



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Karolis Dubinskas**

**CNC METALO APDIRBIMO STAKLIŲ ĮRANKIO BŪKLĖ**  
**NUSAKANČIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**  
Prof. dr. Vytautas Markevičius

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**CNC METALO APDIRBIMO STAKLIŲ ĮRANKIO BŪKLĖ**  
**NUSAKANČIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Elektronikos inžinerija (621H61002)**

**Vadovas**

Prof. dr. V. Markevičius

**Recenzentas**

Lekt. dr. A. Noreika

**Projektą atliko**

Karolis Dubinskas

**KAUNAS, 2015**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Karolis Dubinskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija (621H61002)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „CNC metalo apdirbimo staklių įrankio būklę nusakančių parametru tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

2015-05-15

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Karolio Dubinsko** baigiamasis projektas tema „CNC metalo apdirbimo staklių įrankio būklę nusakančių parametru tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Dubinskas K. CNC metalo apdirbimo staklių įrankio būklę nusakančių parametrų tyrimas  
Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof .dr. V. Markevičius; Kauno technologijos  
universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. 64 psl.

## SANTRAUKA

Didelė dalis metalo apdirbimo įmonių susiduria su neefektyvaus darbo ir mažo darbo našumo problema, kurią išspręsti galėtų sistema, stebinti metalo apdirbimo mašinos ir įrankio būklę. Siekiant sukurti tokią sistemą, būtina ištirti fizikinius dydžius - temperatūrą kuo arčiau apdirbamo paviršiaus, vibracijas, atsirandančias apdirbant metalą ir pagrindinio variklio suvartojamą energiją.

Magistrinio darbo tikslas: nustatyti, ar temperatūros, vibracijų ir variklio sunaudojamos energijos kiekio stebėjimas leidžia spręsti apie metalo apdirbimo įrankių būklę.

Literatūros apžvalgoje atlikta analogiškos sistemos paieška rinkoje. Taip pat, apžvelgti ir pasirinkti jutikliai, galintys išmatuoti įrankio būklės analizei reikalingus parametrus tyrimo sąlygomis.

Sukurta eksperimentinė įranga, leidžianti matuoti temperatūrą, arti apdirbamo paviršiaus, vibracijas, atsirandančias apdirbimo metu ir užfiksuotą informaciją sauganti laikmenoje. Variklio sunaudojamos energijos tyrimui parinktas rinkoje esantis tinklo analizatorius, atitinkantis užsaiduotus reikalavimus.

Atliktas metalo apdirbimo mašinos įrankio būklės tyrimas, naudojant tris skirtingo diametro (8 mm, 10 mm, 12 mm) įrankius ir dvi skirtingas apdirbamąsias medžiagas – aliuminį ir plieną. Ištirta, ar temperatūra, arti apdirbamo paviršiaus, vibracijos, atsirandančios apdirbimo metu ir variklio sunaudojamos energijos kiekis gali būti laikomi parametrais, leidžiančiais spręsti apie apdirbimo įrankio būklę.

Dubinskas K. *Research of CNC metalworking machine status parameters*. Master's Final Project/leader Prof. .dr. V. Markevičius. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics, Department of Electronics Engineering.

Kaunas, 2015 64 psl.

## SUMMARY

Big part of metal processing companies faces with the inefficient labor and low work productivity problem, which can be solved by a system that observes the condition of metal processing machine and tool. In order to create such system, it is necessary to investigate the physical quantities - temperature as close to the work piece, the vibrations resulting from metal processing and the energy consumption of main motor.

The aim of masters work: to determine whether the observation of temperature, vibrations and the energy consumption of motor, allows to determinate the state of metal working tools.

The research of similar system in market was done in literature review. Also, the sensors, which can measure parameters that are required for analysis of tool state in test conditions, were reviewed and selected.

Experimental equipment that allows to measure the temperature close to the work piece, the vibrations arising during processing and to save captured information in medium was created. The analyzer, which is in market and correspond set point requirements, was selected for motor energy consumption research.

The research of metal processing machine tool condition was made by using three different diameter (8 mm, 10 mm, and 12 mm) tools and two differnt processed materials – aluminum and steel. It was investigated, if temperature, close to to the work piece, the vibrations resulting from metal processing and the energy consumption of main motor, may be considered as parameters that allows to determinate about tool state.

## Turinys

|  |    |
|--|----|
| ĮVADAS .....   | 5  |
| 1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA .....                         | 6  |
| 1.1 Panašios paskirties prietaisų ir jutiklių apžvalga .....   | 6  |
| Apibendrinimas .....   | 14 |
| 2. TYRIMO ĮRANGOS PROJEKTAVIMAS .....                          | 15 |
| 2.1 Struktūrinės schemos sudarymas .....                       | 15 |
| 2.2 Eksperimentinės įrangos elementinės bazės parinkimas ..... | 16 |
| Temperatūros jutiklis .....                                    | 16 |
| Vibracijų jutiklis .....                                       | 17 |
| Mikrovaldiklis .....   | 17 |
| Realaus laiko laikrodis (RTC) .....                            | 18 |
| 2.3 Vibracijų ir temperatūros registravimo įtaisai .....       | 18 |
| 3. EKSPERIMENTINIS ĮRANKIŲ BŪSENOS TYRIMAS .....               | 21 |
| 3.1 Tyrimo parametrai .....                                    | 23 |
| 3.2 Tyrimo eiga .....  | 24 |
| 3.2.1 Aštuonių milimetrų diametro frezos tyrimas .....         | 26 |
| 3.2.2 Dešimties milimetrų diametro frezos tyrimas .....        | 31 |
| 3.2.3 Dvylikos milimetrų diametro frezos tyrimas .....         | 36 |
| IŠVADOS .....  | 44 |
| LITERATŪROS SĄRAŠAS .....                                      | 47 |
| PRIEDAI .....  | 49 |
| Priedas 1. Eksperimentinės įrangos elektrinė schema .....      | 49 |
| Priedas 2. Metalų apdirbimo programos .....                    | 50 |
| Priedas 3. Apdirbimų režimų skaičiavimai .....                 | 52 |
| Priedas 4. 8 mm frezos vibracijų tyrimas .....                 | 53 |
| Priedas 5. 8 mm frezos energijos suvartojimo tyrimas .....     | 55 |
| Priedas 6. 10 mm frezos vibracijų tyrimas .....                | 57 |
| Priedas 7. 12 mm frezos vibracijų tyrimas .....                | 59 |
| Priedas 8. 10 mm frezos energijos suvartojimo tyrimas .....    | 61 |
| Priedas 9. 12 mm frezos energijos suvartojimo tyrimas .....    | 63 |

## IVADAS

„Lietuvos metalo apdirbimo įmonių našumas, lyginant su užsienio įmonėmis yra daugiau kaip keturis kartus mažesnis“ – teigia „Ernst & Young“ padaryta Lietuvos metalo apdirbimo sektoriaus analizė [1].

Lietuvoje metalo apdirbimo sektoriuje veikia 591 maža įmonė, 67 vidutinės įmonės ir 7 didelės įmonės. Didelė dalis įmonių susiduria su neefektyvaus darbo ir mažo darbo našumo problema. Norint išspręsti šią problemą, pirmiausia reikia likviduoti neplaninius serviso darbus ir dėl mechanizmų gedimų ar nevaldomų fizikinių reiškinių atsirandančias gaminių neatitiktis.

Metalo apdirbimo įmonėje UAB „Baltec CNC Technologies“ sugalvota minėtų problemų sprendimo idėja - sistema, stebinti metalo apdirbimo mašinos ir įrankio būklę. Manoma, kad įrankio netikimą gamybos procesui, galima aptikti stebint tam tikrus fizikinius reiškinius, tokius kaip: temperatūra kuo arčiau apdirbamo paviršiaus, vibracijos, atsirandančios apdirbant metalą ir pagrindinio variklio suvartojama galia.

Tokia sistema būtų labai naudinga šiuolaikinėje metalo apdirbimo pramonėje, nes šiuo metu jokia sistema, galinti atpažinti jau nebetinkamą metalo apdirbimui įrankį, nėra pasiekama vartotojui. Šį darbą atlieka mašiną valdantis operatorius, kuris vien tik savo klausos ir patyrimo pagalba apdirbimo metu nusprendžia ar įrankis yra tinkamas naudojimui. Siekiant įgyvendinti šios sistemos idėją, atliktas veiksnių, nusakančių apdirbimo įrankio būklę, tyrimas.

Darbo tikslas: nustatyti, ar temperatūros, vibracijų ir variklio sunaudojamos galios stebėjimas leidžia spręsti apie metalo apdirbimo įrankių būklę.

Darbe sprendžiami uždaviniai:

- Ištirti rinką, surasti ir išanalizuoti sistemas, galinčias nustatyti metalo apdirbimo įrankio būklę;
- Pagal tyrimo objektą ir tyrimo sąlygas, užsiduoti jutikliams reikalavimus.
- Išanalizuoti ir pasirinkti jutiklius, kuriuos būtų galima pritaikyti reikalingų įrankio būklei nustatyti parametrų matavimui;
- Sukurti eksperimentinę įrangą – suprojektuoti elektrinę-principinę schemą, sudaryti spausdintino montažo schemą, sukurti programą ir pagaminti įrangą;
- Sukurta eksperimentinė įranga atlikti frezavimo įrankio būklės tyrimą, leidžiantį spręsti, ar temperatūra, vibracijos ir variklio energijos sunaudojimas yra tinkami parametrai įrankio būklei nustatyti.
- Aptarti ištirtų parametrų panaudojimo sistemoje, kuri stebėtų ir nusakytų įrankio būklę, galimybes.

# 1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Metalu paviršius apdirbamas įvairaus tipo frezomis, grąžtais, kurių būklė smarkiai nulemia galutinę gaminio kokybę. Netinkamas įrankis apdirbimo procese pradeda kaisti nuo per didelių apkrovų ir metalo apdirbimo režimų bei sukelia vibracijas. Dėl to atsiranda netolygiai nufrezuoti paviršiai bei netikslūs gaminių matmenys.

Norint nustatyti įrankio būklę susidursime su trijų skirtingų fizikinių dydžių matavimo būtinybe: temperatūros, vibracijos ir srovės. Šių fizikinių dydžių matavimui yra daugybė atskirų sistemų galinčių stebėti tam tikrą fizikinį reiškinį, o taip pat ir skirtingų jutiklių, kurie juos paverčia analoginiais arba skaitmeniniais signalais. Pagal šiuos signalus galima matyti, kokia temperatūra yra matavimo vietoje, kokios vibracijos veikia įrankį ar kokį elektros energijos kiekį vartoja pagrindinis variklis.

## 1.1 Panašios paskirties prietaisų ir jutiklių apžvalga






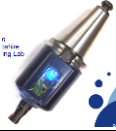




Norint stebėti apdirbamo paviršiaus temperatūrą ir vibracijas reikalingas įrenginys, kurį būtų galima tvirtinti prie besisukančios CNC mašinos ašies. Jis turi būti lengvai integruojamas į mašinos įrankio laikiklį ar ant jo. Taip pat svarbu atsižvelgti ir į tai, kad metalo apdirbimo aplinka nėra tinkama matavimams, atliekamiems bekontakčiu matavimo būdu, nes ši aplinka yra veikiamą aukšto spaudimo emulsijos srove.

Vienas iš veiksnių nusakančių įrankio būklę yra padidėjęs pagrindinio variklio suvartojamos energijos kiekis. Tai vyksta dėl didesnio pasipriešinimo, tenkančio įrankiui prie tokių pačių apdirbimo režimų. Šiuos kitimus galima užfiksuoti srovės matavimo jutikliais, integruotais pagrindinio variklio galios grandinėje. Pastaruoju metu tiek nuolatinės, tiek kintamos srovės matavimui sukurti metodai, kurie leidžia matuoti srovę nenutraukiant grandinės, naudojant įvairius magnetinio lauko keitiklius. Jutikliui keliami techniniai reikalavimai - didelis matavimo diapazonas (nuo 0 iki 100 A) ir paprastas jutiklio integravimas į elektros variklio galios grandinę.

Atsižvelgiant į išsikeltus reikalavimus, atlikta keleto rinkoje esančių analogiškų funkcijų prietaisų analizė ir palyginimas.



**1.1 lentelė. Lyginamoji matuoklių charakteristikų lentelė**

| Matuoklis   | Pavadinimas                            | Temperatūros matavimo diapazonas (0-1000°C) | Matavimo paklaida ( $\pm 2,0^\circ\text{C}$ ) | Vibracijų matavimo galimybė | Srovės matavimo galimybė | Duomenų saugojimo galimybė | Duomenų apdorojimo galimybė |
|---|--|---|---|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|    | PT-21/22                               | +   | +   | -                           | -                        | +                          | -                           |
|    | PR-30A                                 | +   | +   | -                           | -                        | +                          | -                           |
|    | TOPSW-11,21                            | -   | +   | -                           | -                        | -                          | -                           |
|    | E5CWT                                  | +   | +   | -                           | -                        | -                          | -                           |
|    | MBT 5250                               | -   | +   | -                           | -                        | -                          | -                           |
|    | Wireless Sensor Integrated Smart Tools | +   | +   | +                           | -                        | +                          | +                           |
|  | Extech 461880                          | -   | -   | +                           | -                        | -                          | +                           |
|  | VB8200                                 | -   | -   | +                           | -                        | -                          | +                           |
|  | SVAN 946                               | -   | -   | +                           | -                        | +                          | +                           |
|  | PEL103                                 | -   | -   | -                           | +                        | +                          | +                           |

Atlikus įrankio būklę pagal vibracijas ir temperatūrą nusakančių sistemų apžvalgą, sistemos, kuri gali atpažinti „blogą“ įrankį ir apie tai pranešti vartotojui nerasta, tačiau kuriami eksperimentiniai modeliai, apie kuriuos išsamios informacijos prieinamose šaltiniuose nepateikta. Panašiausias prietaisas yra „Suprock technologies“ firmos „Smart tools holder“ eksperimentinis modelis, matuojantis temperatūrą, vibracijas ir pagal jų kitimus apsprendžiantis įrankio būklę [10]. Šis modelis matuoja temperatūrą termoporomis integruotomis į patį įrankį (žr. 1.1 pav.), o vibracijas – akcelerometru, integruotu įrankio laikiklyje.

Žinant, jog rinkoje atitiktumens, kuris tenkintų visus reikalavimus nėra, nutarta pasigaminti reikalingą sistemą patiems. Šiam tikslui įgyvendinti reikia pasirinkti temperatūros, vibracijų ir srovės jutiklius, kurie yra tinkami dirbti metalo apdirbimo aplinkoje bei pasižymi matavimams, kuriuos atliksime, tinkančiomis charakteristikomis.

Temperatūros matavimui reikalingas jutiklis, kuris gali matuoti temperatūrą iki 1000°C ir kurį būtų galima integruoti kuo arčiau apdirbamo paviršiaus.

Vibracijų jutiklis turi būti kuo mažesnių gabaritų (iki 4 x 4 mm) tam, kad jį būtų galima integruoti sistemos viduje.

Srovės matavimui parinktas literatūroje [9] rastas srovės matavimo prietaisas PEL103 atitinkantis išsikeltus techninius reikalavimus.

