir maksimalus įlinkis, iki 0.1 mm, kas jau yra neblogas rezultatas. Įdomus pastebėjimas, kad tiek matavimų tiek modeliavimų metu įlinkiai į Y ašį išlieka apie 0,03 mm, tačiau įlinkiai į Z ašį kinta ženkliai.

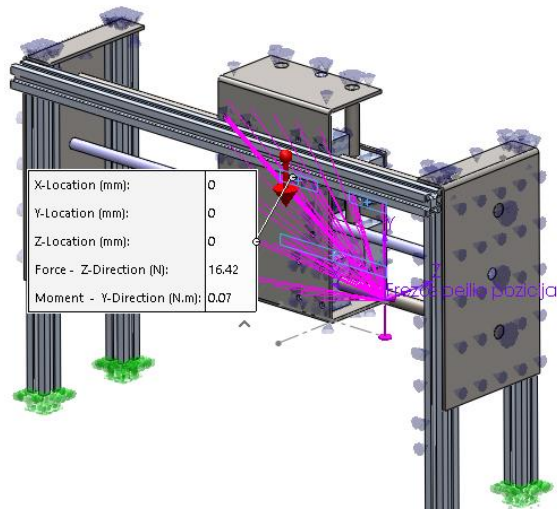
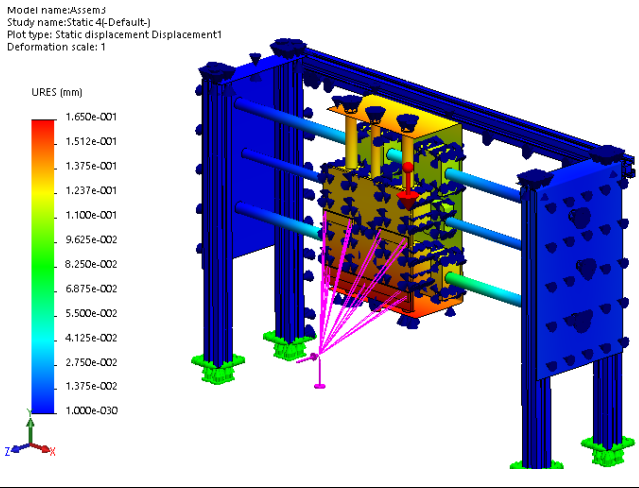
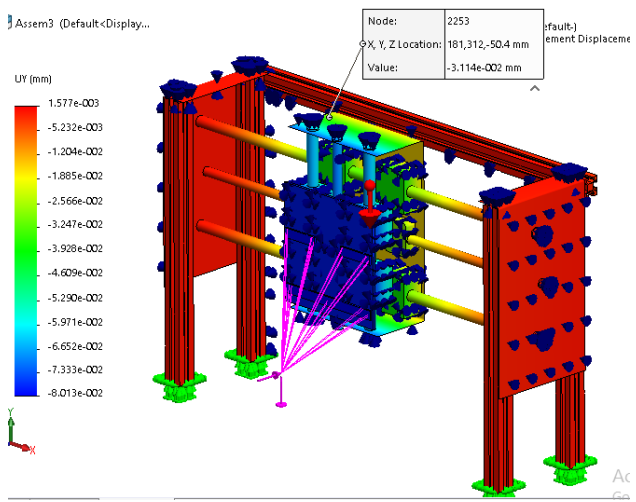
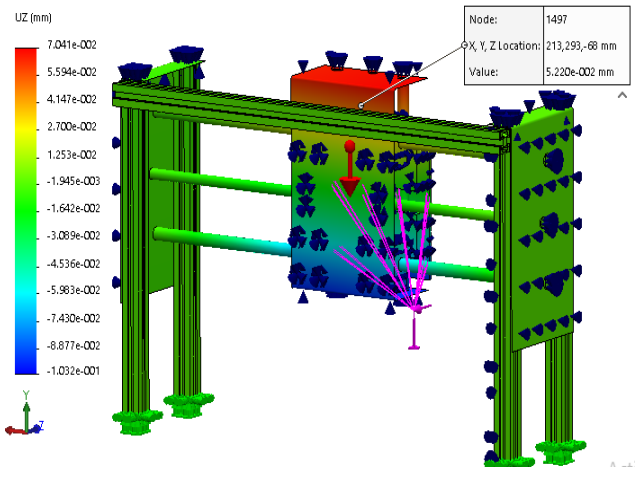


Išmatavus trečiojo režimo įlinkius, gautas puikus rezultatas. Maksimalūs įlinkiai siekia 0,084 mm, kas yra mažiau nei užsibrėžti 0,01 milimetro. Nors pastūmos greitis yra tris kartus mažesnis nei pirmojo režimo pastūmos greitis, tačiau įlinkiai yra mažesni du kartus. Tai kol kas pats tiksliausias režimas. Tai galima būti paaiškinti tuo, kad maksimaliu greičiu besisukanti freza nupjauna plonus plastiko sluoksnius, nes yra stumiama į ruošinį lėtai. Nupjauti ploną gabalėlį ruošinio reikia mažiau jėgos nei atskirti nuo ruošinio storą atraižą.

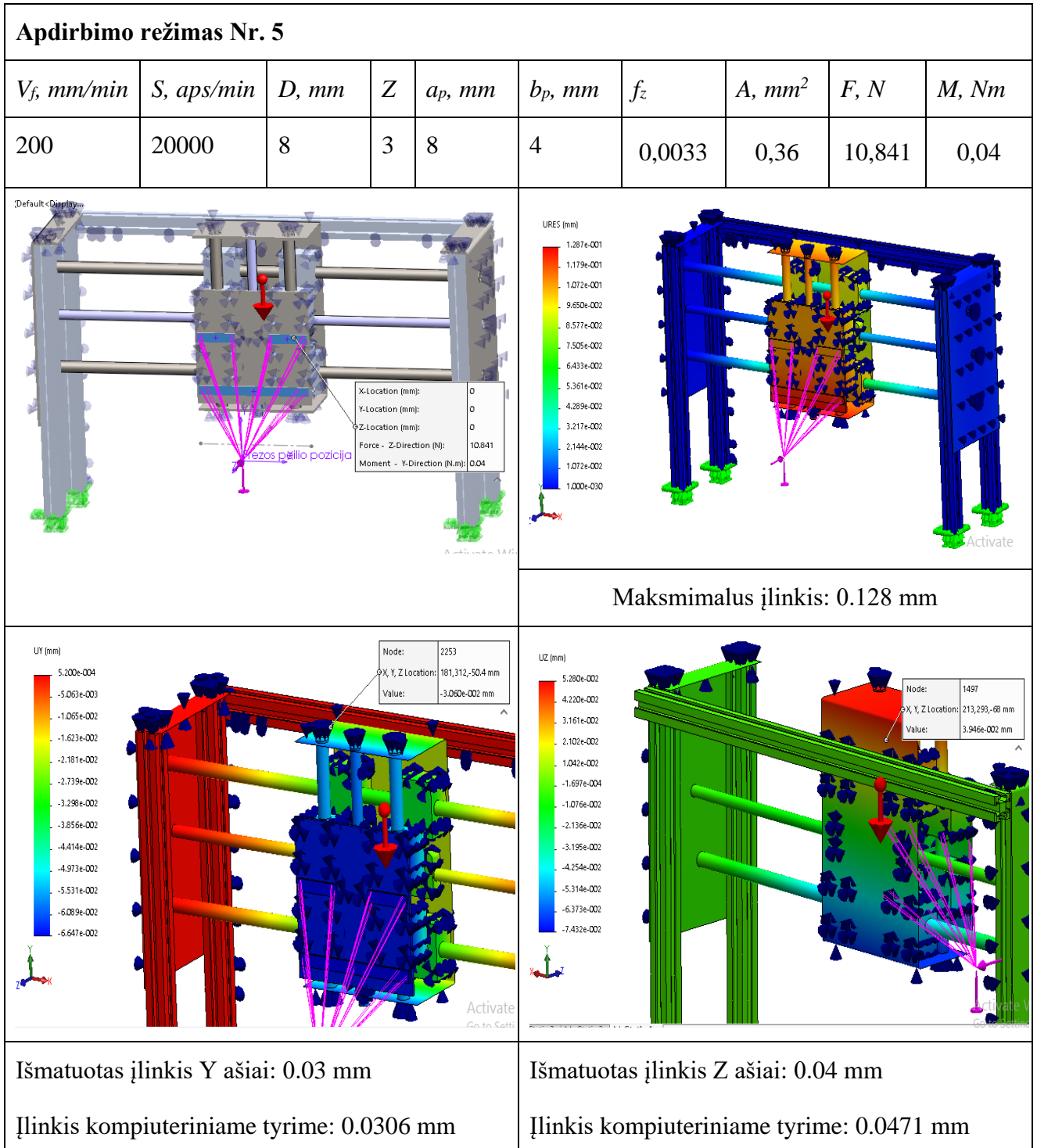


Ketvirtasis režimas tai pirmasis iš režimų, kuriame špindelio sukimosi greitis sumažintas iki 20000 apsisukimų per minutę. Mažesnis apsisukimų greitis sąlygoja didesnes pjovimų jėgas esant tai pačiai pastūmai kaip ir pirmajame režime. To priežastis - lėčiau besisukanti freza nuima storesnes ruošinio atraižas. Maksimalus įlinkis vėl dvigubai išaugo nei įlinkis, atsiradęs trečiojo režimo metu.

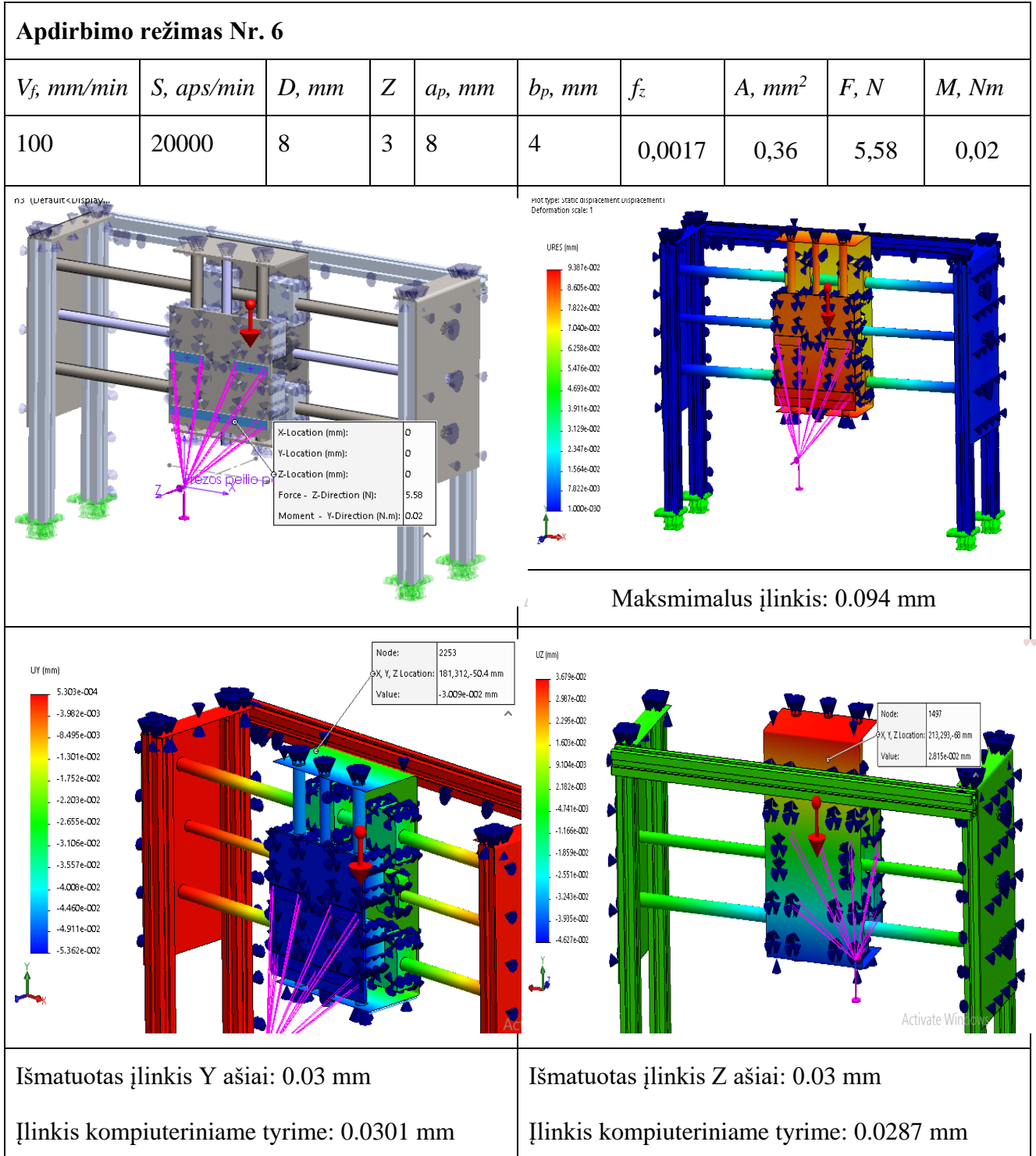
Apdirbimo režimas Nr. 4									
$V_f, mm/min$	$S, aps/min$	D, mm	Z	a_p, mm	b_p, mm	f_z	A, mm^2	F, N	M, Nm
300	20000	8	3	8	4	0,005	0,36	16,42	0,07

	 <p>Maksimalus įlinkis: 0.165 mm</p>
	
<p>Išmatuotas įlinkis Y ašiai: 0,03 mm</p> <p>Įlinkis kompiuteriniame tyrime: 0.0311 mm</p>	<p>Išmatuotas įlinkis Z ašiai: 0.05 mm</p> <p>Įlinkis kompiuteriniame tyrime: 0.0522 mm</p>

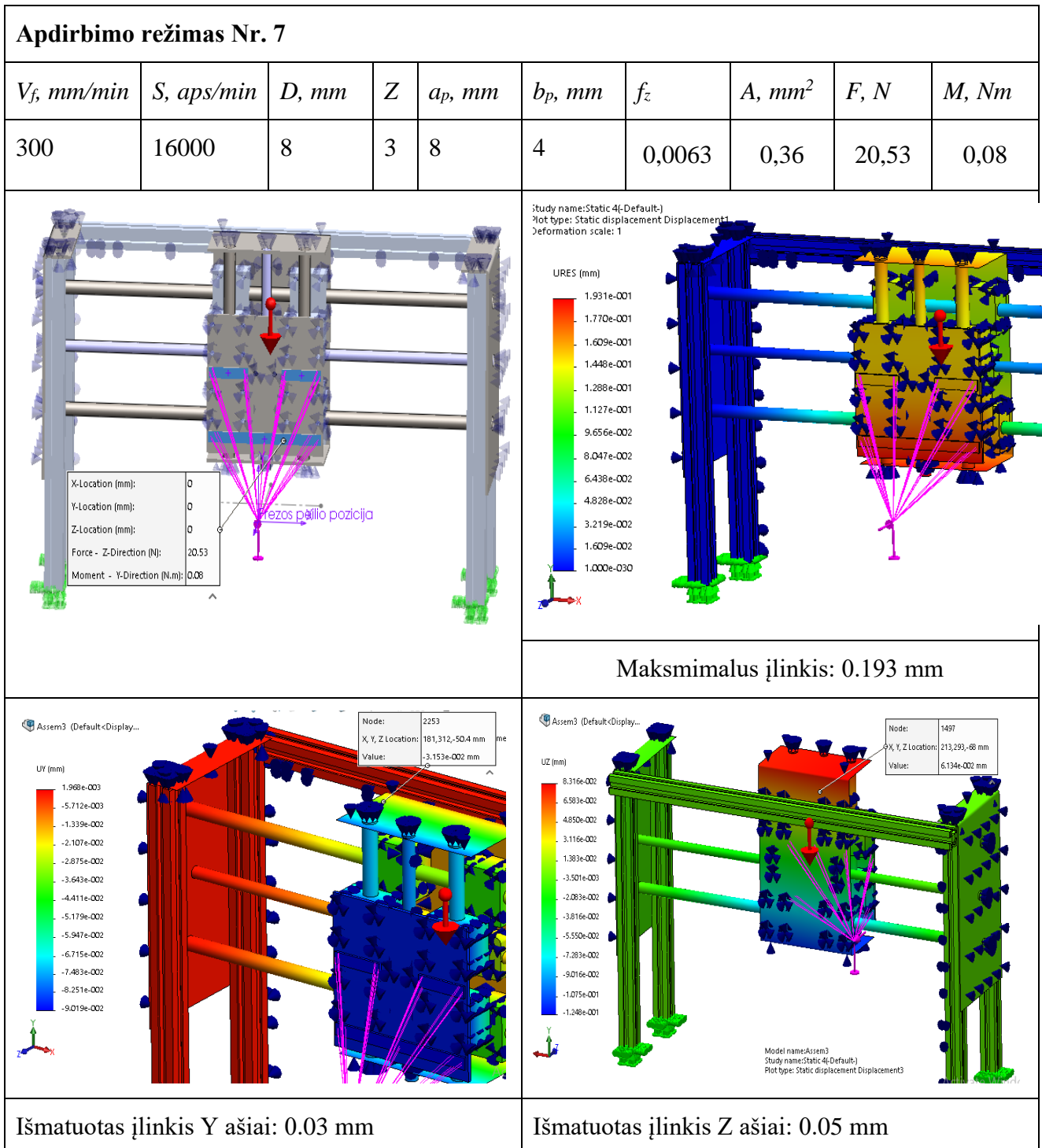
Penktajame režime programiškai sumažinta pastūma nuo 300 mm/min iki 200 mm/min . To rezultatas- 0,04 mm sumažėję maksimalūs įlinkiai, tačiau iki kol kas mažiausio, trečiojo režimo įlinkių, trūksta 0,04 mm . Režimą galima įvardinti kaip vidurinįjį – tiek pastūmos, tiek apsisukimo greičių reikšmės yra didesnės nei minimalios tačiau mažesnės nei maksimalios. Šis režimas būtų tinkamas darant daug didelio tikslumo nereikalaujančių detalių siekiant efektyviai naudoti energiją.



Šeštajame režime pastūmos greitis sumažintas iki 100 *mm/min*. Rezultatas – antras mažiausias maksimalus įlinkis. Po šešių bandymų galima įžvelgti tendenciją – įlinkiai Y ašyje esančiame taške visais atvejais yra 0,03 mm, todėl režimai įlinkiams Y daroma retai.



Septintasis režimas yra pirmasis iš režimų, kuriame špindelio apsisukimų per minutę skaičius sumažintas iki minimalaus – 16000. Tai režimas, kuriame įlinkiai patys didžiausi iš visų devynių apdirbimo režimų. To priežastis paprasta – lėtai besisukantis frezos įrankis yra greitai stumiamas į ruošinį, todėl nufrezuojamos didžiausio storio ruošinio atraižos. Tokioms atraižoms nufrezuoti reikia didesnės jėgos nei frezuojant tą patį ruošinį maža pastūma arba didelėmis apskukomis.



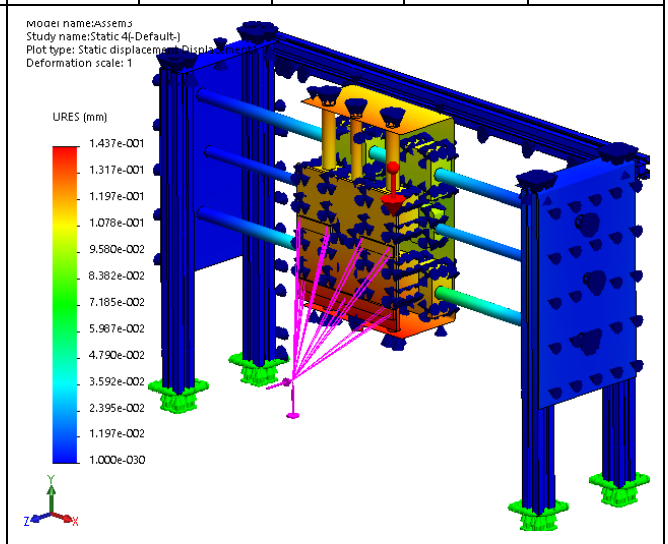
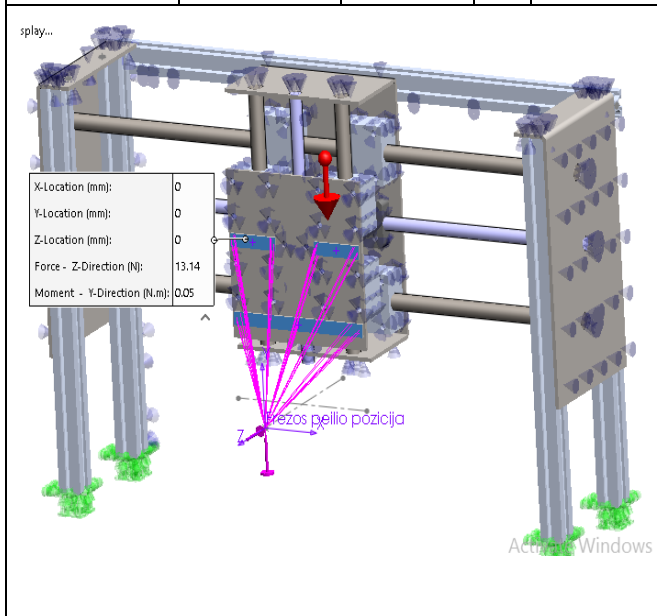
Įlinkis kompiuteriniame tyrime: 0.0315 mm

Įlinkis kompiuteriniame tyrime: 0.0613 mm

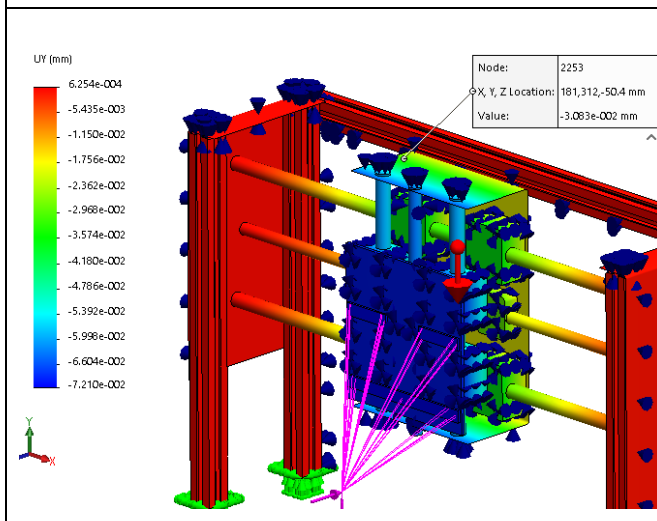
Aštuntajame režime gauti įlinkių rezultatai dar kartą įrodo, koks svarbus pastūmos greitis frezavimo metu. Mažesnė pastūma beveik 0,05 mm sumažino maksimalius įlinkius lyginant su įlinkiais gautais pačiu nesėkmingiausiu – septintu režimu. Įdomu ir tai, kad įlinkiai yra didesni nei penktuoju režimu (200 mm/min pastūma ir 20000 aps/min špindelio greitis). Todėl galima prieiti dar vienos išvados – esant tai pačiai pastūmai bet mažesniai apsisukimų skaičiui, gaunami didesni maksimalūs įlinkiai.