### **Temperatūros matavimo būdai**

Temperatūrą galima matuoti keliais skirtingais jutikliais [11]:

- termovaržiniais;
- optiniais;
- silicio varžiniais;
- termoporiniais;
- puslaidininkiniais ir t.t.

Termovaržiniai jutikliai. Šių jutiklių pranašumai yra signalo perdavimo grandžių paprastumas, jautrumas ir ilgalaikis stabilumas. Jie gali būti suskirstyti į tris grupes :

1. Varžiniai temperatūros jutikliai (Resistance Temperature Detectors - RTD);
2. pn sandūros jutikliai;
3. Termistoriai.

**Varžiniai temperatūros jutikliais** paprastai yra metalinės vijos arba ploni sluoksniai. Visų metalų varžos priklauso nuo temperatūros, tačiau dažniausiai naudojama platina, dėl gero atsikartojamumo, ilgalaikio stabilumo, patikimumo. Visi metalai turi teigiamus varžos koeficientus. Gamintojai gamina tokius varžinius temperatūros jutiklius:

1. Plonasluoksnės termovaržos dažnai gaminamos iš platinos ar jos lydinių ant tinkamo pagrindo.
2. Iš laido suvyniotos termovaržos, kuriose platinos vijos dalinai palaikomos stiklo kljais keraminio vamzdžio viduje. Tokios konstrukcijos jutikliai yra stabiliausi ir labiausiai naudojami pramonėje ir moksliniuose tyrimuose [11].

**Termistoriai.** Tai metalo oksido jutikliai, gaminami lašelių, stulpelių, cilindų, stačiakampių ir storų plėvelių pavidalo. Termistoriai gali turėti tiek neigiamą TVK (temperatūros

varžos koeficientas), tiek teigiamą TVK. Neigiamo TVK termistoriai yra labai netiesiški. Ekvivalentinė schema turi dvi pastovias varžas ir vieną priklausančią nuo temperatūros. Jie genda bėgant laikui - blogos kokybės termistoriai gali pasenti +1%/per metus. Kitas paklaidų šaltinis yra srovė, tekanti per termistorių ir šildanti jį. Termistoriai su teigiamu TVK gaminami iš polikristalinių keraminių medžiagų, kai pradinės medžiagos, paprastai bario titanatas arba kietieji bario ir stroncio titanatų tirpalai (didelės varžos medžiagos), paverčiamos puslaidininkiais pridėdant į juos priemaišų. Virš Kiuri temperatūros feroelektrinės kompozitinės medžiagos savybės greitai keičiasi paveikdamos ir medžiagos varžą, kuri pakinta keliasdešimt kartų [11].

Varžos kitimo nuo temperatūros kreivė paprastai neaprašoma matematiškai, todėl gamintojai pateikia tokius duomenis :

1. Nulinės galios varža  $R_{25}$ , esant  $25^{\circ}\text{C}$  temperatūrai, kai savaiminis šilimas nykstamai mažas;
2. Mažiausia varža ties apatiniu kreivės išlinkimo tašku;
3. Virsmo temperatūra tokia, kurioje varža pradeda greitai augti. Tai maždaug sutampa su Kiuri temperatūra. Virsmo temperatūros yra  $-30\dots+160^{\circ}\text{C}$  (pagal Keystone Carbon Co.).
4. TVK aprašomas įprasta formule  $\alpha = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T}$ . Jis žymiai kinta nuo temperatūros ir dažnai

nurodomas viduriniame greito varžos kitimo atkarpos taške  $x$ .

5. Didžiausia elektrinė įtampa  $E_{maks}$ , kurią jutiklis atlaiko bet kokioje temperatūroje.
6. Šiluminės charakteristikos aprašomos šilumine talpa, nuostolių konstanta  $d$  ir šilumine laiko pastoviaja  $t_T$  [11].

Puslaidininkiniai pn sandūrų jutikliai. Puslaidininkiniame diode ar tranzistoriuje varža labai kinta dėl temperatūros. Didelis pranašumas yra priklausomybės tiesiškumas. Dėl to tokius jutiklius lengva kalibruoti. Puslaidininkinio temperatūros jutiklio LM35 nuotrauka pateikta 1.11 paveiksle.

Srovė per diodą priklauso nuo prijungtos įtampos ir temperatūros. Dažniausiai jautrio vertė silicio jungčiai, per kurią teka  $10\mu\text{A}$  srovė, yra  $b = -2,3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ , ir krenta iki maždaug  $b = -2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ , kai srovė  $1\text{mA}$  [11].

Optiniai jutikliai. Jie tinka naudoti tuomet, kai elektriniai signalai iš matavimo vietos gali turėti stiprius elektromagnetinius trukdžius.

Optinius jutiklius paprastai sudaro dvi dalys: siųstuvas ir imtuvas. Kai kurių tipų ir paskirties jutikliams papildomai reikia reflektorių ir šviesolaidžių. Siųstuvas ir imtuvas montuojami viename korpuse (difuzinių optinių ir atspindžio optinių jutiklių) arba atskiruose (šviesos barjero optinio jutiklio). Siųstuve yra raudonųjų arba infraraudonųjų spindulių šviesos šaltinis. Pagal optikos dėsnius, spinduliai sklinda tiesiomis linijomis ir gali būti nukreipiami,

fokusuojami, pertraukiami, atspindimi ir praleidžiami. Paskleistą šviesą priima imtuvas, ir atskirta nuo aplinkos šviesos fono ji elektroniškai apdorojama [11].

Fluorooptinių jutiklių pagrindu yra ypatingo fosforo mišinio savybė išspinduliuoti fluorescencinį signalą ji apšvietus ir sužadinus šviesa. Atsako impulso forma yra temperatūros funkcija. Pagal šviesos impulso gesimo greitį sprendžiama apie paviršiaus temperatūrą.

Apšviečianti ir išspinduliuojama šviesa yra skirtingų bangų ilgių. Šviesa gali būti praleidžiama šviesolaidžiu. Galima matuoti su  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  paklaida be kalibravimo  $-200\dots+400^{\circ}\text{C}$  ruože.

Termocheminis tirpalas ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) sugeria šviesos bangas 400...800nm šviesos bangų ilgių ruože priklausomai nuo temperatūros. Tirpalas pritaikomas prie objekto, o šviesa perduodama šviesolaidžiais. Matuojama 25...60 $^{\circ}\text{C}$  temperatūrų ruože[2].

Termoporos. Termoporų veikimo principas pagrįstas Zeebeko efektu, kuris teigia, kad tuo atveju, kai yra lygiagrečiai sujungiamos dviejų skirtingų metalų poros ir jos yra talpinamos skirtingose temperatūrose, tai uždaroje grandinėje yra sukuriama termoelektrovaros jėga, kuri dar vadinama Zeebeko EVJ. Žinant tai, galima spręsti, jog idealiausiu atveju išmatuoti temperatūrą pavyktų tik tuomet, kai vienas iš termoporos išėjimų būtų 0 $^{\circ}\text{C}$ . Kadangi to užtikrinti negalima, yra sukurta įvairių integrinių grandynų, kurie kompensuoja šaltojo galo temperatūrą. Tuose pačiuose grandynuose yra suprojektuoti ir stiprintuvai, kurie stiprina termoporos išėjimo įtampos kitimą proporcingai matuojamai temperatūrai arba sukuriamos sąsajos komunikuojančios su mikroprocesoriais.

**1.2 lentelė.** Dažniausiai naudojamų termoporų tipai

| Aktyvus metalas  | Pasyvus metalas | Tikslumas                       | Ribos $^{\circ}\text{C}$ (išplėtimas) | Komentarai  |
|------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|
| <b>Pt, 30%Rh</b> | Pt, 6%Rh        | 0.5%<br>>800 $^{\circ}\text{C}$ | 50 iki 1820<br>(1 iki 100)            | Geros esant aukštai temperatūrai                                      |
| <b>W, 5%Re</b>   | W, 26%Re        | 1%<br>>425 $^{\circ}\text{C}$   | 0 iki 2315<br>(0 iki 870)             | Naudojamos labai aukštoje temperatūroje, trapios.                     |
| <b>W, 3%Re</b>   | W, 25%Re        | 1%<br>>425 $^{\circ}\text{C}$   | 0 iki 2315<br>(0 iki 260)             | Naudojamos labai aukštoje temperatūroje, trapios.                     |
| <b>Ni, 10%Cr</b> | Cu, 45%Ni       | 0.5% or 1.7 $^{\circ}\text{C}$  | -270 iki 1000<br>(0 iki 200)          | Bendrosios paskirties, naudojamos žemose ir vidutinėse temperatūrose. |

|                             |                          |                   |                               |   |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------|---|
| <b>Fe</b>                   | Cu, 45%Ni                | 0.75% or<br>2.2°C | -210 iki 1200<br>(0 iki 200)  | Naudojamos aukštoje temperatūroje.  |
| <b>Ni, 10%Cr</b>            | Ni, 2%Al<br>2%Mn<br>1%Si | 0.75% or<br>2.2°C | -270 iki 1372<br>(0 iki 80)   | Bendrosios paskirties, naudojamos aukštoje temperatūroje, galima naudoti oksiduojančioje aplinkoje. |
| <b>Fe</b>                   | Cu, 45%Ni                | 0.4% or 1.5°C     | 0 iki 900                     | Panašios į J tipo termoporą.  |
| <b>Ni, 14%Cr<br/>1.5%Si</b> | Ni,<br>4.5%Si<br>0.1%Mg  | 0.75% or<br>2.2°C | -270 iki 1300<br>(0 iki 200)  | Santykinai naujo tipo, K tipo termoporos analogai.  |
| <b>Cu</b>                   | Cu, 45%Ni                | 0.75% or<br>1.0°C | -270 iki 400<br>(-60 iki 100) | Geros bendros paskirties termoporos skirtos žemai temperatūrai, atsparios drėgmei.                  |

*Medžiagų žymėjimai: - Al - Aliuminis, Cr - Chromas, Cu - Varis, Mg - Magnis, Mo – Molibdenas, Ni - Nikelis, Pt - Platina, Re - Renis, Rh - Rodis, Si - Silicis, W – Volframas.*

Tinkamam termoporų naudojimui pateikiami trys dėsniai :

*1 dėsnis* : Termoelektrinė srovė negali atsirasti homogeninėje grandyje vien tik nuo šilumos. Jungtis iš skirtingų medžiagų gali sukelti termosrovę.

*2 dėsnis* : Algebrinė termo evj suma grandyje iš įvairių medžiagų lygi nuliui, jei visos sandūros yra vienodoje temperatūroje.

*3 dėsnis* : Jei dvi sandūros temperatūroje  $T_1$  ir  $T_2$  sukelia Sebeko įtampą  $V_2$ , o temperatūros  $T_3$  ir  $T_4$  sukelia įtampą  $V_1$ , tai temperatūros  $T_1$  ir  $T_3$  sukels įtampą  $V_3 = V_1 + V_2$ . Tai leidžia termoporą kalibruoti vienoje temperatūroje, o naudoti kitame temperatūrų ruože.

Visa termoporinio jutiklio detalių grupė yra tokia: jautrusis elementas, apsauginis vamzdis (keraminis arba metalinis), termošuliny, prijungimo gnybtai[12].

### 1.3 lentelė. Jutiklių palyginimas

| Sensorių tipas                       | Išėjimas | Matavimo ribos °C | Paklaida ±°C | Atsparumas | Kaina    |
|--------------------------------------|----------|-------------------|--------------|------------|----------|
| <b><u>Termoporos</u></b>             | 40μV/°C  | -270 iki 2300     | 1.5          | Aukštas    | Žema     |
| <b><u>Platinos termovaržinis</u></b> | 0.4%/°C  | -200 iki 600      | 0.2          | Vidutinis  | Vidutinė |

|  |                           |                  |                    |           |          |
|--|---------------------------|------------------|--------------------|-----------|----------|
| <b><u>Nickelio termovaržinis</u></b>                 | 0.4%/°C                   | -200 iki 600     | 0.3                | Vidutinis | maža     |
| <b><u>Thermistoriai</u></b>                          | 5%/°C                     | -50 iki 200      | 0.2                | Aukštas   | vidutinė |
| <b><u>Puslaidininkinis</u></b>                       | 10mV/C arba<br>1μA/°C     | -40 iki 125      | 1.5                | Vidutinis | Maža     |
| <b><u>Bekontaktis - infraraudonųjų spindulių</u></b> | mV                        | 0 iki 6000+      | 2                  | Žemas     | Didelė   |
| <b><u>Kriogeninis</u></b>                            | Įvairūs išėjimo variantai | -273.15 iki -200 | Įvairi, iki ±0.001 | Įvairus   | Įvairi   |
| <b><u>Bimetalinis</u></b>                            | Metalo plėtimosi          | -100 iki 300     | 2                  | Aukštas   | Žema     |

Apibendrinami temperatūros matuojančius jutiklius iš 1.3 temperatūros daviklius palyginančios lentelės matome, jog reikalingas (iki 1000<sup>0</sup>C) temperatūros matavimo ribas turi tik termoporiniai ir bekontaktiniai - infraraudonųjų spindulių jutikliai.

Kadangi mašinos darbo metu apdirbamas paviršius gausiai aušinamas emulsija, temperatūrą išmatuoti darbiname paviršiuje bekontaktiniu – infraraudonųjų spindulių davikliu negalima. Dėl šios priežasties lieka tik vienas jutiklis, kuris atitinka reikalingas matavimų ribas. Termopora matuoja temperatūrą ribose 0 - 2315<sup>0</sup>C. Nedidelis šio jutiklio dydis tenkina poreikį įmontuoti jį į apdirbimo įrankį.

### **Vibracijų matavimo būdai**

Pramonės mašinų sukeltos vibracijos yra esminiai rodikliai mašinų ir įrankių ilgaamžiškumui bei gaminamų gaminių kokybei. Įrankių monitoringo sistemos, kurios leistų įrašyti ir stebėti per tam tikrą laiką atsiradusį vibracijos pokytį, leistų aptikti galimus įrankio ar pačios besisukančios ašies išdilimus, kas padėtų išvengti galimų neatitikčių gaminyje ar didesnių gedimų mašinoje, kurios neplaninis sustabdymas įmonei atneštų didelius nuostolius.

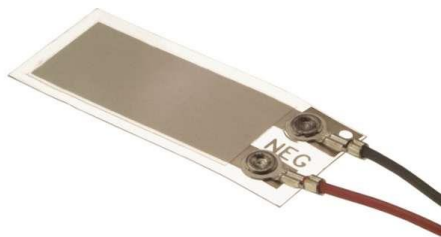
Vibracijos analizė - tai priemonė, kuri padėtų nustatyti mašinos ar įrankio būklę, kuri neleis atsirasti neatitikimams gaminiuose ir padės išvengti netikėtų mašinų gedimų.

Vibracijas nusako trys parametrai: greitis, pagreitis ir poslinkis. Kadangi šie parametrai yra matematiškai susiję, vibraciją gali nustatyti visi jutikliai, matuojantys greitį, pagreitį ir

poslinkį. Jutiklio pasirinkimas priklauso nuo vibracijos dažnio ir jutiklio išėjime galimo signalo lygio.

Vibracijas galima matuoti pjezo elektriniais jutikliais ar akcelerometrais.

Pjezo elektriniai jutikliai. Pjezo elektriniai jutikliai pramonėje gali veikti pačiose nepalankiausiose sąlygose. Jų darbui nekenkia nešvara, tepalai ar klimato reiškiniai. Jutikliai dirba labai plačiame temperatūrų diapazone ir yra atsparūs didelėms vibracijoms bei smūgiams [13].



**1.13 pav.** Pjezo elektrinis jutiklis

Dažniausiai pjezo elektriniai jutikliai šiomis dienomis naudojami uždaruose mechanizmuose tokiuose kaip reduktoriuose.

Akcelerometrai. Akcelerometras yra pagrindinis pagreitį matuojantis daviklis daugumoje vibraciją stebinčių sistemų. Jie yra naudojami stebint tiek mažą, tiek didelį vibracijos dažnį turinčius paviršius. Akcelerometrų galima rasti įvairiuose korpusuose, pradedant paprastais pritaikomais butyje ar buitiniuose prietaisuose ir baigiant specializuotais, naudojamais pramonėje.



**1.14 pav.** Pramoniniai ir bendrojo naudojimo akcelerometrai

Komerciniuose įrenginiuose konvertuoti mechaninius judesius į elektrinius signalus paprastai naudojami pjezoelektriniai, pjezorezistyvieniai ir talpiniai komponentai. Pjezoelektriniai akcelerometrai paremti pjezokeraminiu (pvz., švino cirkonato titanato) arba monokristaliniu (pvz., kvarco, turmalino) principu. Jie yra netinkami aukštame dažnių diapazone ir aukštose

temperatūrose. Pjezoresistyvieniai akcelerometrai yra pirmaujantys vietose, kuriose yra labai didelės vibracijos. Talpiniai akcelerometrai yra pranašesni žemo dažnio diapazone ir jie gali būti eksploatuojami norint pasiekti didelį stabilumą ir tiesiškumą [14].

### **Apibendrinimas**

Literatūros šaltinių apžvalgoje išanalizuoti rinkoje esantys analogai. Dauguma šiuo metu rinkoje esančių prietaisų neatlieka įrankio būklės analizės. Vienintelis parametrus atitinkantis analogas - „Suprocktech“ eksperimentinis modelis, kurio prekyboje nėra.

Ištirti, aptarti ir palyginti rinkoje esantys temperatūros ir vibracijos jutikliai.

Atsižvelgiant į techninius reikalavimus prietaisui pasirinktas visus reikalavimus tenkinantis temperatūrą matuojantis jutiklis - termopora. Šio įrenginio matavimo ribos siekia nuo – 200 iki 2315°C. Prietaisas yra labai mažų gabaritų, kas leis integruoti jį prie įrankio (pvz. frezos, grąžto) korpuso kuo arčiau darbinės dalies.

Tinkamas vibracijos jutiklis yra trijų ašių akcelerometras, siekiantis 250G matavimo ribas.

Pagrindinio staklių variklio energijos suvartojimo tyrimui pasirinktas PEL 103 tinklo analizatorius, kuris yra lengvai integruojamas į CNC mašinos elektrinę grandinę.



## 2. TYRIMO ĮRANGOS PROJEKTAVIMAS

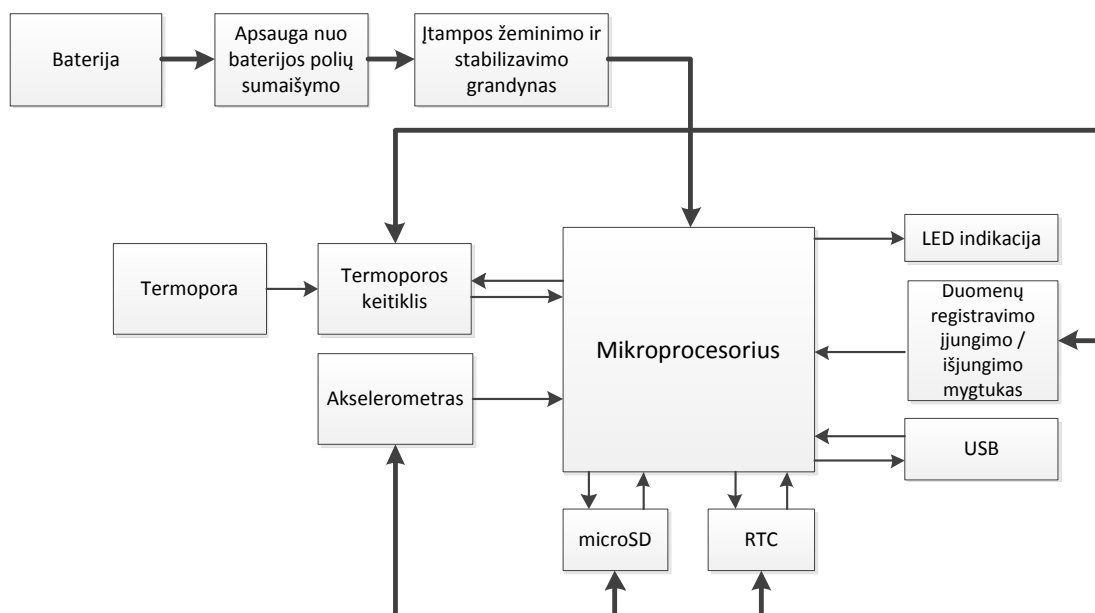
Vykdomo magistrinio darbo tikslas yra atlikti metalo apdirbimo mašinos įrankio būklę nusakančių parametru – apdirbamo įrankio temperatūros, vibracijų ir pagrindinio mašinos variklio energijos sunaudojimo tyrimą. Šiam tikslui pasiekti būtina sukurti matavimo prietaisą, galintį registruoti temperatūrą ir vibracijas ant besisukančio SK-40 įrankio laikiklio. Energijos suvartojimo matavimui kurti prietaiso nereikia, nes parinktas rinkoje esantis matuoklis.

Projektavimas susideda iš kelių svarbių etapų:

- Struktūrinės schemos sudarymo;
- Projektuojamo įtaiso elementinės bazės parinkimo;
- Elektrinės principinės schemos sudarymo;
- Programos parašymo;
- Montažinės plokštės projektavimo;

### 2.1 Struktūrinės schemos sudarymas

Struktūrinė schema sudaryta iš penkių pagrindinių dalių: temperatūros ir vibracijų matavimo, LED indikacijos, duomenų registravimo įjungimo/išjungimo mygtuko, microSD, RTC, USB grandynų ir maitinimo organizavimu visiems grandynams.



2.1 pav. Struktūrinė schema

Įrenginyje stabilizuojamas ir užtikrinamas 3.3V įtampos lygis, maitinantis visus įrenginyje esančius integrinius grandynus. Taip pat jame yra numatyta apsauga, apsauganti šiuos grandynus nuo sugadinimo, galimo netinkamai įstačius akumuliatorių į lizdą.

K tipo termopora - viena iš daugelio termoporų rūšių, matuojančių temperatūrą reikalingose projektui matavimo ribose. Kadangi jos išėjime laipsnio vertei suteikiama milivoltinės reikšmės įtampa ir reikalingas šaltojo galo kompensavimas, yra naudojamos specializuotos mikroschemos, kurios susisiečia su mikrovaldikliu įvairiomis sąsajomis.

Vibracijoms užfiksuoti naudojamas akcelerometras.

Informacijai saugoti yra naudojama mikroSD laikmena, į kurią tam tikru laiko momentu saugomi temperatūros ir vibracijų jutikliais gauti duomenys. Duomenų registravimo pradžia ir pabaiga įvykdoma duomenų registravimo mygtuko paspaudimu.

Informacijos sinchronizavimui naudojamas RTC grandynas, galintis matuoti laiką milisekundžių tikslumu. Šis laikrodis nustatomas naudojant USB sąsają.

LED indikacija susideda iš dviejų šviesos diodų, kurie simbolizuoja:

- Pirmas šviesos diodas – vykdomą informacijos įrašymą į atminties kortelę;
- Antras šviesos diodas – atsiradusį klaidos pranešimą.

## **2.2 Eksperimentinės įrangos elementinės bazės parinkimas**

Analitinės dalies metodų apžvalgoje aptarti temperatūrą ir vibracijas matuojantys jutikliai, kurie yra tinkami tam tikrose situacijose, atsižvelgiant į reikalingas jutiklio ir esamos aplinkos charakteristikas.

Apdirbamo paviršiaus temperatūros matavimo aplinka yra nuolat veikiama vandens ir aukštos temperatūros - iki 1000°C. Šios aplinkos charakteristikos susiaurina jutiklių pasirinkimo galimybes – tinkama yra tik termopora, kuri atitinka kontaktinį matavimo būdą ir temperatūrų ribas.

Vibracijų matavimo jutiklių pasirinkimas mažesnis nei temperatūros ir, atsižvelgiant į projekto poreikius, tik vienas jutiklis yra tinkamas. Tai akcelerometras, esantis labai mažame LFCSP korpuse, kas leidžia suprojektuoti reikiamo dydžio sistemą ir paprastai ją eksploatuoti, kas yra nepasiekama pjezo elektriniais jutikliais. Be to, pasirinktas akcelerometras turi dideles matavimo ribas, kurios siekia iki 500G.

### **Temperatūros jutiklis**

Rinkoje yra įvairiausių termoporų, pritaikytų tam tikroms matavimų aplinkoms ir temperatūroms. Pasirinkta K tipo termopora, kuri sudaryta iš dviejų metalų lydiniių: teigiamas galas sudarytas iš Nikelio – Chromo lydinio, o neigiamas galas iš Nikelio – Aliuminio lydinio. Ši termopora yra bendro naudojimo ir ją galima naudoti oksiduojančioje aplinkoje. Būtina įvertinti tai, kad šios termoporos išėjime, priklausomai nuo matuojamos temperatūros, išeina mikrovolto eilės įtampa ir reikalingas šaltojo laido reikšmės kompensavimas. Šiai problemai išspręsti

sukurta įvairių integrinių grandynų, kurie, priklausomai nuo jų tipo, paverčia 1°C į elektrinį signalą, kurio reikšmė yra skirtinga skirtingiems grandynams. Šis signalas gali būti analoginis arba skaitmeninis. Jeigu signalas yra skaitmeninis, viena iš galimybių yra persiųsti jį SPI sąsaja mikrovaldikliui, kuris panaudodamas tam tikrą algoritmą apskaičiuoja duotąją reikšmę.

Šiame tyrime matavimo ribos reikalavimas neleidžia naudoti integrinių grandynų, kurie suteikia analogine reikšmę 1°C, nes jų mažiausias įtampos lygis yra apie 10mV. Tokiu atveju, ties 1000°C temperatūra, grandyno išėjime būtų apie 10V įtampos lygis, kurio mikrovaldiklis nepajėgtų nuskaityti.

Pasirinktas būtent K tipo termoporoms tinkamas SPI signalo išėjimą turintis grandynas gaminamas „Maxim integrated“ kompanijos (USA) [15]. MAX6675 grandynas išsiunčia 12-Bit duomenų signalą, kas lemia 0,25 °C temperatūros fiksavimo skiriamąją gebą. Tai leidžia tiksliai išmatuoti temperatūrą apdirbamame paviršiuje.

### **Vibracijų jutiklis**

Rinkoje yra pačių įvairiausių akcelerometrų, pritaikytų skirtingoms naudojimo sąlygoms ir turinčių skirtingas matavimo ribas. Pasirinktas akcelerometras yra analoginis integrinis grandynas ADXL377 [16], matuojantis vibracijas trijose ašyse X, Y, Z, kurio matavimo ribos siekia 250G, o jautrumas 6,7 mV/g. Didelių matavimo ribų akcelerometras suteikia galimybę matuoti vibracijas visomis trimis jo ašimis.

Jutiklis gali būti naudojamas nuo -40 iki +90°C temperatūrų ribose, kuriose įrenginys puikiai išlaiko savo charakteristikas. Grandynas gali būti maitinamas 1,8 - 3,6V įtampa ir vartoja itin mažai - 350μA srovės.

Šio vibracijų jutiklio korpusas yra nedidelis 3x3 mm, kas suteikia galimybę nesunkiai integruoti jutiklį į sistemos vidų.

### **Mikrovaldiklis**

Įrenginyje naudojamas PIC18F4550 mikrovaldiklis, turintis 44 išvadus TQFP korpuse. Jame integruota 32 kBytes programų atmintis, 2,048 kBytes duomenų atmintis ir 256 Bytes pastovių duomenų atmintis. Mikrovaldiklis turi 5 prievadus RA, RB, RC, RD ir RE, iš kurių 35 išvadai yra skaitmeniniai, 13 išvadų analoginiai, turintys 10 bitų skiriamąją gebą. Jame integruotos SPI, I2C, EUSART, USB sąsajos, taip pat, vienas 8-bits ir trys 16-bits laikmačiai [17].

Pasirinktas mikrovaldiklis yra su žemesne leistina maitinimo įtampa, nes įrenginys maitinamas nuo ličio jonų akumuliatoriaus, todėl reikalauja itin mažo energijos suvartojimo ir suderinimo su kitais integriniais grandynais, maitinamos įtampos lygiu.

## Realaus laiko laikrodis (RTC)

Įrenginyje naudojamas PCF8583 realaus laiko laikrodis SO-8 korpuse, galintis laiką pateikti *metai- mėnuo- diena, valanda: minutė: sekundė: milisekundė* formatu. Šio formato privalumas – integrinis grandynas gali laiką stebėti milisekundžių tikslumu. Tai leidžia sinchronizuoti duomenis iki 100 kartų per sekundę[18].

Šis realaus laiko laikrodis turi I2C sąsają, kuria yra nuskaitomos ir įrašomos laikrodžio vertės.

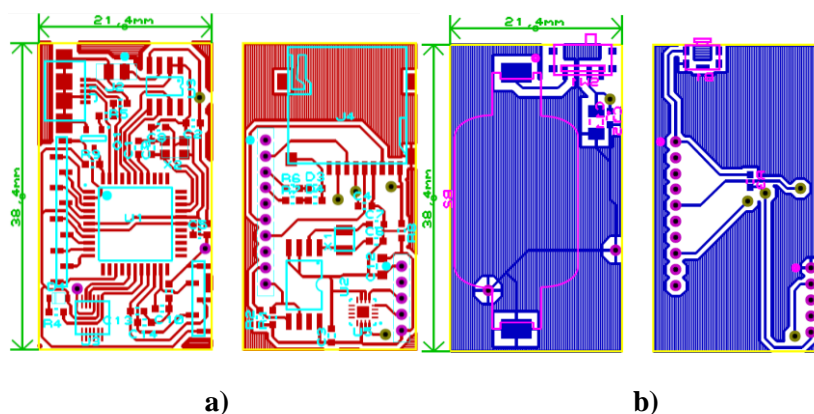
## 2.3 Vibracijų ir temperatūros registravimo įtaisas

Vibracijų ir temperatūros registravimo įrenginys atminties kortelėje saugo jutikliais išmatuotas parametrų vertes. Kortelėje registruojami duomenys yra sinchronizuoti laike, todėl atliekant duomenų tyrimą galima matyti atskirų parametrų vertes tam tikrais laiko momentais, parametrų verčių skirtumus bei kitimo tendencijas. Vibracijas matuojantis jutiklis integruotas įrankio laikiklyje, o temperatūros jutiklis pritvirtinamas kuo arčiau apdirbamo paviršiaus, prie frezos (žr. 2.2 pav.).