Apdirbimo režimas Nr. 8

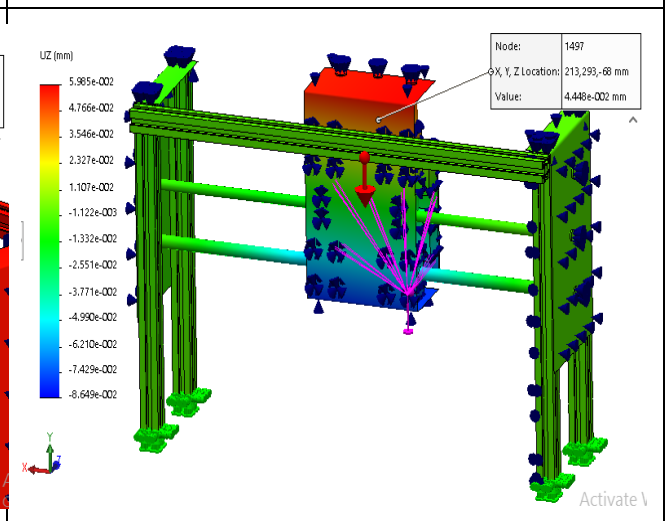
$V_f, mm/min$	$S, aps/min$	D, mm	Z	a_p, mm	b_p, mm	f_z	A, mm^2	F, N	M, Nm
200	16000	8	3	8	4	0,0042	0,36	13,14	0,05



Maksimalus įlinkis: 0.144 mm



Išmatuotas įlinkis Y ašiai: 0.03 mm



Išmatuotas įlinkis Z ašiai: 0.04 mm

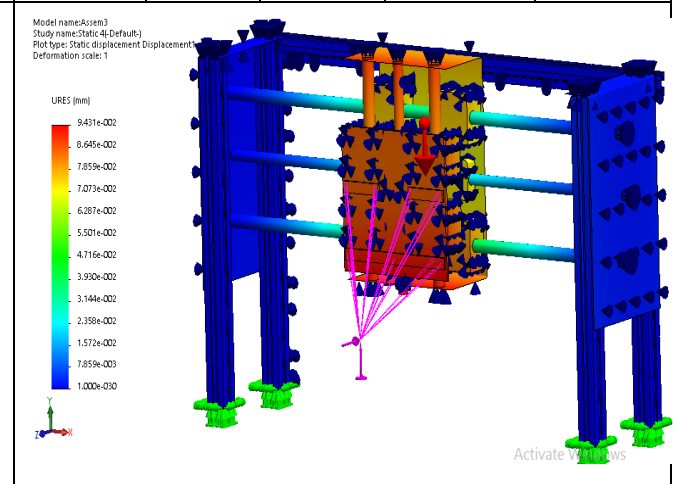
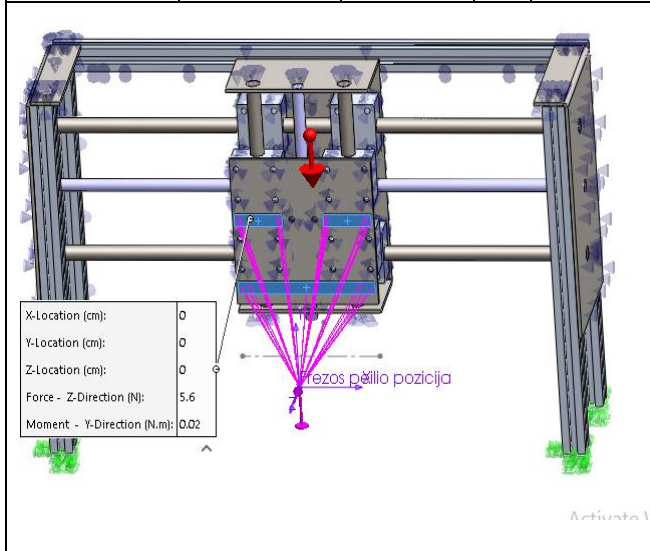
Įlinkis kompiuteriniame tyrime: 0.0308 mm

Įlinkis kompiuteriniame tyrime: 0.0444 mm

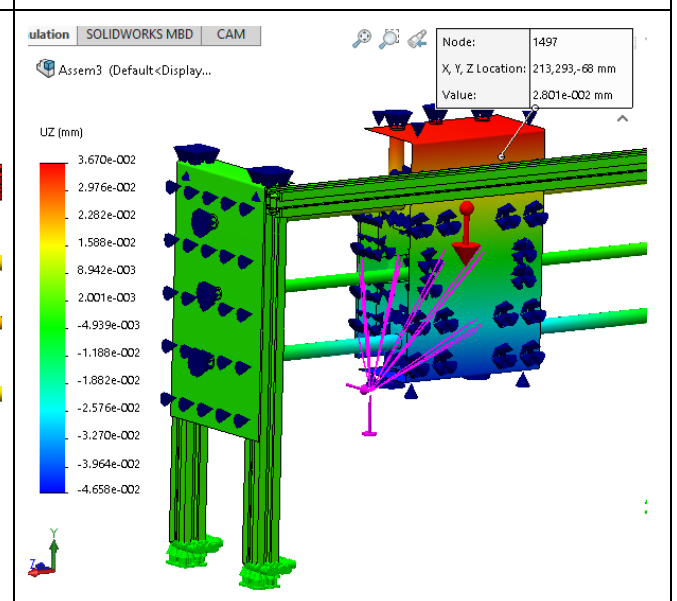
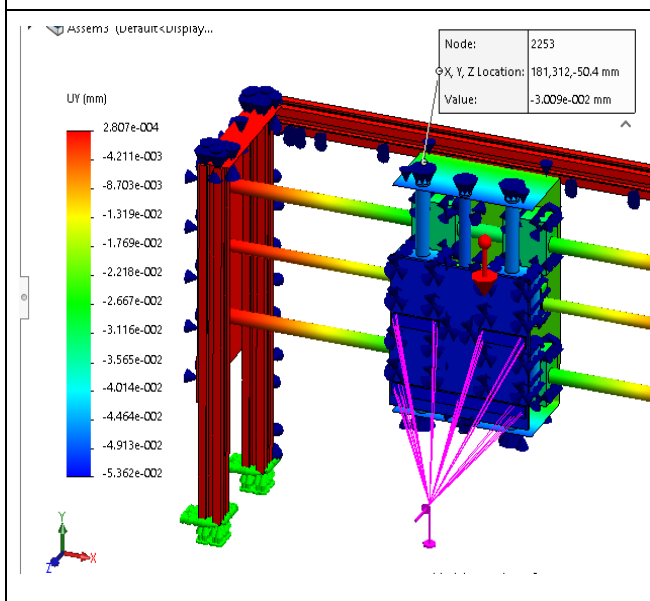
Paskutinis režimas yra vykdomas su minimalia pastūma ir minimaliu apsisukimų skaičiumi. Rezultatai panašūs į trečio ir šešto režimų rezultatus – maksimalūs įlinkiai prie mažiausios pastūmos yra mažiausi. Tačiau lėti apsisukimai sąlygoja šiek tiek didesnius įlinkius nei trečiajame – optimaliausiame režime.

Apdirbimo režimas Nr. 9

$V_f, mm/min$	$S, aps/min$	D, mm	Z	a_p, mm	b_p, mm	f_z	A, mm^2	F, N	M, Nm
100	16000	8	3	8	4	0,002	0,36	5,6	0,02



Maksimalus įlinkis: 0.094 mm



Išmatuotas įlinkis Y ašiai: 0.03 mm Įlinkis kompiuteriniame tyrime: 0.0301 mm	Išmatuotas įlinkis Z ašiai: 0.03 mm Įlinkis kompiuteriniame tyrime: 0.028 mm
--	---

3.4.1 Regresinė analizė

Eksperimentų sklaidos analizė leidžia apdoroti norimą informaciją ir sutaupyti laiko ir išteklių. Statistinis metodas panaudojamas eksperimentų rezultatų sklaidos analizei atlikti. Šiuo metodu nustatoma statistinių charakteristikų sklaida ir padaroma išvada apie svarbių parametru grupę tiriamajam projektui. Šio projekto atveju ištirsim ar sudarytų režimų kintamieji, apskukų skaičius per minutę ir pastūma turi tiesioginę įtaką staklių konstrukcijos įlinkiams. [23]

Eksperimentinių duomenų statistinis įvertinimas atliekamas Excel programos Regression Analysis funkcija, kuri įvertina rezultatų paklaidą, vidutinį nuokrypį, didžiausią nuokrypį ir atlieka dispersijos analizę. Skaičiavimai atliekami remiantis maksimaliais nuokrypiais R^2 ir koeficientu F.

Jei kintamųjų intervalai kinta mažėjančia tvarka, iteracijos gali būti ribojamas tiesiškai [23]:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \dots + a_nX_n \quad (4)$$

Čia Y – prognozuojami įlinkiai

a– regresijos koeficientai

X – eksperimentiškai rasti įlinkiai

9 lentelė. Duomenys

	Vf, mm/min	S, aps/min	Įlinkis eksp.	Įlinkis Anova
	X ₁	X ₂		Y
1	300	27000	0,136	0,149959
2	200		0,1	0,110633
3	100		0,084	0,071306

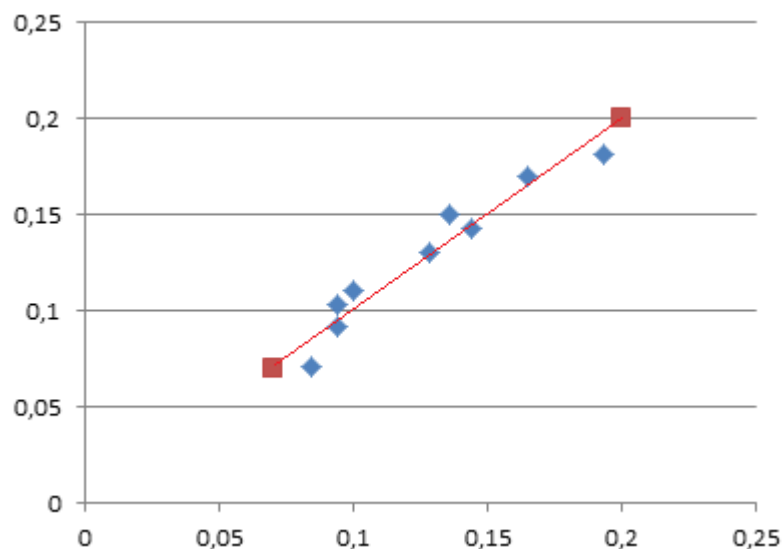
4	300	20000	0,165	0,170216
5	200		0,128	0,130889
6	100		0,094	0,091563
7	300	16000	0,193	0,181791
8	200		0,144	0,142464
9	100		0,094	0,103138

10 lentelė. Sklaidos duomenys

Faktorius X1	0,975337808
Faktorius X2	0,95128384
X1 ir X2 sąveika	0,931797377
Paklaida	0,010268222

11 lentelė. Rezultatai

ANOVA	Laisvės laipsnis	Kvadratų suma	Kvadratų vidurkis	Bandymas	Procentinis įnašas
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>		
Sklaida	2	0,010294	0,005147	48,81767	0,000523821
Likutis	5	0,000527	0,000105		
Viso	7	0,010822			