2.2 pav. Temperatūros jutiklio tvirtinimas prie frezos

Prototipo elektrinė principinė (žr. 1 priede) ir montažinė schemas sudarytos naudojant PROTEUS ISIS 7.9 programinį paketą. Elektrinė principinė schema sudaryta pagal naudojamų elementų techninius aprašus.



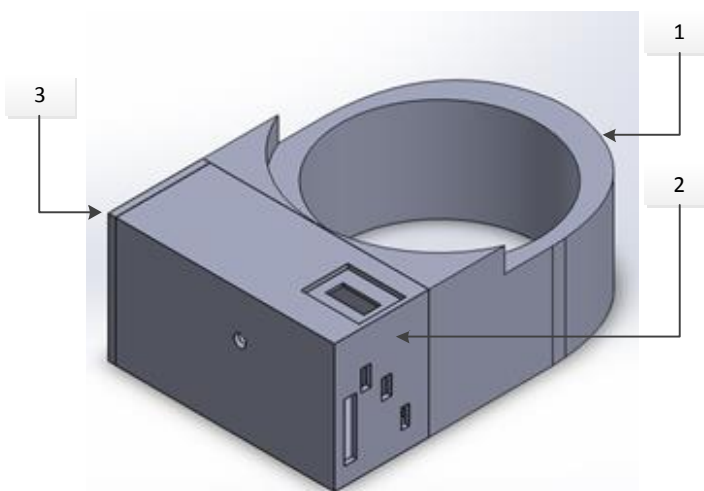
2.3 pav. Spausdinto montažo plokštės a) viršutinis ir b) apatinis sluoksniu.

Projektuojamas įrenginys sudarytas iš dviejų plokščių, sujungtų tarpusavyje jungtimi. Toks sprendimas pasirinktas dėl riboto prototipo dydžio - jis talpinamas ant SK-40 CNC mašinos įrankio laikiklio, kur nėra pakankamai vietos pritvirtinti didelių gabaritų prietaiso. Vietos, ant kurios galima integruoti įrenginį, dydis:  $a = 20 \text{ mm}$ ,  $b = 40 \text{ mm}$  (žr. 2.4 pav.).



**2.4 pav.** SK-40 CNC mašinos įrankių laikiklis

Norint projektuojamą įrenginį pritvirtinti prie įrankio laikiklio, reikalingas korpusas, kuriuo prototipas būtų tvirtinamas. Korpusui suprojektuoti buvo naudojamas SolidWorks 2014 metų programinis paketas, o pagaminti - 3D spausdintuvas.



**2.5 pav.** Įrenginio korpuso 3D brėžinys

Kadangi įrenginio korpusas buvo gaminamas su 3D spausdintuvu, vientiso korpuso nepavyko pagaminti. Jis suprojektuotas iš trijų atskirų dalių: apkabos aplink SK-40 įrankio laikiklį (1), korpuso, į kurį yra talpinamas įrenginys (2) ir dangtelio (3).

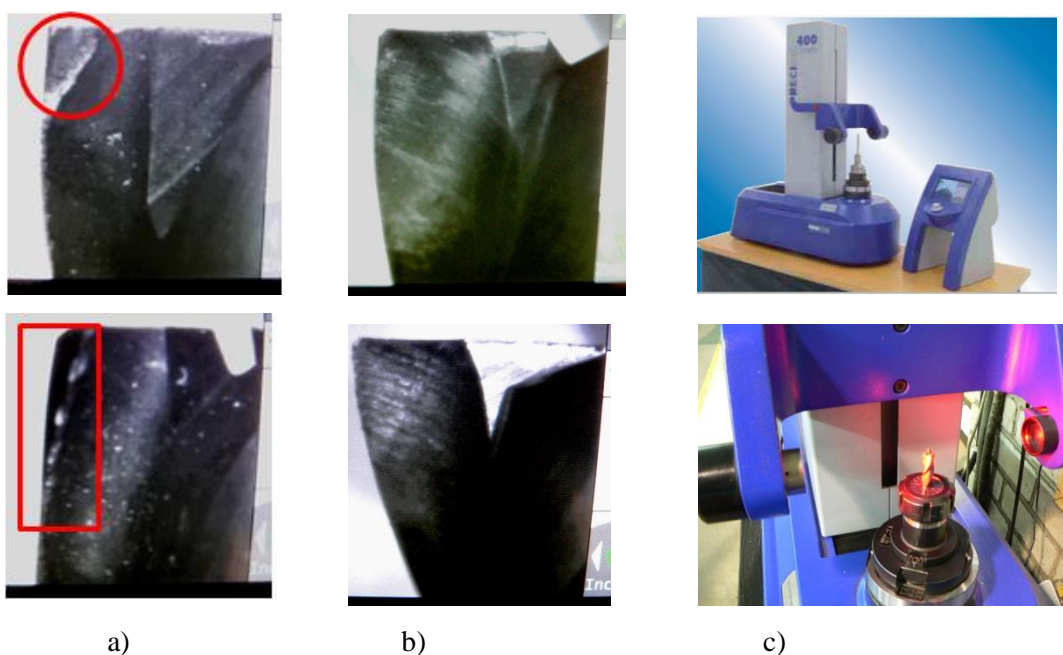


**2.6 pav.** Įrenginio laikiklis ant SK- 40 įrankio laikiklio

Apkaba su įrenginį talpinančiu korpusu yra suklijuota klėjais, o dangtelis priveržtas varžteliu, kad besisukdamas nenukristų ir įrenginys neišslystų iš laikiklio. Pagamintas įrenginio laikiklis pavaizduotas 2.6 paveiksle.

### 3. EKSPERIMENTINIS ĮRANKIŲ BŪSENOS TYRIMAS

Vienas pagrindinių metalo apdirbimo įrankių – freza. Po tam tikro darbo laiko frezos tampa nebetinkamos naudojimui – nudyla pjaunančios plokštumos, nuskilinėja kampai (dingsta geometrija). Taip atsitikus, įrankis praranda savo funkcijas ir gaunamos gaminių matmenų ir paviršiaus glotnumo neatitiktys. Norint pastebėti frezos nusidėvėjimą, reikėtų ją nuolat išimti ir kruopščiai apžiūrėti mikroskopu. Kadangi tai užimtų daug laiko ir susidarytų įrenginių prastovos, šiuo metu frezos nudilimą operatoriai nustato klausos pagalba – freza laikoma nebetinkama, kai atsiranda įrankio skleidžiamas pašalinis garsas. Tyrimui pasirinktos universalios cilindrinės kietlydinio frezos – viena nauja ir viena naudojimui jau nebetinkama (nustatyta operatoriaus)( žr. pav. 3.1).



**3.1 pav.** „Blogo“ freza **a)** „gera“ freza **b)** ir **c)** Preciset 400 įrenginys, matuojantis įrankio geometrinius parametrus

Norint išvengti gaminių neatitikčių, reikia diagnozuoti įrankio nudilimą iškart kai jo būklę nusakantys parametrai pasiekia ribines vertes. Ribinės vertės turi būti nustatomos kiekvienam apdirbimo scenarijui eksperimentiškai: pirmiausia išmatuojamos parametro reikšmės apdirbant medžiagą su vienodomis „gera“ ir su „blogo“ frezomis (taip nustatomas reikšmių skirtumas tarp apdirbimo šiomis frezomis), o tuomet pagal šį skirtumą užsibrėžiama slenkstinė riba, kurią pasiekus matuojamam parametru, bus diagnozuojamas įrankio nudilimas. Tyrimui naudojama jau nebetinkama apdirbimui freza buvo atmesta pagal operatoriaus klausą, todėl norint užtikrinti, kad netinkama freza bus identifikuota anksčiau nei pradės daryti broką, bandymams slenkstinę ribą užsiduodame 50 % mažesnę. Siekiant pritaikyti tiriamus parametrus sistemos kūrime, ši vertė būtų esminė aptinkant nudilusį įrankį, nes būtent tuo momentu, kai sistema užfiksuotų, kad parametras pasiekė ribinę minimalią ar maksimalią vertę, įspėtų apie

įrankio nebetinkamumą naudojimui. Metalo apdirbimo mašinų operatoriai teigia, kad įrankio būklę nusako keletas fizinių reiškinių, atsirandančių apdirbimo proceso metu. Svarbiausi yra:

- Vibracija, atsirandanti apdirbimo metu;
- Įrankio ir apdirbamos detalės temperatūra;
- Pagrindinio CNC mašinos variklio suvartojama galia.

Tiriant vibracijas, atsirandančias metalo apdirbimo metu, galima išsiaiškinti, ar atsiranda papildomos vibracijos frezuojant metalą ne su nauja, o su jau nebetinkančia metalo apdirbimui freza. Bandymai bus atliekami, naudojant darbo metu suprojektuotą matavimo ir registravimo įrangą.

Tiriant temperatūros pokyčius, atsirandančius metalo apdirbimo metu, svarbu užfiksuoti temperatūrų skirtumą gautą, apdirbimui naudojant „gerą“ ir jau nebetinkamą metalo apdirbimui frezą. Šie bandymai taip pat bus atliekami naudojant darbo metu suprojektuotą matavimo ir registravimo įrangą.

Pagrindinio variklio suvartojamos galios tyrimo metu svarbu išsiaiškinti, kaip kinta pagrindinio variklio suvartojamas energijos kiekis frezuojant ruošinį „gerą“ ir netinkama metalo apdirbimui freza. Šiam bandymui bus naudojamas PEL 103 tipo tinklo analizatorius, kuris fiksuos visoms trimis variklio apvijoms tenkanti energijos kiekį.

Aprašyti bandymai bus atliekami esant vienodiems CNC mašinos apdirbimo režimams, taikomiems atitinkamam darbo įrankiui (skirtingo diametro ir skirtingo metalo frezoms taikomi skirtingi režimai).



**3.2 pav.** OPTIMUM F4 programinės frezavimo staklės

Bandymai buvo atliekami naudojant OPTIMUM F4 programines frezavimo stakles. Pagrindiniai šių staklių parametrai:



- Sunaudojama galia: iki 2.2kW
- Maitinimo įtampa: trifazis tinklas ~400V 50Hz;
- Variklio apsisukimai: 9000 aps/min;
- Naudojamas valdiklis: Sinumerik 808D;
- Masė: apie 1800kg.

### 3.1 Tyrimo parametrai

Tyrimas vykdytas pasirenkant metalo apdirbimo įrankius, apdirbamą medžiagą ir pagal jų charakteristikas parašant metalo apdirbimo programą programinėms frezavimo staklėms.

Tyrimui buvo naudojami metalo apdirbimo įrankiai:

- Frezos 8 mm Ø VHM („gera“ ir „bloga“);
- Frezos 10 mm Ø VHM („gera“ ir „bloga“);
- Frezos 12 mm Ø VHM („gera“ ir „bloga“).

Tyrimui naudoti metalo ruošiniai:

- Plienas, markė : 1,0037Q50K ;
- Aliuminis, markė: 3,3535PL50.

Parinkus reikiamus įrankius ir medžiagas, pagal įrankių gamintojų aprašuose deklaruotus parametrus, jiems buvo apskaičiuojami apdirbimo režimai:

Variklio sparta apskaičiuojama:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \text{ aps/min}; \quad (3.1)$$

čia: n - sparta, aps/min;  $V_c$  - pjovimo greitis, m/min;  $\pi=3,14$ ; D – įrankio diametras, mm.

Staklių stalo pastūma apskaičiuojama:

$$f_v = n \cdot z \cdot f_z \text{ mm/min}; \quad (3.2)$$

čia:  $f_v$  - pastūma, mm/min, n - sparta, aps/min, z – frezos pjaunančių paviršių skaičius,  $f_z$  – pastūma vienam pjaunančiam paviršiui, mm/aps;

Apdirbimo parametrų apskaičiavimo pavyzdys:

Pagal 5.1 formulę:  $n = \frac{100 \cdot 1000}{3.14 \cdot 12} = 2654 \text{ aps/min};$

Pagal 5.2 formulę:  $f_v = 2654 \cdot 3 \cdot 0.026 = 207 \text{ mm/min};$

Analogiškai apskaičiuojami apdirbimo parametrai visoms frezoms [2 priedas].

Pagal įrankių gamintojų specifikacijas, frezos įsigilinimas į medžiagą gali siekti tokį pat gylį kaip ir pačios frezos diametras, tačiau norint medžiagą apdirbti tokiais režimais reikia kur kas standesnių metalo apdirbimo staklių nei tos, su kuriomis buvo daromas tyrimas. Remiantis tuo, apdirbimo gylis buvo sumažinamas 50%.

Taip pat pakeisti apdirbimo režimai skirti metalą apdirbti su aušinimu. Kadangi tyrimo metu buvo naudojamas neatsparus tiesiogiai pilamam aušinimo skysčiui įrenginys, apdirbimo metu aušinimas nebus naudojamas. Taigi, siekiant nesukelti įrankio disbalanso ir papildomų vibracijų, užsiduodama, kad 8 ir 10 mm diametro įrankiams apdirbimo parametrai sumažinami trečdaliu, o 12 mm įrankiui 45 %, nes su tokiomis sumažinimo reikšmėmis variklio apsisukimai neviršija 2500 aps/min. Jeigu tyrimas būtų atliekamas nesumažinus apdirbimo parametru įrenginį tektų integruoti į įrankio laikiklį, o laikiklį išbalansuoti. Tokiomis sąlygomis atliekant tyrimą rezultatuose geriau matytųsi skirtumas paviršių apdirbant „geru“ ir „blogu“ įrankiais, bet tokia integracija būtų labai brangi ir sudėtinga, todėl tyrimas supaprastinamas sumažinus parametrus. Tai galima įgyvendinti nes proporcingai mažinamos apdirbimo parametru reikšmės neturi įtakos rezultatų teisingumui.

**3.1 lentelė.** Parinkti apdirbimo parametrai pagal įrankius ir apdirbamas medžiagas

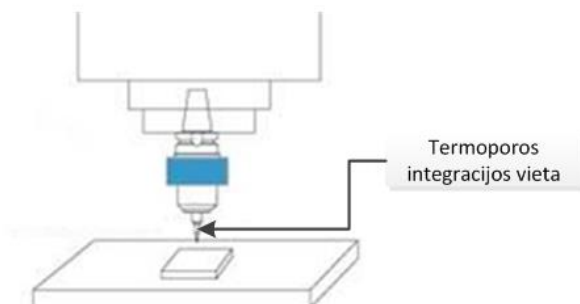
| Įrankis     | Apdirbimo parametrai     |                 |                  |                          |                 |                  |
|-------------|--------------------------|-----------------|------------------|--------------------------|-----------------|------------------|
|             | Aliuminis                |                 |                  | Plienas                  |                 |                  |
|             | Variklio sparta, aps/min | Pastūma, mm/min | Įsigilinimas, mm | Variklio sparta, aps/min | Pastūma, mm/min | Įsigilinimas, mm |
| 8 mm freza  | 1800                     | 140             | 2                | 990                      | 78              | 2                |
| 10 mm freza | 2200                     | 136             | 2,5              | 1200                     | 136             | 2,5              |
| 12 mm freza | 2200                     | 105             | 3,5              | 1200                     | 60              | 3,5              |

Naudojant šiuos duomenis buvo paruoštos apdirbimo programos metalo apdirbimo staklėms (programų tekstai 3 priede).