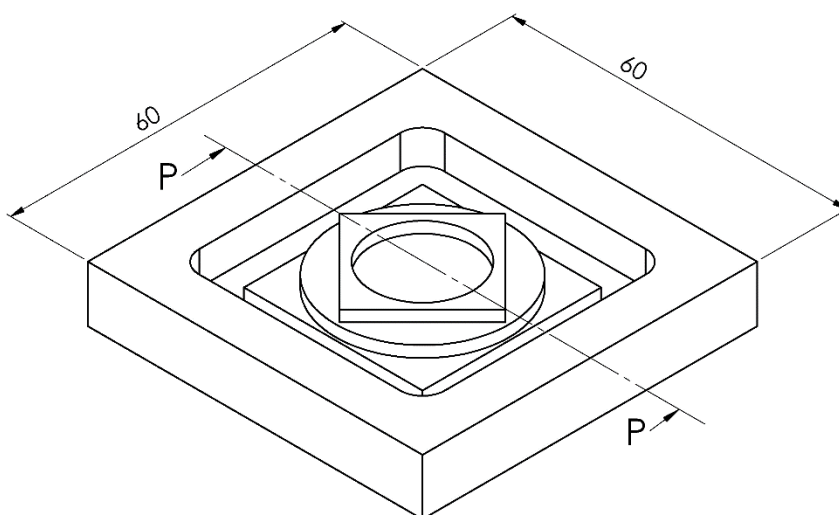
59 pav. Regresinės analizės rezultatai

X1 ir X2 sąveikos reikšmė rodo, kad pastūma 97,5% įtakoja įlinkius, o apsukų skaičius 95,1%, t.y. pasirinktieji faktoriai realiai įvertina formavimo parametrų didumą [23].

Skaičiavimai yra priimami kaip turintys įtakos, jeigu $F > F_{krit;a}$. [23]. Iš F- reikšmės lentelių pagal pasirinktą intervalo lygį α ir laisvės laipsnių skaičių 2;5, priėmus koeficientą $\alpha = 0.04$, randame kriterijų $F_{krit;0.05} = 4.46$. Kadangi X1 ir X2 faktorių ne reikšmingumo įtaka staklių įlinkiams yra mažesnė negu 4% ($\alpha = 0.04$), o $F_{krit;0.01} = 4,46 \ll F_{skaič} = 48,81767$. Šis gautas F kriterijus rodo, kad sudarytas regresijos modelis laikytinas statistiškai reikšmingu ir darome išvadą, kad sudarytų režimų kintamieji, apsukų skaičius per minutę ir pastūma turi tiesioginę įtaką staklių konstrukcijos įlinkiams, o didesnę įtaką turi pastūma.

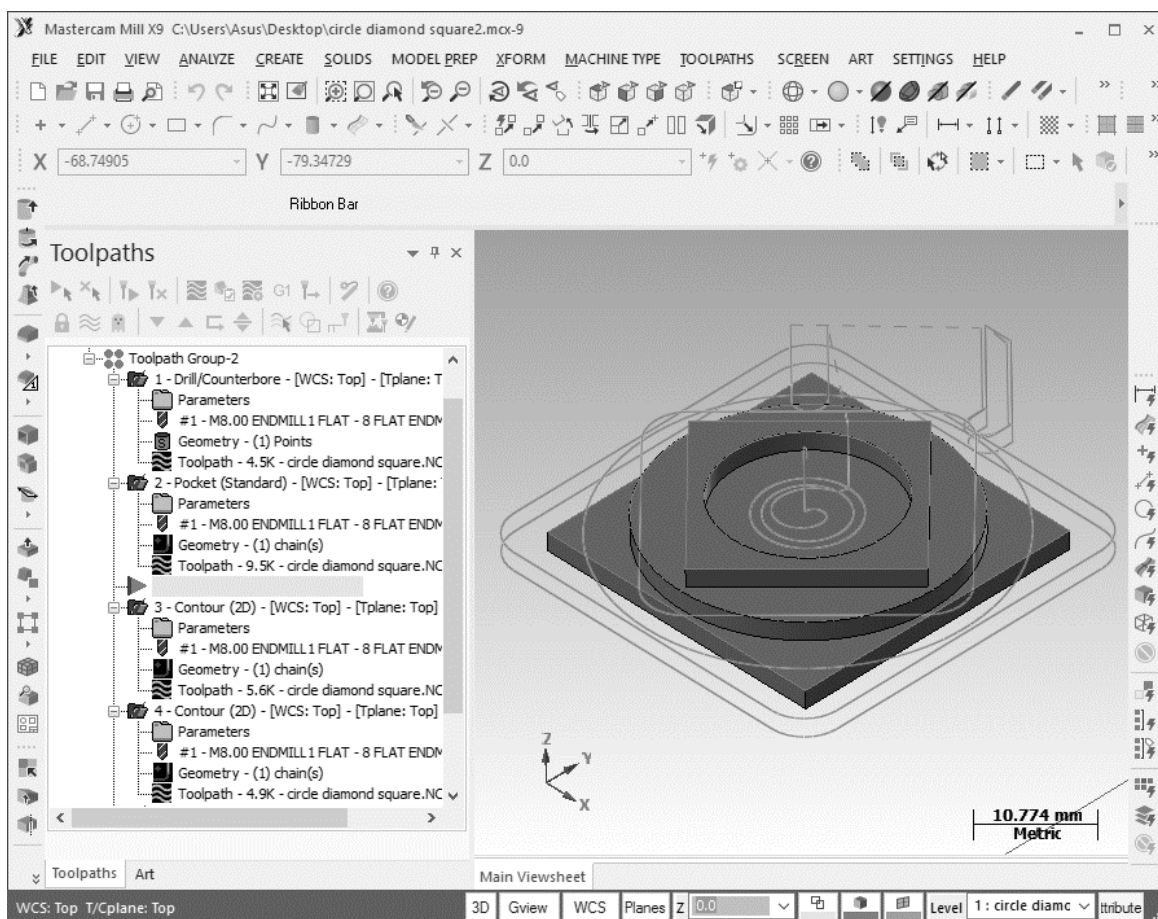
3.5 Staklių tikslumo nustatymas

Išsiaiškinus pjovimo jėgos įtaką staklių konstrukcijai ir nusprendus, kad staklių standumas būtų pakankamas apdirbti plastikui, ištiriamas realus staklių tikslumas apdirbant detales iš poliacetalio. Kaip apdirbama detalė pasirenkama standartiškai pramonėje staklių gamintojų naudojamas detalės modelis, vadinamas, kvadrato-apskritimo-rombo testu. Detalė susideda iš trijų aukščių, po vieną skirtingą išorinę formą kiekviename aukštyje ir išfrezuojamą skylę per centrą. Tris skirtingas formas sudaro kvadratas, apskritimas ir rombas. Šios formos leidžia nustatyti staklių galimybes judant atskiromis x ir y ašimis, abiejų ašių susiderinamumą judant tiesia, judant spinduliu ir z ašies tikslumą.



60. pav. Kvadrato-apskritimo-rombo bandymo detalės modelis

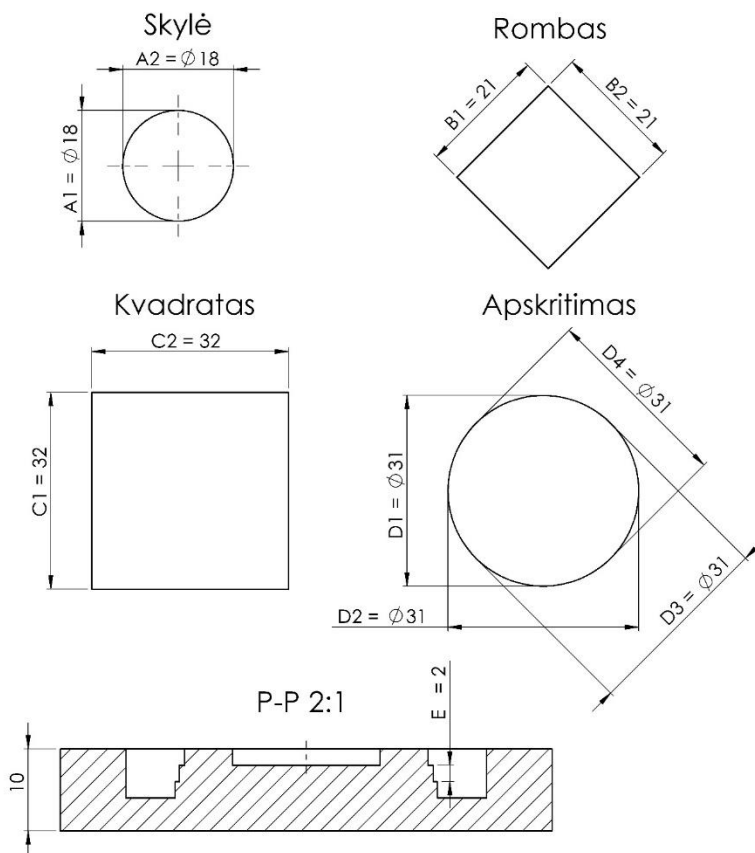
Detalė sumodeliuojama *Solidworks* programa, o G kodo programa parašoma *MasterCam 9* programos aplinkoje, išorinių formų frezavimo trajektorijas apibrėždamas *Contour* funkcija ir vidinės skylės išfrezavimą *Pocket* funkcija. Detalei apdirbti išviso reikia keturių operacijų. Kodas siunčiamas į stakles *GRBL Controller* programos aplinkoje



61. pav. Detalės apdirbimas suprogramuotas „MasterCam“ programa

Susumavus visus matuojamus matmenis gaunam vienuolika skirtingų matmenų. Matavimai atliekami slankmačiu ir kur yra galimybė – mikrometru. Pradžioje apdirbamos devynios detalės tais pačiais režimais, kurie buvo naudojami poveikio staklių konstrukcijai metu. Išrinkus režimą, kuriuo detalės apdirbamos tiksliausiai. Apdirbimo tikslumo tyrimas tada tęsiamas remiantis metodika naudota straipsnyje „Prediction of Cutting Force in 3-Axis CNC Milling Machines Based on Voxelization Framework for Digital Manufacturing” pagal Omid Yousefian, Joshua A. Tarbuton is University of South Carolina t. y., gaminant 20 vienetų vienodų detalių tuo režimu,

kuris duoda geriausius rezultatus. Gavus rezultatus padaromos atitinkamos išvados ir pasiūlymai dėl paklaidų priežasčių, staklių kalibravimo ir konstrukcijos patobulinimo.



62. pav. Detalės matmenys

Devyniais skirtingais režimais apdirbus detales išmatuota vienuolika skirtingų matmenų su slankmačiu ir suvesta į lentelę.

12 lentelė. Detalės matmenys

Nominalas	18	18	21	21	32	32	31	31	31	31	2
Matmuo	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	D3	D4	E
1	17,97	17,99	21	20,99	31,95	31,89	30,94	30,92	30,93	30,95	2,04
2	17,87	17,91	21,07	20,84	31,9	31,84	30,74	30,91	30,89	30,85	2,05
3	17,79	17,94	21,03	20,88	31,96	31,92	30,79	30,89	30,75	30,87	2,11
4	17,87	17,92	21,05	20,88	31,92	31,87	30,75	30,91	30,86	30,88	2,06
5	17,89	17,98	20,97	20,8	31,9	31,82	30,9	30,91	30,89	30,84	2,03
6	17,88	17,96	20,98	21	31,89	31,8	30,91	30,87	30,88	30,91	2,04
7	17,84	17,96	21,04	20,87	31,91	31,85	30,78	30,94	30,86	30,96	2,09
8	17,96	18,02	21,02	20,9	31,85	31,85	30,89	30,93	30,84	30,7	2,12

9	17,75	17,95	21,18	20,68	31,83	31,6	30,87	30,72	30,74	30,75	2,08
---	-------	-------	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	------

Detalės matuojamos firmos *Corrona* skaitmeniniu slankmačiu D00352. Slankmačiu išmatuoti tiek vidines tiek išorines detalės sienelės. Naudojamas slankmatis geba išmatuoti šimtąsias milimetro dalis – iki 0,01 *mm*. Skaitmeninio slankmačio privalumas tas, kad nebelieka žmogaus akies paklaidos vertinant slankmačio rodmenis.



63. pav. Naudotas slankmatis

Detalių matavimams panaudoti trys skirtingi slankmačio matuokliai – stačiakampių bei apskritimų sienelėms naudotas pagrindinis gnybtas (nr. 1). Skylės sienelėms matuoti naudotas vidinių paviršių matavimo priedas (nr. 2). Frezos gyliui matuoti naudotas gylio matuoklis, kuris dažniausiai slankmačiuose randamas gale (nr. 3). Slankmačio dokumentacijos parašyta, kad įrankio paklaida matuojant detales iki 100 *mm* yra 0,02 *mm*. Matuojant didesnio gabarito detales (nuo 100 iki maksimalaus 150 *mm*), įrankio paklaida yra $\pm 0,03$ *mm*. Įrankiu matuoti reikėtų esant ne aukštesnei nei 40 °C ir ne žemesnei nei 5 °C temperatūrai. Santikinė oro drėgmė netūrėtų viršyti 80 %. Mūsų matavimai buvo atlikti esant 21 °C temperatūrai ir 58 % santikinei oro drėgmei. Visa slankmačio dokumentacija gali būti randama internete, šaltinio nr. [18].



64. pav. Detalės matavimas su slankmačiu

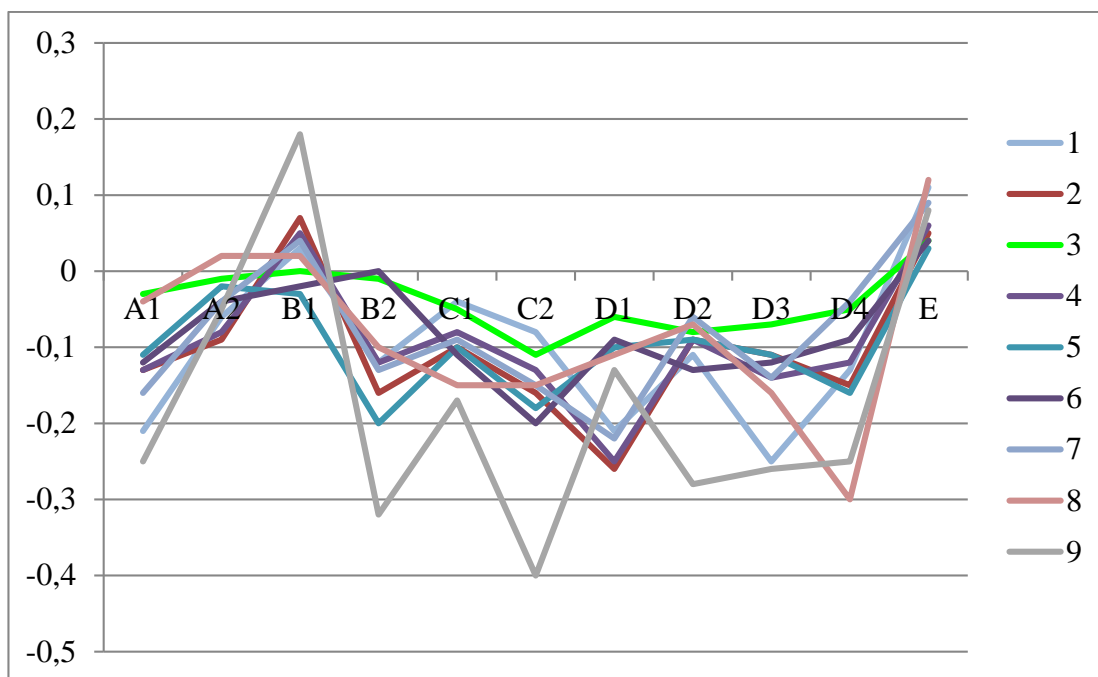
Norint susidaryti geresnį rezultatų vaizdinį, buvo išvestos kiekvieno matmens paklaida ir suvestos į atskirą lentelę.

13 lentelė. Matmens paklaidos

S, aps/min	V _f , mm/min	Paklaida											
		A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	D3	D4	E	
1	27000	300	-0,21	-0,06	0,03	-0,12	-0,04	-0,08	-0,21	-0,11	-0,25	-0,13	0,11
2	27000	200	-0,13	-0,09	0,07	-0,16	-0,1	-0,16	-0,26	-0,09	-0,11	-0,15	0,05
3	27000	100	-0,03	-0,01	0	-0,01	-0,05	-0,11	-0,06	-0,08	-0,07	-0,05	0,04
4	20000	300	-0,13	-0,08	0,05	-0,12	-0,08	-0,13	-0,25	-0,09	-0,14	-0,12	0,06
5	20000	200	-0,11	-0,02	-0,03	-0,2	-0,1	-0,18	-0,1	-0,09	-0,11	-0,16	0,03
6	20000	100	-0,12	-0,04	-0,02	0	-0,11	-0,2	-0,09	-0,13	-0,12	-0,09	0,04
7	16000	300	-0,16	-0,04	0,04	-0,13	-0,09	-0,15	-0,22	-0,06	-0,14	-0,04	0,09
8	16000	200	-0,04	0,02	0,02	-0,1	-0,15	-0,15	-0,11	-0,07	-0,16	-0,3	0,12
9	16000	100	-0,25	-0,05	0,18	-0,32	-0,17	-0,4	-0,13	-0,28	-0,26	-0,25	0,08

Lentelėje žaliai pažymėti matmenys, kurie buvo arčiausiai nominalo. Matyti, kad trečiuoju režimu detalė buvo apdirbta tiksliausiai. Tą patį rodo ir pagal gautus duomenis sudarytas

grafikas, kur matyti, kad trečiasis režimas, pavaizduotas šviesiai žalia linija, yra arčiausiai nulio, tai yra nominalaus matmens (65 paveikslas).

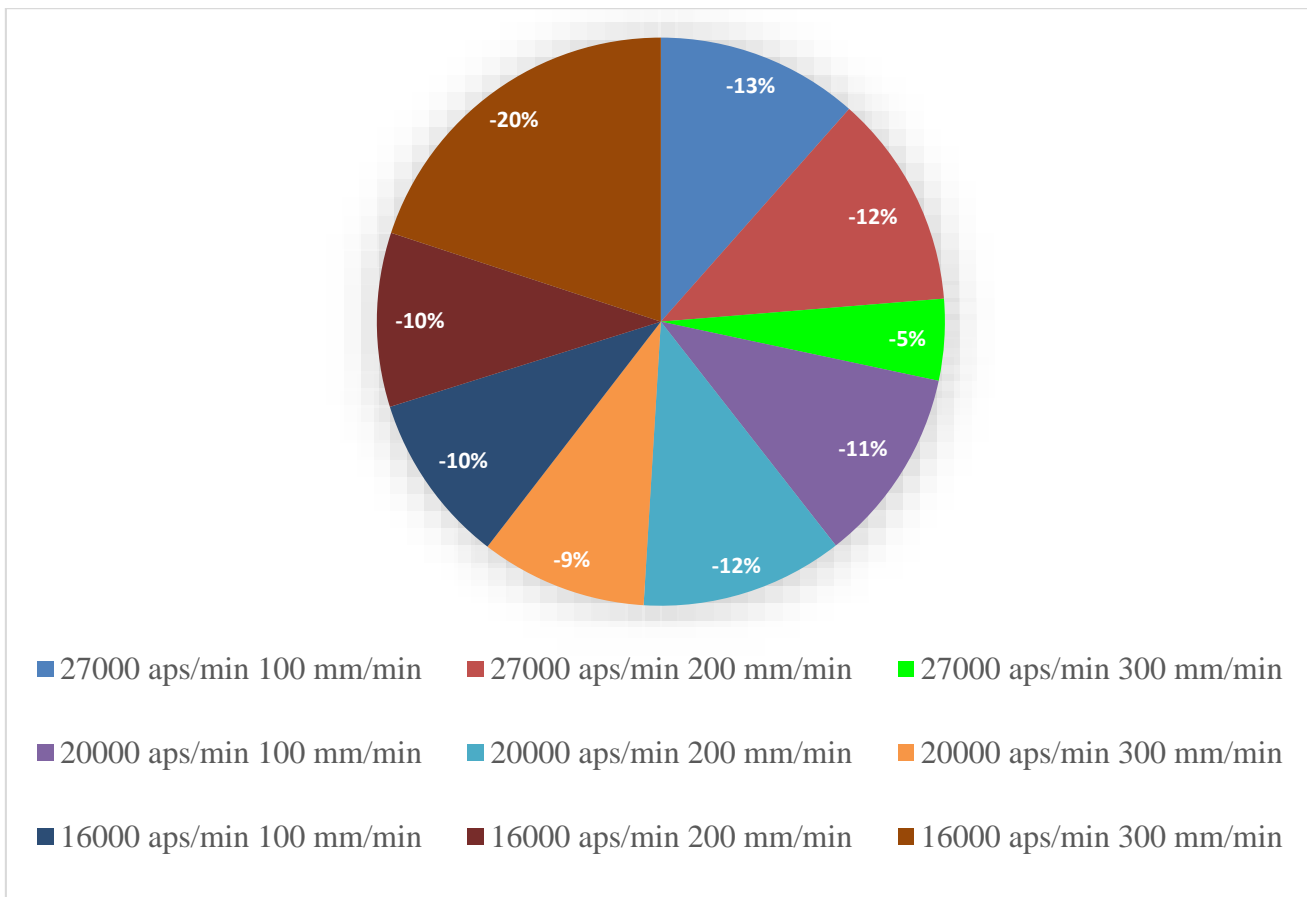


65. pav. Matmens paklaidų grafikas

Išvedus vidutinę kiekvieno režimo paklaidą visiškai įsitikinta, kad trečiuoju režimu su didžiausiomis apskomis per minutę ir lėčiausia pastūma gaunami tiksliausi rezultatai.