### 3.2 Tyrimo eiga

Tyrimo metu paeiliui ištirtos 8 mm, 10 mm ir 12 mm diametro tokios pat rūšies frezos, pritaikant vienodus tyrimo scenarijus – naudojant plieną ir aliuminį. Kiekvieno tyrimo metu, naudojant tokius pat apdirbimo režimus siekta nustatyti ar vibracijos, temperatūra ir pagrindinio variklio suvartojamas energijos kiekis gali charakterizuoti konkretaus įrankio būklę.

Temperatūros tyrimai atliekami naudojant tiriamojo darbo metu suprojektuotą matavimo ir registravimo įrangą, kuri duomenis kaupia mikroSD kortelėje. Termopora prie įrankio integruota 5 mm atstumu nuo apdirbamo paviršiaus (žr. 3.3 pav.), kas leidžia matyti ne apdirbamo paviršiaus temperatūrą, o norimą užfiksuoti temperatūrų skirtumą.



**3.3 pav.** Termoporos integracija ant įrankio

Tai reiškia, kad apdirbamame paviršiuje temperatūros yra didesnės, nei fiksuoja prietaisai.

Pagrindinio variklio suvartojamos energijos tyrimai atlikti PEL 103 tinklo analizatoriumi.



**3.4 pav.** PEL 103 prijungimas prie OPTIMUM F4 mašinos pagrindinio variklio

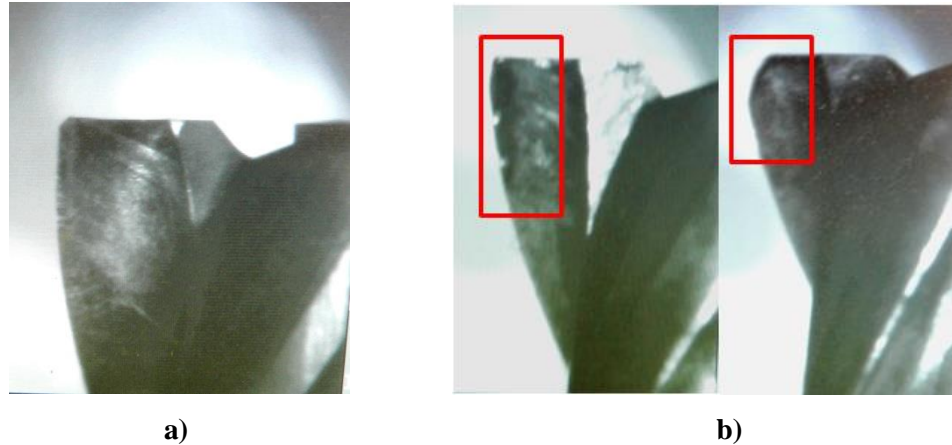
Jis prijungtas prie pagrindinio variklio apgaubiant pagrindinio variklio laidus jutikliais (žr. 3.4 pav.). Šis įrenginys duomenis saugoja SD kortelėje viso tyrimo metu.

Atliktas tyrimas siekiant nustatyti minimalias ir maksimalias tirtų parametų vertes, kurios užfiksuojamos apdirbimo metu. Pagal gautą didžiausią parametų verčių skirtumą, kai apdirbimas vykdomas „gera“ ir „bloga“ frezomis, užsiduotos ribinės vertės, kurios kuriant įrankio būklę stebinčią sistemą būtų atskaitos tašku, nuo kurio diagnozuojamas įrankio nudilimas.

Vibracijų reikšmės fiksuojamos kas 100 ms, o temperatūra ir suvartojamos energijos kiekis kas 1 s.

### 3.2.1 Aštuonių milimetrų diametro frezos tyrimas

Konkrečių įrankių būklės tyrimas pradėtas nuo mažiausio diametro - aštuonių milimetrų kietlydinio frezos tyrimo, kurio metu buvo atliekami keturi bandymai su skirtingomis apdirbamomis medžiagomis (aliuminiu ir plienu) bei skirtingos būklės („gera“ ir jau nebetinkama naudoti) tokio pat tipo frezomis. Tirtų „geros“ ir „blogos“ aštuonių milimetrų diametro frezos nuotraukos pateiktos 3.5 pav.

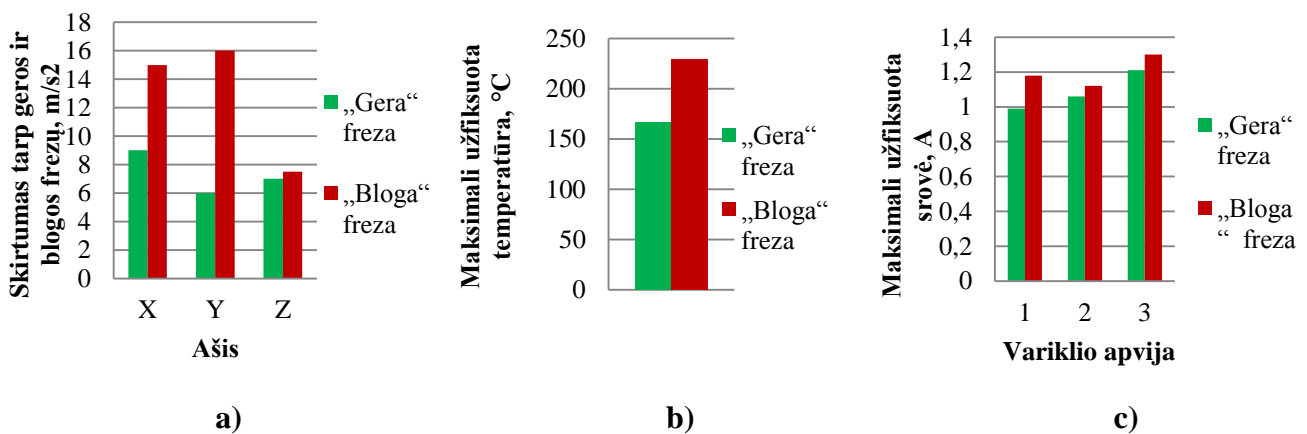


3.5 pav. 8 mm a) „gera“ ir b) „bloga“ freza

#### Plieno apdirbimo tyrimas:

3.2 lentelė. Didžiausios parametrų vertės užfiksuotos 8 mm frezomis apdirbant plieną

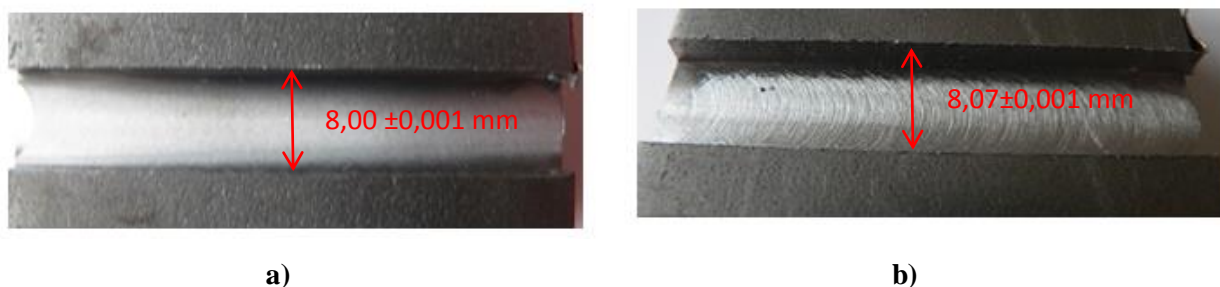
| Medžiaga               |                 | Plienas      |      |       |               |      |       |
|------------------------|-----------------|--------------|------|-------|---------------|------|-------|
| Parametras             |                 | „Gera“ freza |      |       | „Bloga“ freza |      |       |
| Vibracijos             | Ašis            | X            | Y    | Z     | X             | Y    | Z     |
|                        | Min, G          | 8,5          | -3,5 | -49,5 | 4,5           | -6   | -46,5 |
|                        | Max, G          | 17,5         | 2,5  | -43,5 | 19,5          | 10   | -39   |
|                        | Skirtumas, G    | 9            | 6    | 7     | 15            | 16   | 7,5   |
| Energijos suvartojimas | Variklio apvija | 1            | 2    | 3     | 1             | 2    | 3     |
|                        | Max, A          | 0,99         | 1,06 | 1,21  | 1,18          | 1,12 | 1,3   |
| Temperatūra            | Max, °C         | 167          |      |       | 229           |      |       |



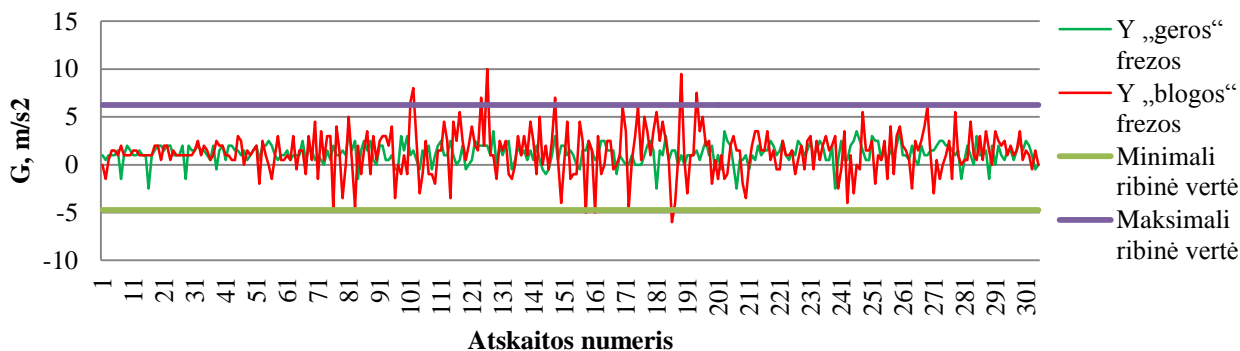
3.6 pav. Didžiausios a) vibracijų, b) temperatūros ir c) pagrindinio variklio suvartojamo energijos kiekio vertės užfiksuotos 8 mm frezomis apdirbant plieną

3.6 pav. matyti, kad frezuojant plieną aštuonių milimetrų frezomis užfiksuotos vibracijų, temperatūros ir suvartojamos energijos kiekio parametrų reikšmės skiriasi lyginant apdirbimą „gera“ ir „bloga“ frezomis. Didžiausi skirtumai (50-62%) matomi vibracijų matavimo rezultatuose, išskyrus Z ašį, kur skirtumas siekia vos 6,7 %. Temperatūros reikšmių skirtumas 27 %, o mažiausiai skyrėsi energijos suvartojimo rodiklio reikšmės ~ 7 %.

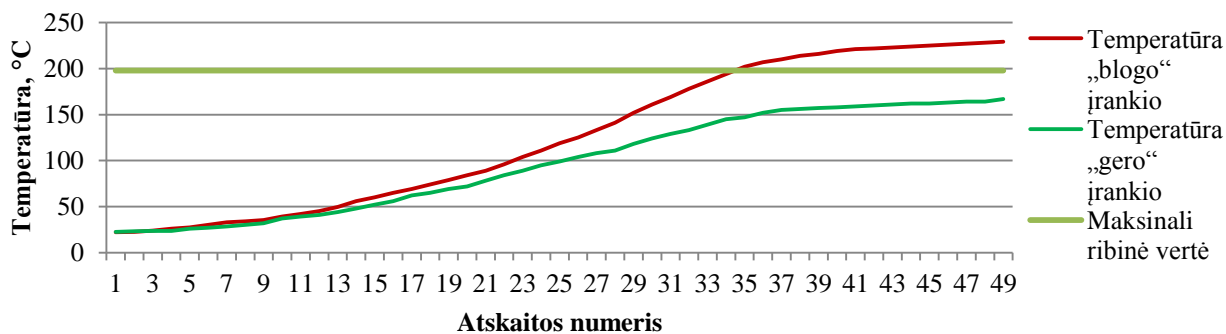
„Geros“ ir „blogos“ aštuonių milimetrų diametro frezų skirtumai atsispindi ne tik grafikuose, gautuose apdirbant jomis metalą, bet ir ant apdirbto metalo ruošinio. Ruošinys, apdirbtas nauja freza atitinka geometrijos bei paviršiaus glotnumo reikalavimus. Ruošinys apdirbtas su „bloga“ freza pasižymi nelygiu paviršiumi, o matmenys nuo standarto nukrypsta 0,07 mm (matavimai atlikti mikrometru). Nors tai yra nedidelis skaičius, gaminant didelio preciziškumo reikalaujančius gaminius, toks neatitikimas turi didelę įtaką. Ruošinių, apdirbtų su „gera“ ir „bloga“ aštuonių milimetrų frezomis pavyzdžiai pateikti 3.7 pav.



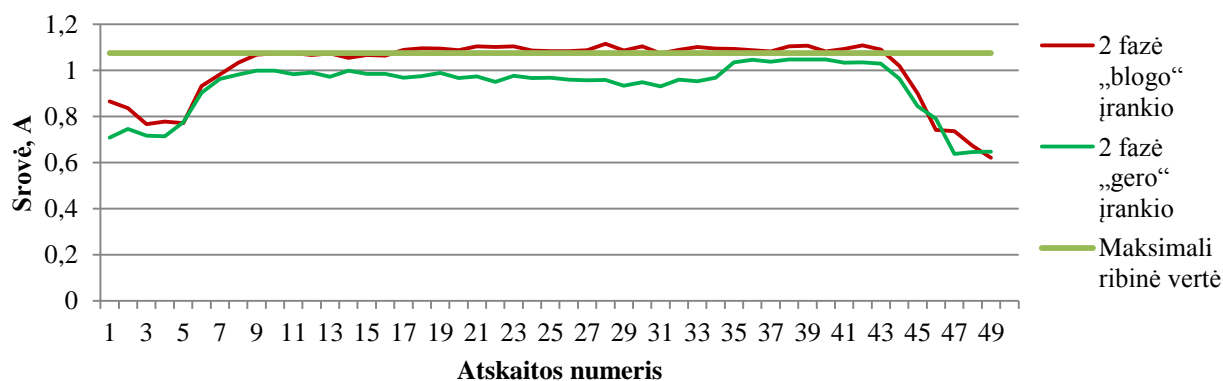
3.7 pav. Apdirbimo kokybė frezuojant plieną 8 mm a) „gera“ ir b) „bloga“ freza



3.8 pav. Vibracijos, atsirandančios y ašyje frezuojant 8 mm frezomis plieną



3.9 pav. Temperatūra, atsirandanti frezuojant 8 mm frezomis plieną



**3.10 pav.** Srovės, atsirandančios pagrindinio variklio 2 apvijoje frezuojant 8 mm frezomis plieną

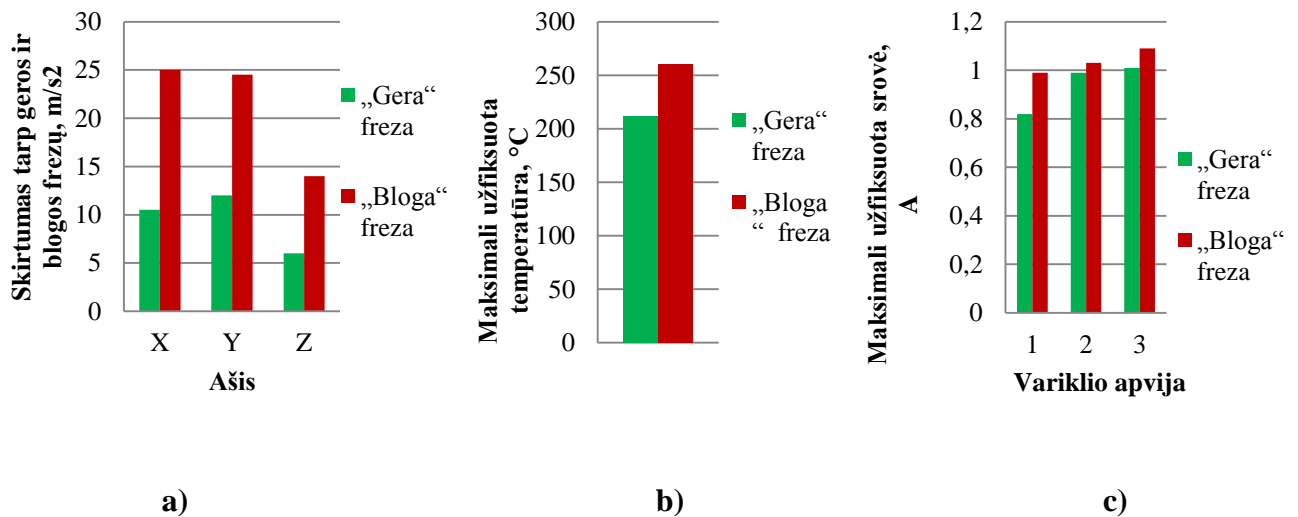
Aštuonių milimetrų diametro frezų tyrimo grafikuose matyti užsiduotos vibracijų, temperatūros ir srovės ribinės vertės, kurias peržengus diagnozuojamas įrankio nudilimas. Šiai frezai, naudojant nustatytus apdirbimo režimus, vibracijų minimali ribinė vertė lygi -4,75G, o maksimali 6,25G, temperatūros maksimali vertė 198 °C, suvartojamos energijos kiekio maksimali vertė 1,075 A. Esant parametrams, nepatenkantiems į šias tolerancijų ribas, laikoma, kad aštuonių milimetrų freza nebetinkama apdirbimui. Tirtu atveju, frezuojant plieną „bloga“ freza vibracijų vertės viršija užsiduotas ribines vertes iki 5 G, temperatūrų – 30 °C, o energijos suvartojimo – 0,04 A.

Kuriant įrankio būklę stebinčią sistemą, ribines vertes būtų galima naudoti kaip atskaitos tašką, kurį peržengus sistema signalizuotų apie nebetinkamą naudojimui įrankį.

Aliuminio apdirbimo tyrimas:

**3.2 lentelė.** Didžiausios parametrų vertės užfiksuotos 8 mm frezomis apdirbant aliuminį

| Medžiaga               |                 | Aliuminis    |      |        |               |      |        |
|------------------------|-----------------|--------------|------|--------|---------------|------|--------|
| Parametras             |                 | „Gera freza“ |      |        | „Bloga freza“ |      |        |
| Vibracijos             | Ašis            | X            | Y    | Z      | X             | Y    | Z      |
|                        | Min, G          | 34,5         | -4   | -137,5 | 26            | -8,5 | -141,5 |
|                        | Max, G          | 45           | 8    | -131,5 | 51            | 16   | -127,5 |
|                        | Skirtumas, G    | 10,5         | 12   | 6      | 25            | 24,5 | 14     |
| Energijos suvartojimas | Variklio apvija | 1            | 2    | 3      | 1             | 2    | 3      |
|                        | Max, A          | 0,82         | 0,99 | 1,01   | 0,99          | 1,03 | 1,09   |
| Temperatūra            | Max, °C         | 212          |      |        | 260,5         |      |        |



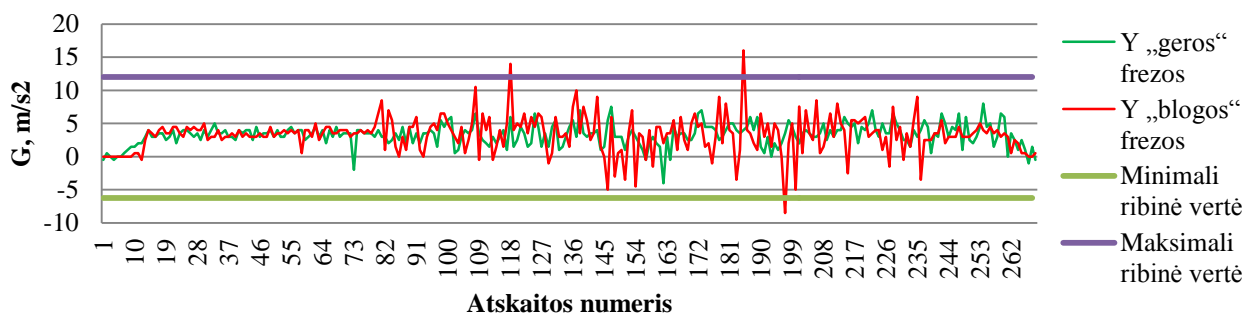
**3.11 pav.** Didžiausios a) vibracijų b) temperatūros ir c) pagrindinio variklio suvartojamo energijos kiekio vertės užfiksuotos 8 mm frezomis apdirbant aliuminį

Remiantis 3.11 paveikslu galima teigti, jog apdirbant aliuminį aštuonių milimetrų frezomis, vibracijų, temperatūros ir suvartojamos energijos kiekio lygis pastebimai skiriasi lyginant apdirbimą „gera“ ir „bloga“ frezomis. Didžiausi skirtumai matomi vibracijų matavimo rezultatuose – visose ašyse skirtumas ~ 55 %, o mažiausi – energijos suvartojimo ~ 15 %. Temperatūros skirtumas 19 %.

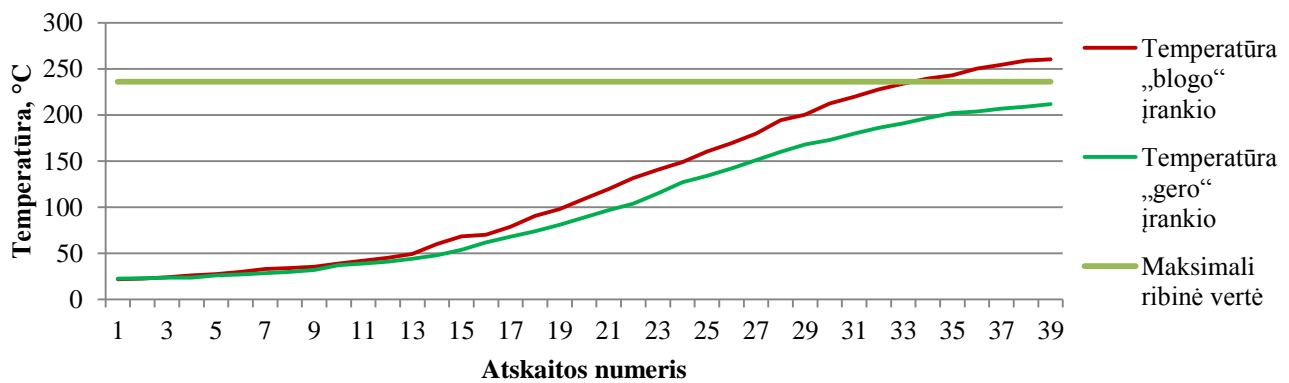
Kaip ir apdirbant plieną, „geros“ ir „blogos“ aštuonių milimetrų diametro frezų skirtumai atsispindi metalo ruošinių paviršiuje. Ruošinio, apdirbto nauja freza paviršius lygus, o apdirbto su nebetinkančia naudojimu – ne. Ruošinių matmenys skiriasi 0,11 mm. Tai yra labai didelis skirtumas, turintis reikšmės vertinant galutinio gaminio kokybę ir atitikimą reikalavimams. Ruošinių, apdirbtų su „gera“ ir „bloga“ aštuonių milimetrų frezomis pavyzdžiai pateikti 3.12 pav.



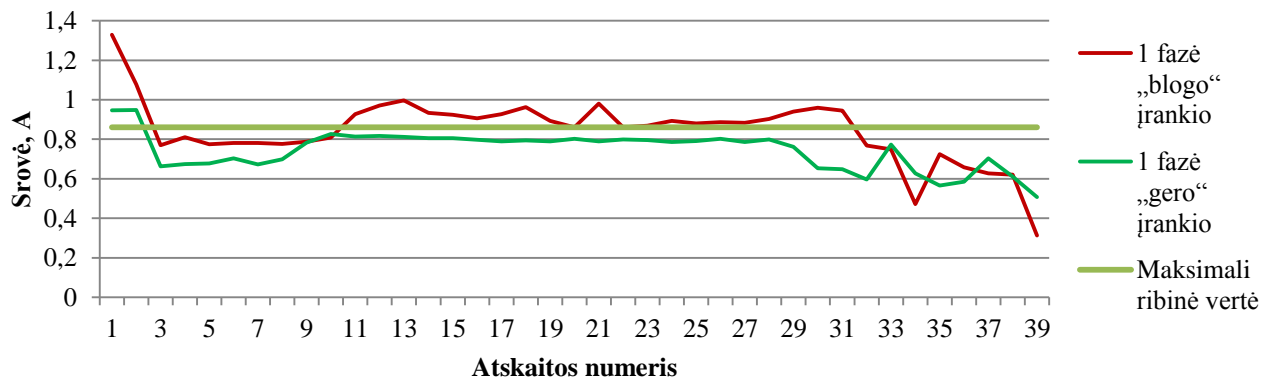
**3.12 pav.** Apdirbimo kokybė frezuojant aliuminį 8 mm a) „gera“ ir b) „bloga“ freza



**3.13 pav.** Vibracijos, atsirandančios y ašyje frezuojant 8 mm frezomis aliuminį



3.14 pav. Temperatūra, atsirandanti frezuojant 8 mm frezomis aliuminį



3.15 pav. Srovės, atsirandančios pagrindinio variklio 1 apvijoje frezuojant 8 mm frezomis aliuminį

Šiai frezai, naudojant aliuminį ir nustatytus apdirbimo režimus, vibracijų minimali ribinė vertė lygi  $-1,625G$ , o maksimali  $12G$ , temperatūros maksimali vertė  $236\text{ }^{\circ}\text{C}$ , suvartojamos energijos kiekio maksimali vertė  $0,86\text{ A}$ . Tirtu atveju, frezuojant plieną „bloga“ freza vibracijų vertės viršija užsiduotas ribines vertes iki  $4\text{ G}$ , temperatūrų –  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o energijos suvartojimo –  $0,12\text{ A}$ .

Visi aštuonių milimetrų diametro frezų vibracijų tyrimo rezultatai pateikti 4 priede.

Visi aštuonių milimetrų diametro srovės tyrimo rezultatai pateikti 5 priede.

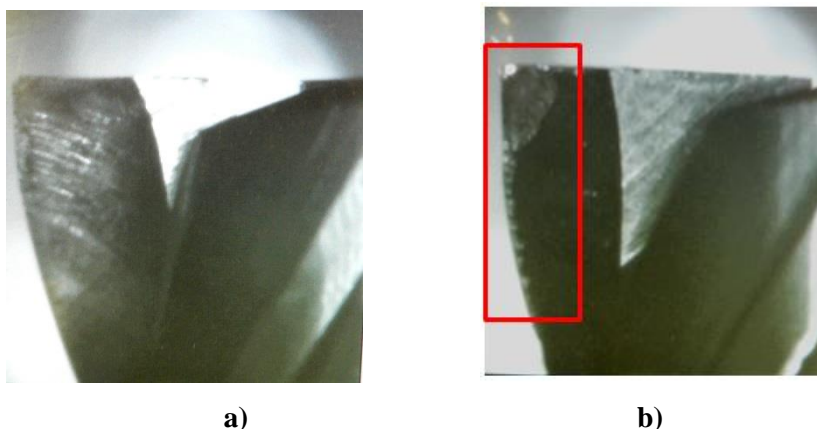
*Apibendrinimas.* Atsižvelgiant į atliktus aštuonių milimetrų diametro frezos tyrimus, naudojant tiek plieną, tiek aliuminį, galima teigti, kad vibracijų ir temperatūrų matavimą tikslinga pritaikyti kuriant sistemą, nusakančią įrankio nudilimą, nes skirtumai tarp apdirbimo „gera“ ir „bloga“ frezomis parametrų aiškiai matomi. Energijos suvartojimo tyrimas abiem atvejais parodė, kad šis parametras nėra tinkamas smulkiems įrankiams, nes parametro verčių skirtumai neįžymūs.

Nustatytos šio diametro frezos parametrų ribinės reikšmės. Tyrimo metu įsitikinta, kad „bloga“ freza šias reikšmes pasiekia, todėl būtų galima šias ribines vertes dėti į duomenų bazę, kuria naudojantis įrankio būklės stebėjimo sistema diagnozuotų ir signalizuotų netinkamą apdirbimui įrankį.



### 3.2.2 Dešimties milimetrų diametro frezos tyrimas

Tiriant dešimties milimetrų diametro frežą, buvo atliekami analogiški bandymai su skirtingomis apdirbamomis medžiagomis (aliuminiu ir plienu) bei skirtingos būklės („gera“ ir jau nebetinkama naudoti) tokio pat tipo frezomis. Tirtų „geros“ ir „blogos“ dešimties milimetrų diametro frezų nuotraukos pateiktos 3.16 pav.