14 lentelė. Vidutinės režimo paklaidos

	$S, \text{aps/min}$	$V_f, \text{mm/min}$	Vidutinė režimo paklaida
1	27000	300	-0,09727
2	27000	200	-0,10273
3	27000	100	-0,03909
4	20000	300	-0,09364
5	20000	200	-0,09727
6	20000	100	-0,08
7	16000	300	-0,08182
8	16000	200	-0,08364
9	16000	100	-0,16818

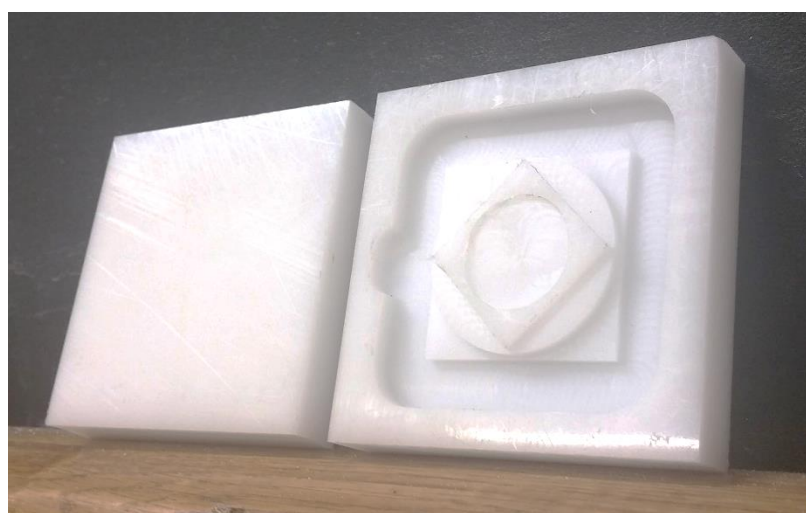


66. pav. Vidutinės režimo paklaidų grafikas

Išsirinkus optimalų režimą tyrimas tęsiamas apdirbant dvidešimt vienetų tokių pačių kvadrato-apskritimo-rombo bandyminių detalių šiuo režimu. Išmatavus ir suvedus duomenis į lentelę gauname tokius rezultatus.

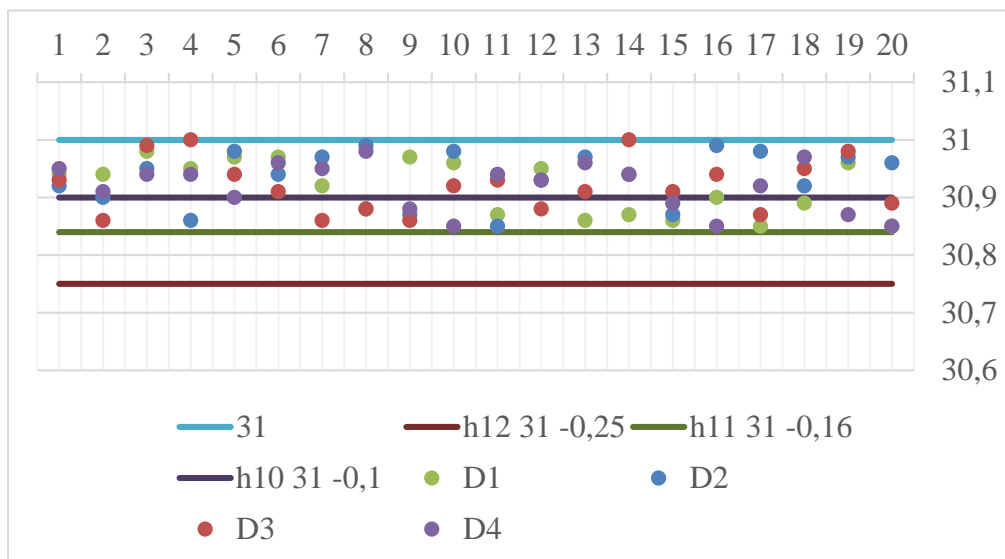
15 lentelė. Bandyminių detalių duomenys

Nominalas	18	18	21	21	32	32	31	31	31	31	2
Matmuo	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	D3	D4	E
1	17,98	17,95	21	20,99	31,95	31,89	30,94	30,92	30,93	30,95	2,01
2	17,94	17,96	20,98	21,00	31,99	31,87	30,94	30,9	30,86	30,91	2,03
3	17,91	17,98	20,97	21,01	31,97	31,86	30,98	30,95	30,99	30,94	2,08
4	17,94	17,99	20,94	20,89	31,97	31,9	30,95	30,86	31	30,94	2,14
5	18	18,01	20,99	21,00	31,96	32	30,97	30,98	30,94	30,9	2,09
6	17,92	18,01	20,97	21,00	31,95	32	30,97	30,94	30,91	30,96	2,1
7	17,93	17,97	21,06	20,97	31,88	31,93	30,92	30,97	30,86	30,95	2,06
8	18	17,92	20,89	20,94	31,92	31,91	30,88	30,99	30,88	30,98	2,03
9	17,97	17,96	21,08	21,01	31,95	31,88	30,97	30,87	30,86	30,88	2,13
10	17,96	17,96	21,02	20,95	31,94	31,93	30,96	30,98	30,92	30,85	2,02
11	17,96	17,99	20,98	20,9	31,86	32	30,87	30,85	30,93	30,94	2,1
12	18	17,93	20,91	20,93	31,98	31,95	30,95	30,93	30,88	30,93	2,11
13	17,93	17,95	20,92	20,88	31,93	31,98	30,86	30,97	30,91	30,96	2,12
14	17,94	17,91	20,90	20,91	31,97	31,87	30,87	30,94	31	30,94	2,07
15	17,92	17,92	20,88	20,89	31,86	31,85	30,86	30,87	30,91	30,89	2,07
16	17,97	17,91	20,87	20,9	31,95	31,91	30,9	30,99	30,94	30,85	2,15
17	17,93	17,98	20,88	21,01	31,9	31,89	30,85	30,98	30,87	30,92	2
18	17,93	17,97	20,89	21,02	31,85	31,92	30,89	30,92	30,95	30,97	2,02
19	17,98	17,97	21,00	20,99	31,85	31,99	30,96	30,97	30,98	30,87	2
20	17,99	17,95	20,9	20,88	31,95	31,92	30,85	30,96	30,89	30,85	2,02

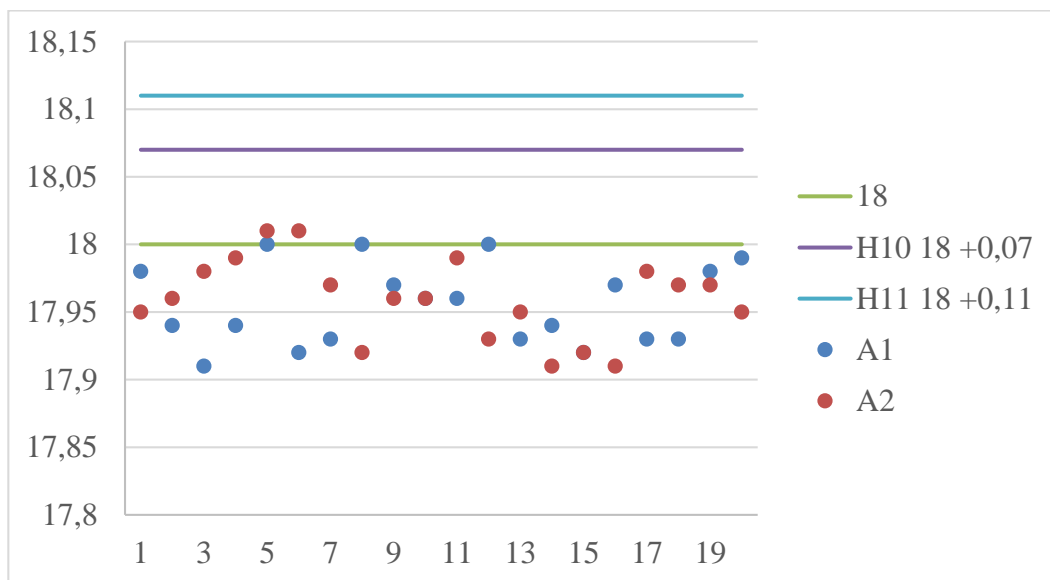


67. pav. Ruošiny ir pagaminta detalė

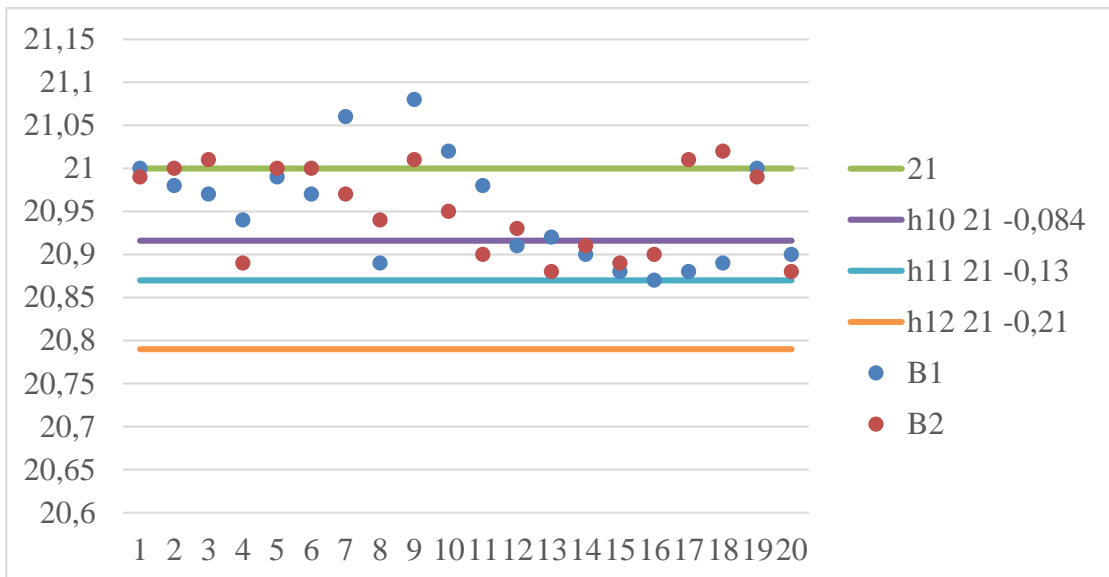
Suvedus visų vienuolikos matmenų rezultatus į grafikus ir sulyginus su ISO 268-1 standarto tikslumo kvalitetais matyti, kad visi gauti rezultatai neperžengia atitinkamų savų dydžių veleno ir skylės H11 ar h11 tolerancijų.



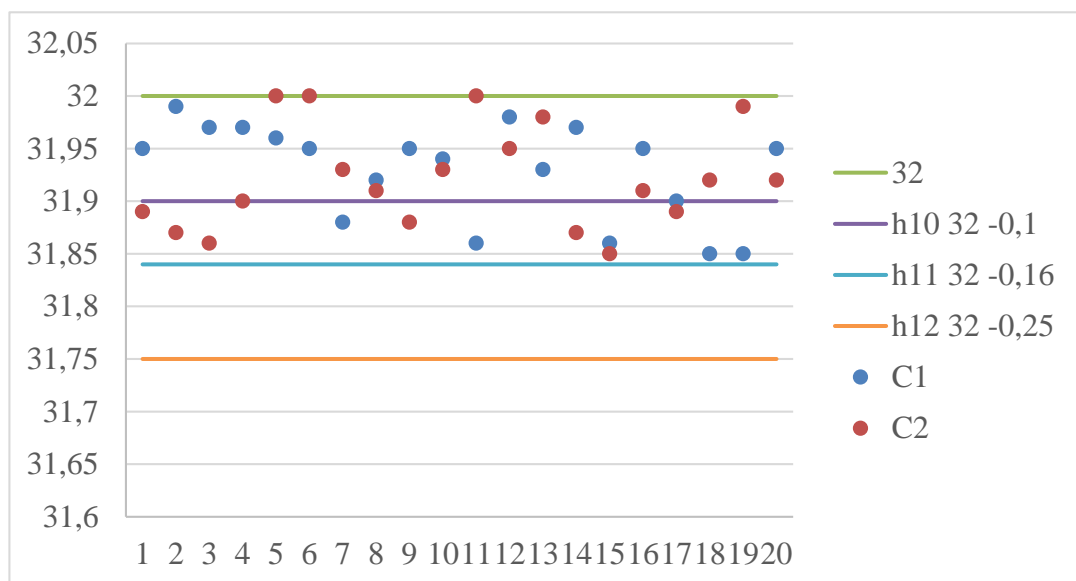
68. pav. Paklaidų rezultatai tikslumo kvalitetų atžvilgiu



69. pav. Paklaidų rezultatai tikslumo kvalitetų atžvilgiu



70. pav. Paklaidų rezultatai tikslumo kvalitetų atžvilgiu



71. pav. Paklaidų rezultatai tikslumo kvalitetų atžvilgiu

Išvedus vidutinę matmenų paklaidą buvo gautas vidutinis $\pm 0,05164$ mm apdirbimo tikslumas. Toks tikslumas su atitinkamu programavimu ir kompensacijos naudojimu leidžia eksploatuoti stakles gaminant įvairias mažų gabaritų detales iš poliacetalio. Geriausias pritaikymas būtų aksesuarų frezavimas ir graviravimas.