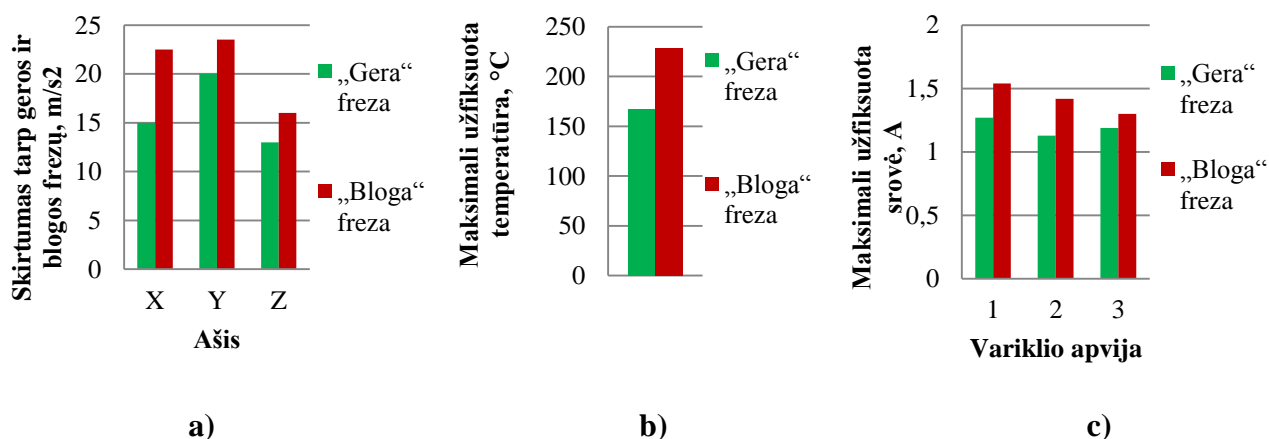


3.16 pav. 10 mm a) „gera“ ir b) „bloga“ freza

Plieno apdirbimo tyrimas:

3.3 lentelė. Didžiausios parametru vertės užfiksuotos 10 mm frezomis apdirbant plieną

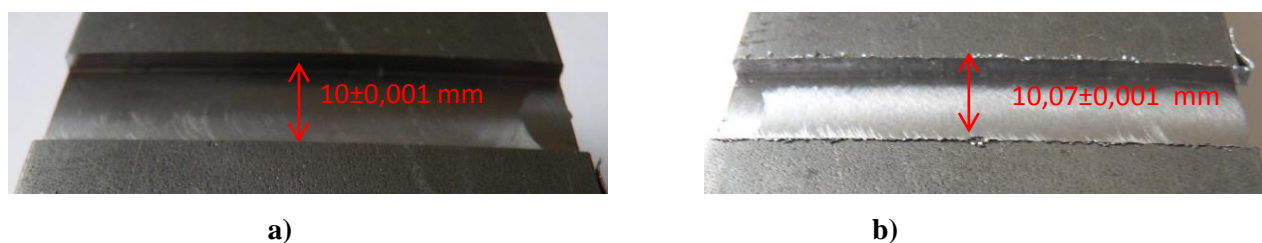
| Medžiaga               |                 | Plienas      |      |       |               |      |       |
|------------------------|-----------------|--------------|------|-------|---------------|------|-------|
| Parametras             |                 | „Gera“ freza |      |       | „Bloga“ freza |      |       |
| Vibracijos             | Ašis            | X            | Y    | Z     | X             | Y    | Z     |
|                        | Min, G          | 11           | -8,5 | -68   | 6,5           | -9,5 | -71,5 |
|                        | Max, G          | 26           | 11,5 | -55,5 | 29,5          | 14   | -55,5 |
|                        | Skirtumas, G    | 15           | 20   | 13    | 22,5          | 23,5 | 16    |
| Energijos suvartojimas | Variklio apvija | 1            | 2    | 3     | 1             | 2    | 3     |
|                        | Max, A          | 1,27         | 1,13 | 1,19  | 1,54          | 1,42 | 1,3   |
| Temperatūra            | Max, °C         | 234          |      |       | 268           |      |       |



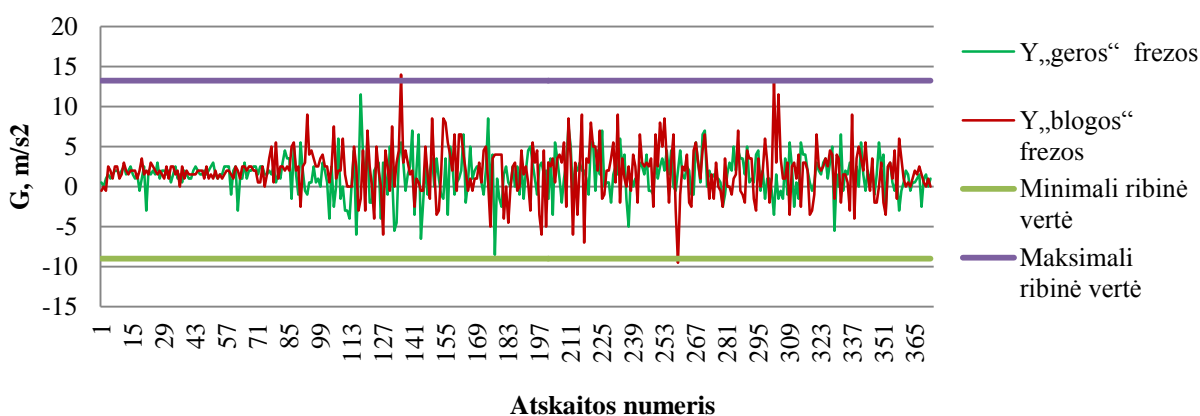
3.17 pav. Didžiausios a) vibracijų, b) temperatūros ir c) pagrindinio variklio suvartojamo energijos kiekio vertės užfiksuotos 10 mm frezomis apdirbant plieną

Remiantis 3.17 pav. galima teigti, kad frezuojant plieną dešimties milimetrų frezomis užfiksuotos vibracijų, temperatūros ir suvartojamos energijos kiekio parametrų reikšmės skiriasi lyginant apdirbimą „gera“ ir „bloga“ frezomis. Pastebėtina, kad šiuo atveju, suvartojamos energijos kiekio skirtumas šiek tiek didesnis nei aštuonių milimetrų diametro frezos tyrime ir siekia 9-21 %. Didžiausi skirtumai, kaip ir aštuonių milimetrų diametro frezos tyrime, matomi vibracijų matavimo rezultatuose – 15-21 %, o temperatūros reikšmių skirtumas 13 %.

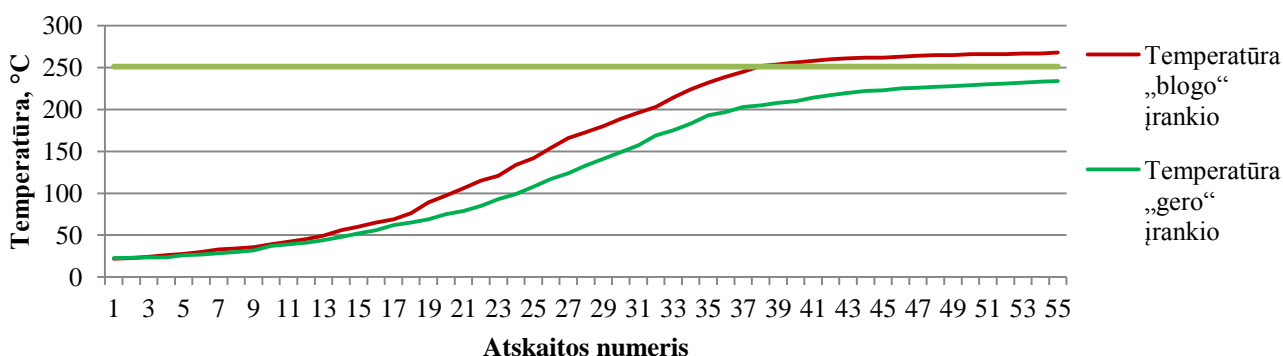
Kaip ir aštuonių milimetrų diametro frezų tyrime, „geros“ ir „blogos“ dešimties milimetrų diametro frezų skirtumai atsispindi ant apdirbto metalo ruošinio. Šiuo atveju skirtumas ypatingai matomas ant išpjovos šonų - ruošinyje, apdirbtame su „bloga“ freza aiškiai matomos užvartos, atsiradusios dėl aplūžinėjusių pjaunančių paviršių (žr. 3.16 b) pav.). Ruošinių matmenys skiriasi 0,07 mm (kaip ir aštuonių milimetrų diametro frezos tyrime). Ruošinių, apdirbtų su „gera“ ir „bloga“ dešimties milimetrų frezomis pavyzdžiai pateikti 3.18 pav.



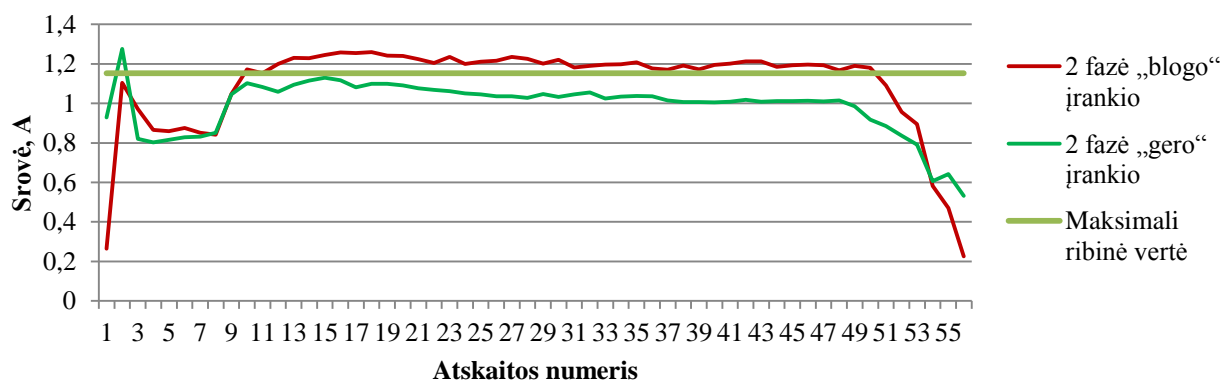
3.18 pav. Apdirbimo kokybė frezuojant plieną 10 mm a) „gera“ ir b) „bloga“ freza



3.19 pav. Vibracijos, atsirandančios y ašyje frezuojant 10 mm frezomis plieną



3.20 pav. Temperatūra, atsirandanti frezuojant 10 mm frezomis plieną



**3.21 pav.** Srovės, atsirandančios pagrindinio variklio 2 apvijoje frezuojant 10 mm frezomis plieną

Dešimties milimetrų diametro frezų tyrimo grafikuose matyti užsiduotos vibracijų, temperatūros ir srovės ribinės vertės lygios: vibracijų minimali ribinė vertė lygi -9G, o maksimali 13,25G, temperatūros maksimali vertė 251 °C, suvartojamos energijos kiekio maksimali vertė 1,15 A. Esant parametrui, nepatenkantiems į šias tolerancijų ribas, laikoma, kad dešimties milimetrų freza nebetinkama apdirbimui. Tirtu atveju, frezuojant plieną „blogo“ freza vibracijų vertės viršija užsiduotas ribines vertes iki 1,25 G, temperatūrų – 14 °C, o energijos suvartojimo – 0,1 A. Dešimties milimetrų skersmens nebetinkamos naudojimui frezos tyrimo metu pastebėta, kad vibracijos ir temperatūra ribines vertes peržengė mažesniu skirtumu nei apdirbimą vykdant aštuonių milimetrų freza. Taip galėtų būti dėl mažesnio frezos nudilimo.

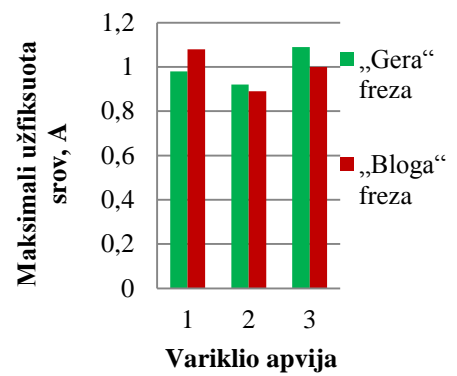
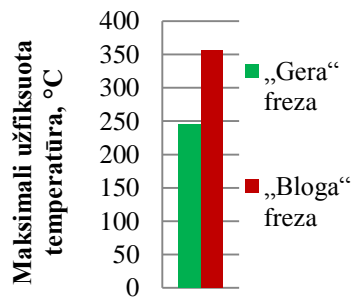
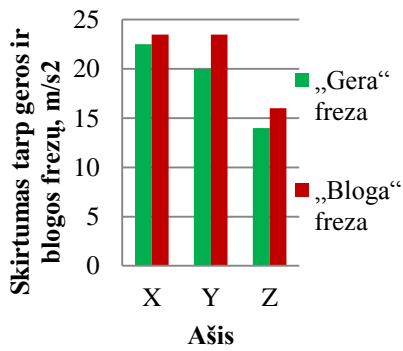
Visi dešimties milimetrų vibracijų tyrimo rezultatai pateikti 6 priede.

Visi dešimties milimetrų srovės tyrimo rezultatai pateikti 8 priede.

Aliuminio apdirbimo tyrimas:

**3.4 lentelė.** Didžiausios parametru vertės užfiksuotos 10 mm frezomis apdirbant aliuminį

| Medžiaga               |                 | Aliuminis    |      |       |               |      |       |
|------------------------|-----------------|--------------|------|-------|---------------|------|-------|
| Parametras             |                 | „Gera“ freza |      |       | „Blogo“ freza |      |       |
| Vibracijos             | Ašis            | X            | Y    | Z     | X             | Y    | Z     |
|                        | Min, G          | 7            | -8,5 | -69,5 | 6,5           | -9,8 | -71,5 |
|                        | Max, G          | 29,5         | 11,5 | -55,5 | 30            | 14,2 | -55,5 |
|                        | Skirtumas, G    | 22,5         | 20   | 14    | 23,5          | 23,5 | 16    |
| Energijos suvartojimas | Variklio apvija | 1            | 2    | 3     | 1             | 2    | 3     |
|                        | Max, A          | 0,98         | 0,92 | 1,09  | 1,08          | 0,89 | 1     |
| Temperatūra            | Max, °C         | 245          |      |       | 356           |      |       |



a)

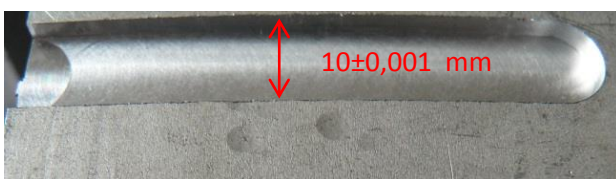
b)

c)

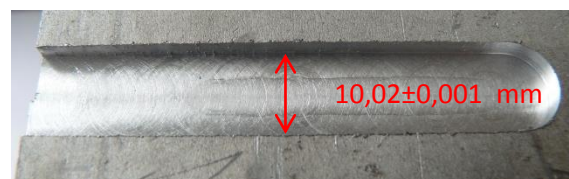
**3.22 pav.** Didžiausios a) vibracijų b) temperatūros ir c) pagrindinio variklio suvartojamo energijos kiekio vertės užfiksuotos 10 mm frezomis apdirbant aliuminį

3.22 pav. matyti, jog apdirbant aliuminį dešimties milimetrų frezomis, vibracijų, temperatūros ir suvartojamos energijos kiekio lygis skiriasi lyginant apdirbimą „gera“ ir „bloga“ frezomis. Vibracijų skirtumai daug mažesni nei aštuonių milimetrų diametro frezų tyrime ir siekia tik 4,3 - 15 %. Temperatūros skirtumas lyginant su aštuonių milimetrų diametro freza padidėjo nuo 15 % iki 31%, kas yra labai svarbu, nes kylant temperatūrai apdirbame paviršiuje, metalas arti frezos suminkštėja ir variklis nepatiria didelės apkrovos, dėl ko energijos suvartojimas šiuo atveju yra beveik lygus apdirbant ruošinį tiek su „gera“, tiek su „bloga“ frezomis.

Šiuo atveju, skirtumai tarp apdirbimo „gera“ ir „bloga“ dešimties milimetrų frezomis yra mažiau pastebimi ant ruošinių – matmenų skirtumas tik 0,02 mm, o ant ruošinio, apdirbto su nebetinkančia naudojimui freza, paviršiaus matomi neryškūs defektai. Ruošinių, apdirbtų su „gera“ ir „bloga“ dešimties milimetrų frezomis pavyzdžiai pateikti 3.23 pav.