IŠVADOS

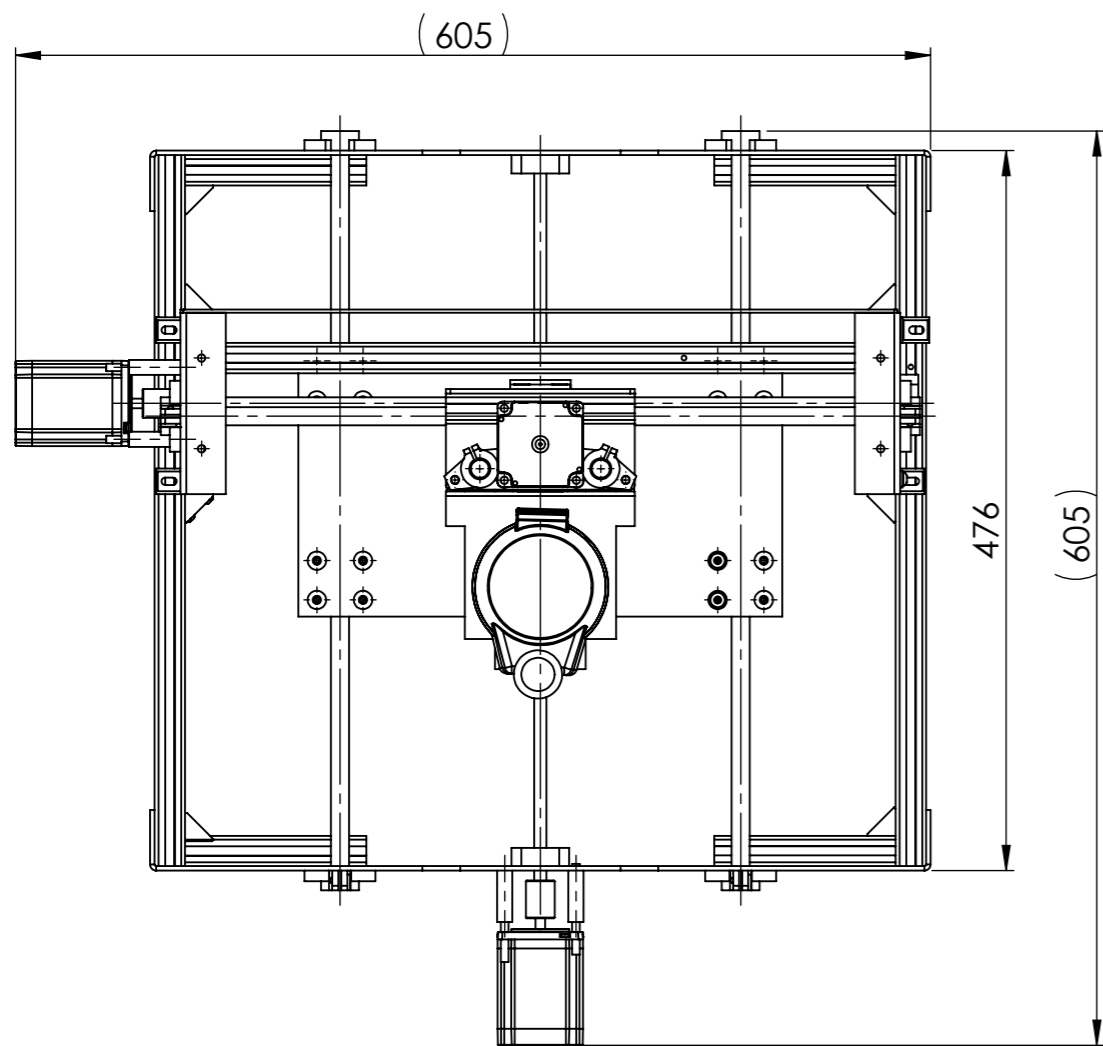
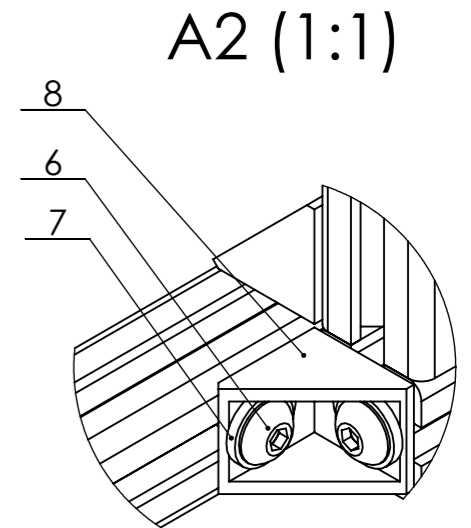
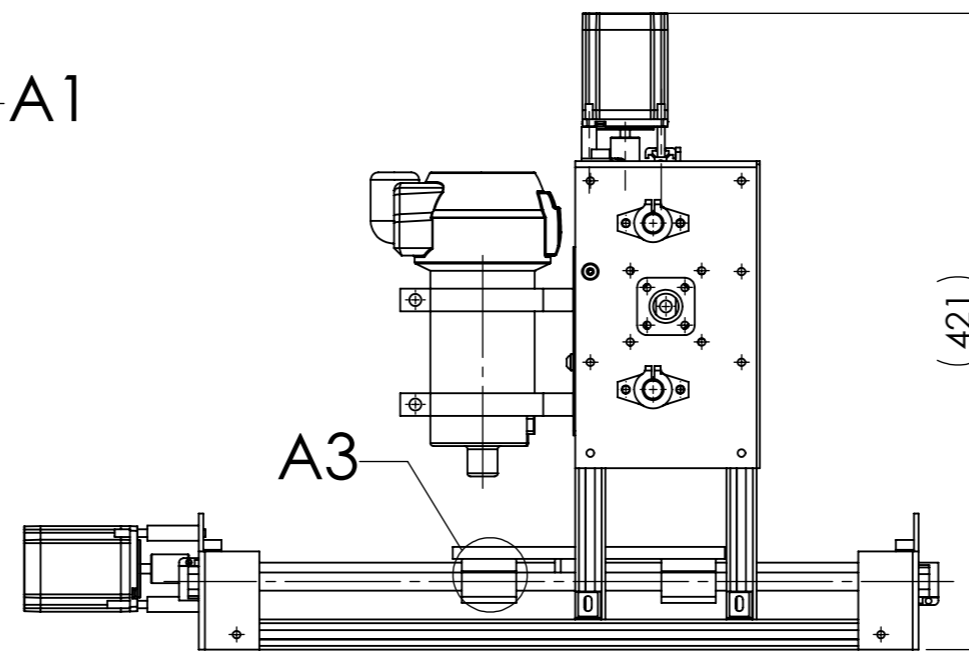
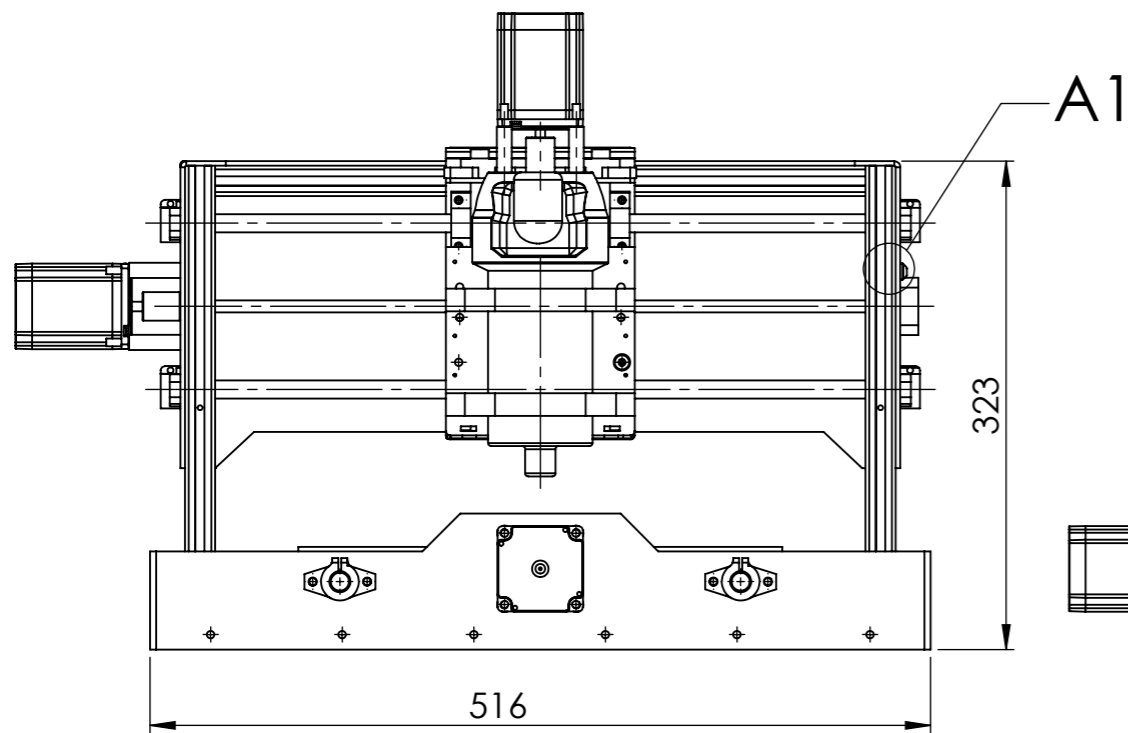
1. Atlikta CNC staklių, jų konstrukcijos, valdymo ir poliacetalio apdirbimo apžvalginė analizė, po kurios buvo nuspręsta, kad pasiūloje yra poreikis CNC staklių polimerams apdirbti. Pasirinkta preliminari staklių konstrukcija, reikalingi komponentai ir programinė įranga, staklėms valdyti.
2. Kompiuterine įranga suprojektuotas pirminis CNC staklių variantas. Atliktas pradinis CNC staklių kompiuterinis statinis stiprumo tyrimas *Solidworks Simulation* aplinkoje. Nenustatyta, kad konstrukcijoje būtų plastinių deformacijų.
3. Atlikus skaičiavimus parenkami žingsniniai varikliai su sraigtinėmis pavaromis.
4. Sukonstruojamas staklių prototipas. Staklių sąmata - 689 eurai yra žymiai mažesnė nei pasiūloje esančių panašių staklių.
5. Apskaičiuota pjovimo jėga, atsirandanti frezuojant poliacetalį, devyniais skirtingais frezavimo režimais. Didžiausia gauta pjovimo jėgos vertė – 20,53 N. Sudaryta įrankio apsisukimų, pastūmos bei jėgos priklausomybė.
6. Kiekvienu apdirbimo režimu išmatuoti įlinkiai laikrodiniu indikatoriumi bei naudojantis *SolidWorks 2016* programa, surasti maksimalūs įlinkiai kiekvieno režimo metu. Maksimalūs įlinkiai siekia 0,08 mm.
7. Atlikta regresinė statistinė sklaidos analizė, kuri parodė, kad iš dviejų faktorių, turinčių įtakos staklių konstrukcijos įlinkiams, apsisukimų skaičiaus ir pjovimo pastūmos, didesnę įtaką turi pjovimo pastūma.
8. Kiekvienu apdirbimo režimu apdirbamos devynios vienodos detalės ir slankmačiu išmatuojamas apdirbimo tikslumas. Pagal gautus įlinkius ir apdirbimo tikslumą kiekvienu apdirbimo režimu, išrenkamas optimalus darbinis režimas su 27000 apsisukimų per minutę ir 100 milimetrų per minutę pastūma.
9. Optimaliausiu darbinio režimu apdirbamos 20 vienetų vienodų detalių ir išmatuojamas staklių tikslumas frezuojant poliacetalį, kuris neviršija h11 ir H11 tikslumo tolerancijų.
10. Išvedama vidutinė matmenų paklaida - $\pm 0,05164$ mm, apdirbinėjant detales su nominaliais matmenimis tarp 18 ir 30 mm.
11. Pasiūlytas staklių tobulinimo sprendimas. Norint padidinti staklių tikslumą reiktų didinti kreipiančiųjų ir linijinių guolių standumą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

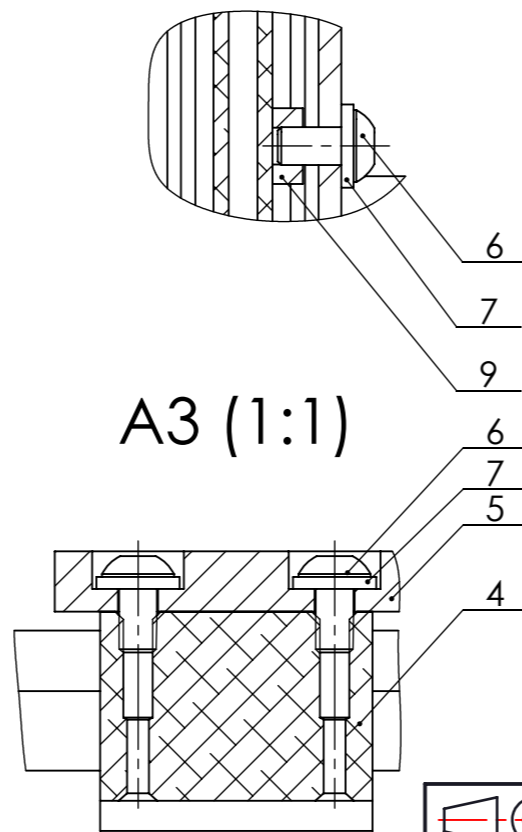
1. Ostaševičius V., Dundulis R. Technologiniai įrenginiai ir įrankiai. Kaunas: Technologija, 2004.
2. Stačiakampiai aliuminio strypai. *Spmet* internetinė parduotuvė. <http://spmet.lt/lt/prekyba/spalvotieji-metalai/aliuminis/strypai-staciakampiaikvadratiniai/>
3. Žiliukas P. ir kt. Mašinų elementai: analizė, konstravimas ir taikymas. Kaunas: Technologija, 2002, 149 p.
4. J. Dulevičius ir P. Žiliukas Mašinų elementai: skaičiavimai ir konstravimas. Ats. red.: Kaunas: Technologija. 2006, 486 p.
5. Olufemi B. Akinnuli, Tunde C. Akintayo. Design of a Keypad Operated CNC Drilling Router. 2015.
6. Mokšin V., Marcinkevičius A. H., Jurevičius M. Šiuolaikiniai skaitmeninio valdymo apdirbimo centrai ir jų programavimas, 2012.
7. Dusevičius D., Medžiagų apdirbimas CNC staklėmis. CNC staklių programavimas, 2014.
8. Skačkovas V., Sabaliauskas A., Technologinių įrenginių konstrukcijų atlasas, 2008.
9. Williams J., Gossett S. CNC Machine Design Proposal, 2009.
10. Aliuminų markės <http://www.amarimetals.lt/aliuminis> [2016.01.03].
11. M. Sayuti, Tomohisa Tanaka, Ahmed A. D. Sarhan, Yoshio Saito, M. Hamdi. Surface Quality Improvement in CNC End Milling Machined Aerospace AL-2017-T4 Alloy using Carbon Onion Nanolubrication with DLC Cutting Tool. 2012. p. 3-4.
12. Polimidai <http://heliopolis.lt/products/poliamid-as-pa-6/>
13. http://www.igus.lt/wpck/4817/econovate_iglidur
14. Alain A. Understanding CNC routers, FPIInnovations – Forintek Division, p. 69-71 <http://www.solutionsforwood.com/docs/reports/UnderstandingCNCRouters.pdf>
15. Olufemi Vincent A. Balogun,, Tunde C. Akintayo. Design of a Keypad Operated CNC Drilling Router, Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology, Akure, Nigeria. 2015, p. 7-8.
16. Švagždytė I., Jurevičius, M. Pjovimo režimų įtakos paviršių makrogeometriniams nuokrypiams.
17. Slankmačio dokumentacija: <http://www.farnell.com/datasheets/1661929.pdf>
18. Kiniečių internetinė parduotuvė http://www.aliexpress.com/store/group/CNC-router/704350_209802395.html
19. Fablab internetinė parduotuvė <http://fablabsf.org/equipment>
20. Internetinė parduotuvė <http://www.directindustry.com/prod/cnc-step-ek-3d-cnc-router-engraving-machines/product-64456-442354.html>

21. Heureka internetinė parduotuvė <http://dewalt.heureka.sk/frezky/>
22. MStools internetinė parduotuvė www.mstool.eu
23. P. Krasauskas. Experimental and statistical investigation of thermo-mechanical friction drilling process. Kaunas, 2011.

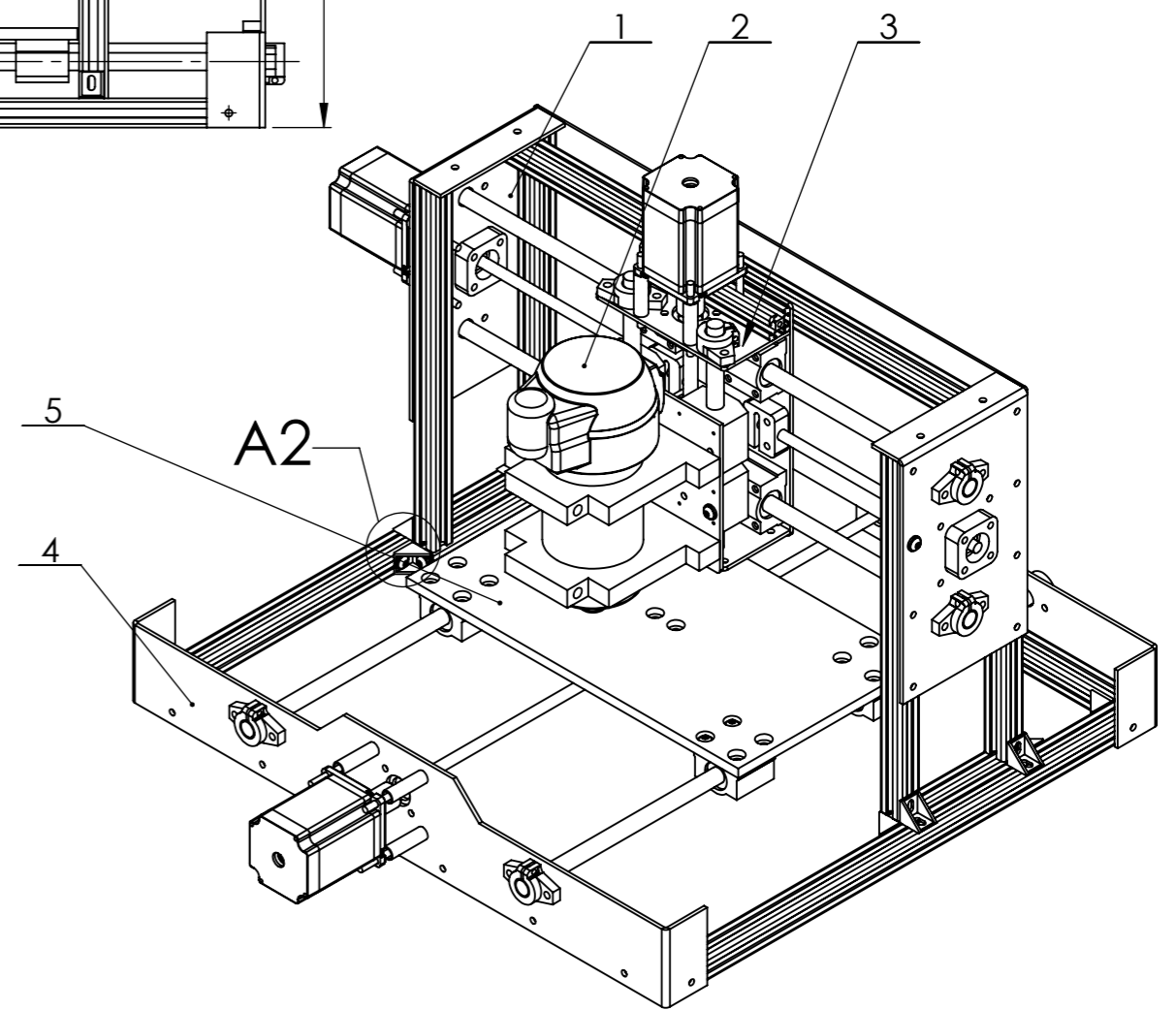
FORMATAS	ZONA	POZICIJA	ŽYMĖJIMAS	PAVADINIMAS	SKAIČIUS	PASTABA	
				<u>Dokumentacija</u>			
A3			PS-00.00.000 SB	Bendro vaizdo brėžinys			
				<u>Junginiai</u>			
		1	PS-00.01.000	Y ašies blokas	1		
		2	PS-00.02.000	Sūklbio blokas	1		
		3	PS-00.03.000	Z ašies blokas	1		
		4	PS-00.04.000	X ašies blokas	1		
				<u>Detalės</u>			
		5	PS-00.00.006	X ašies darbinė plokštuma	1		
				<u>Standartiniai gaminiai</u>			
		6		Varžtas ISO 7380 M5x10	32		
		7		Poveržlė ISO 10673-5.5-S	32		
				<u>Kiti gaminiai</u>			
		8		Profilių jungimo kampas 20x20	16	Doldeknek	
		9		Profilio veržlė M5	32	Doldeknek	
Atsakinga žinyba MIK		Konsultantas		Dokumento tipas Detalių sąrašas		Dokumento statusas Informacinis	
Savininkas KTU		Rengė Marius Snapkauskas		Antraštė Programinės staklės		PS-00.00.000	
		Tvirtino Sigitas Kilikevičius				Laida A	Data 2015-05-31
						Kalba lt.	Lapas 1/1



A1 (1:1)



A3 (1:1)



Bylos Nr.	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis
Atsakinga žinyba MIK	Konsultantas	Dokumento tipas Bendro vaidzo brėžinys	Dokumento statusas Informacinis
Savininkas KTU	Rengė Marius Snapkauskas Tvirtino Sigitas Kilikevičius	Antraštė Programinės staklės	PS-00.00.000 SB
		Laida A	Data 2016-06-01 Kalba lt. Lapas 1/1