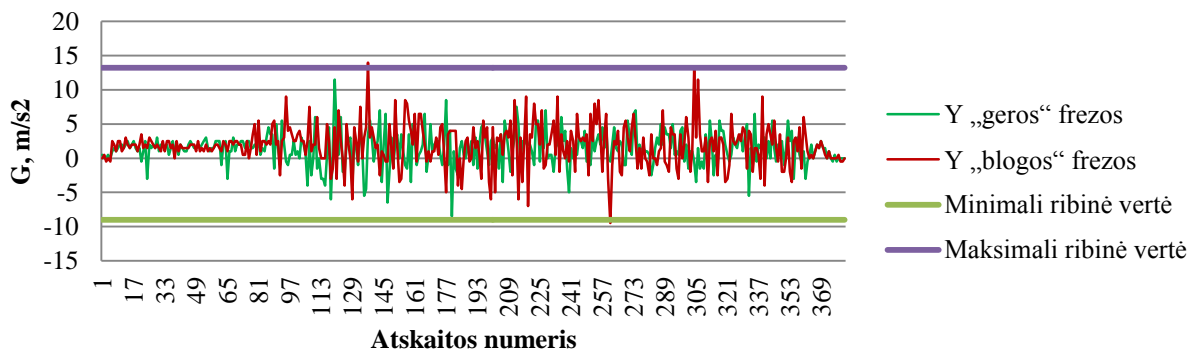


a)

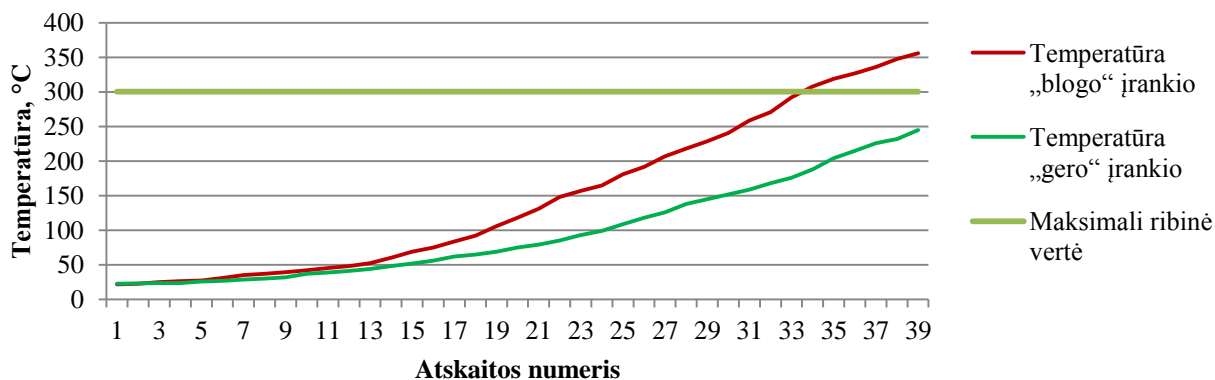


b)

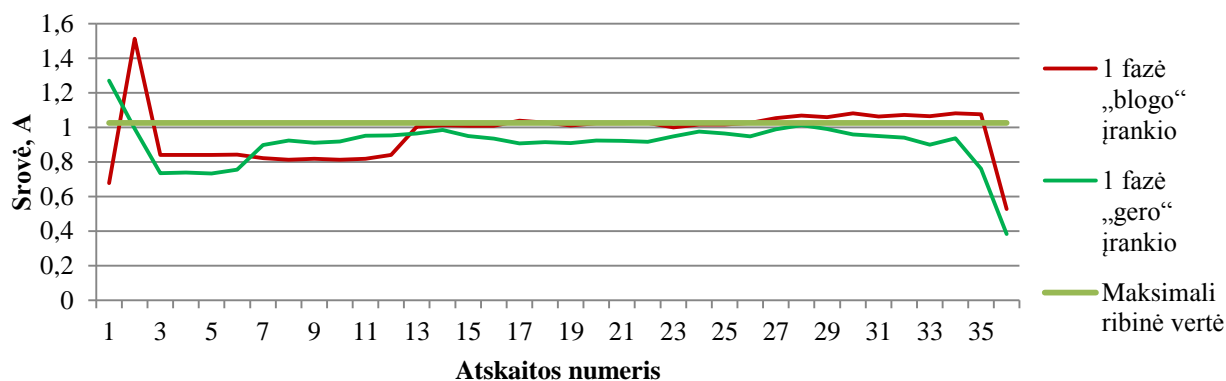
**3.23 pav.** Apdirbimo kokybė frezuojant aliuminį 10 mm a) „gera“ ir b) „bloga“ freza



**3.24 pav.** Vibracijos, atsirandančios y ašyje frezuojant 10 mm frezomis aliuminį



3.25 pav. Temperatūra, atsirandanti frezuojant 10 mm frezomis aliuminį



3.26 pav. Srovės, atsirandančios pagrindinio variklio 1 apvijoje frezuojant 10 mm frezomis aliuminį

Šiai frezai, naudojant aliuminį ir nustatytus apdirbimo režimus, vibracijų minimali ribinė vertė lygi  $-9,1G$ , o maksimali  $13,25G$ , temperatūros maksimali vertė  $300,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , suvartojamos energijos kiekio maksimali vertė  $1,025\text{ A}$ . Tirtu atveju, frezuojant aliuminį „bloga“ freza vibracijų vertės viršija užsiduotas ribines vertes iki  $0,7\text{ G}$ , temperatūrų –  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o energijos suvartojimo –  $0,06\text{ A}$ . Maži skirtumai tarp vibracijų ir srovės suvartojimo rezultatų, apdirbant aliuminį su „gera“ ir „bloga“ frezomis, kaip ir mažas matmenų skirtumas bei nedaug besiskirianti paviršiaus apdirbimo kokybė, rodo, kad dešimties milimetrų diametro „bloga“ freza yra mažiau nudilusi nei aštuonių milimetrų diametro freza.

Visi dešimties milimetrų vibracijų tyrimo rezultatai pateikti 6 priede.

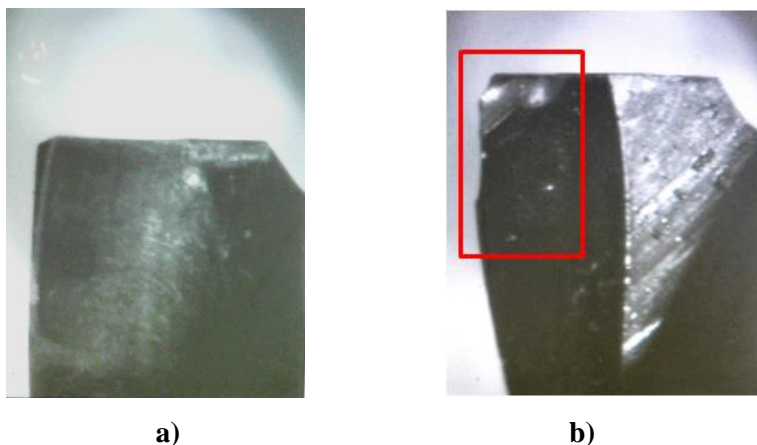
Visi dešimties milimetrų srovės tyrimo rezultatai pateikti 8 priede.

*Apibendrinimas.* Atsižvelgiant į atliktus dešimties milimetrų diametro frezos tyrimus, naudojant tiek plieną, tiek aliuminį, galima teigti, kad vibracijų ir temperatūrų matavimą tikslinga pritaikyti kuriant sistemą, nusakančią įrankio nudilimą, nes skirtumai tarp apdirbimo „gera“ ir „bloga“ frezomis parametrai aiškiai matomi. Energijos suvartojimo tyrimas reikšmingas naudojant plieną, o aliuminio atveju galimai iškreipti dėl suminkštėjimo esant aukštai temperatūrai.

Nustatytos šio diametro frezos parametų ribinės reikšmės. Tyrimo metu įsitikinta, kad „bloga“ freza šias reikšmes pasiekia, todėl būtų galima šias ribines vertes dėti į duomenų bazę, kuria naudojantis įrankio būklės stebėjimo sistema diagnozuotų ir signalizuotų netinkamą apdirbimui įrankį.

### 3.2.3 Dvylikos milimetrų diametro frezos tyrimas

Paskutinė tirta freza – didžiausio – dvylikos milimetrų diametro. Jos būklės nustatymui buvo atlikti analogiškai kaip ir su mažesnių diametro frezomis, bandymai apdirbant plieną ir aliuminį su „gera“ ir jau nebetinkama naudoti tokio pat tipo frezomis. Tirtų „geros“ ir „blogos“ dvylikos milimetrų diametro frezų nuotraukos pateiktos 3.27 pav.



3.27 pav. 12 mm a) „gera“ ir b) „bloga“ freza

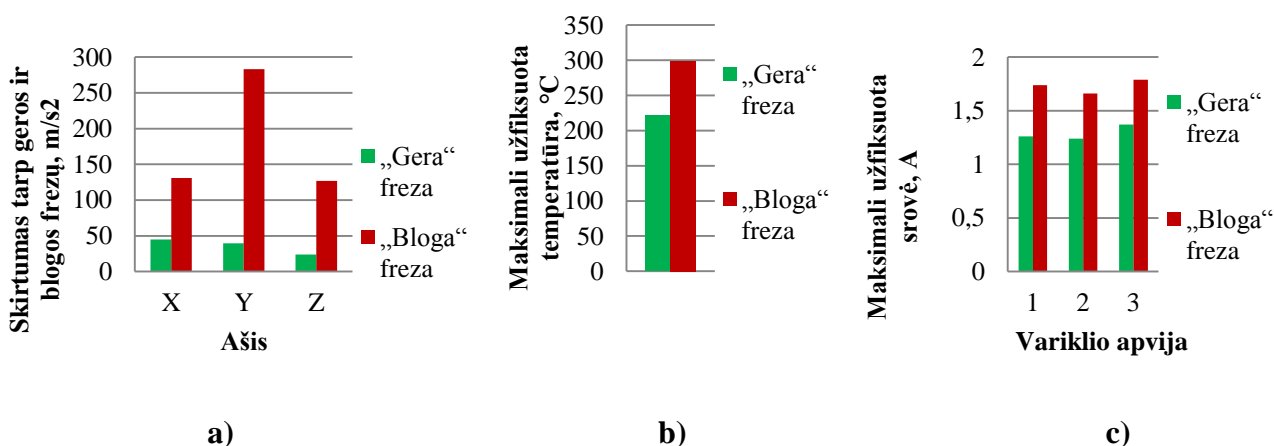
#### Plieno apdirbimo tyrimas:

3.5 lentelė. Didžiausios parametų vertės užfiksuotos 12 mm frezomis apdirbant plieną

| Medžiaga               |                  | Plienas      |      |      |               |      |        |
|------------------------|------------------|--------------|------|------|---------------|------|--------|
| Parametras             |                  | „Gera“ freza |      |      | „Bloga“ freza |      |        |
| Vibracijos             | Ašis             | X            | Y    | Z    | X             | Y    | Z      |
|                        | Min, G           | -6,5         | -18  | -76  | -42           | -114 | -115,5 |
|                        | Max, G           | 38,5         | 21,5 | -52  | 89            | 169  | 11,5   |
|                        | Skirtumas, G     | 45           | 39,5 | 24   | 131           | 283  | 127    |
| Energijos suvartojimas | Variklio apviija | 1            | 2    | 3    | 1             | 2    | 3      |
|                        | Max, A           | 1,26         | 1,24 | 1,37 | 1,74          | 1,66 | 1,79   |
| Temperatūra            | Max, °C          | 222          |      |      | 299           |      |        |

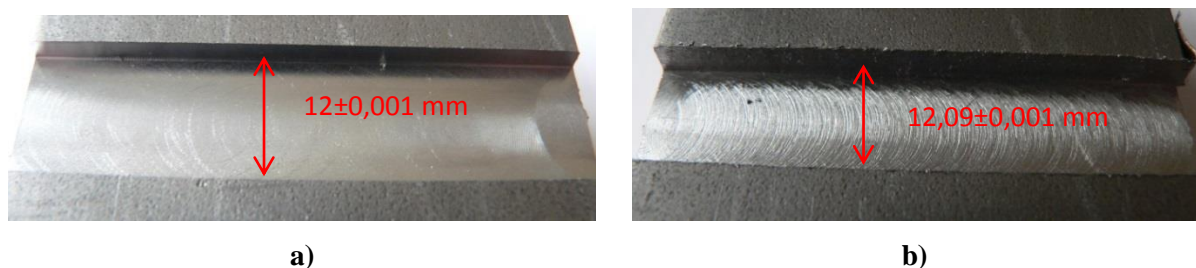
3.28 pav. matyti, kad frezuojant plieną dvylikos milimetrų diametro frezomis užfiksuotos vibracijų, temperatūros ir suvartojamos energijos kiekio parametų reikšmės aiškiai skiriasi lyginant apdirbimą „gera“ ir „bloga“ frezomis. Ypatingai dideli skirtumai (66-86 %) matomi vibracijų matavimo rezultatuose. Šie vibracijų skirtumai didžiausi, kurie buvo gauti visų frezų tyrimo metu apdirbant plieną. Temperatūros reikšmių skirtumas panašus kaip aštuonių milimetrų

diametro frezos ir siekia 26 %. Suvartojamos energijos kiekio skirtumas didesnis nei dešimties milimetrų diametro frezos tyrime ir visose apvijose siekia ~ 26 %.

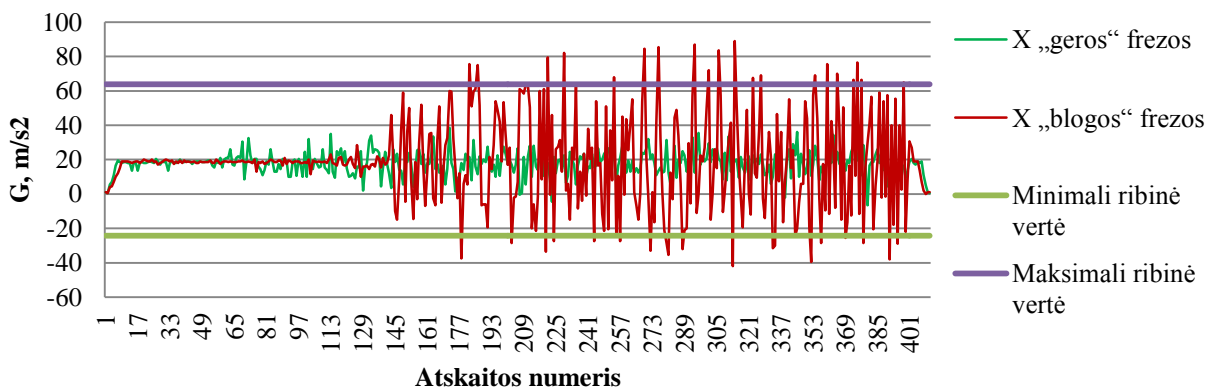


**3.28 pav.** Didžiausios a) vibracijų, b) temperatūros ir c) pagrindinio variklio suvartojamo energijos kiekio vertės užfiksuotos 12 mm frezomis apdirbant plieną

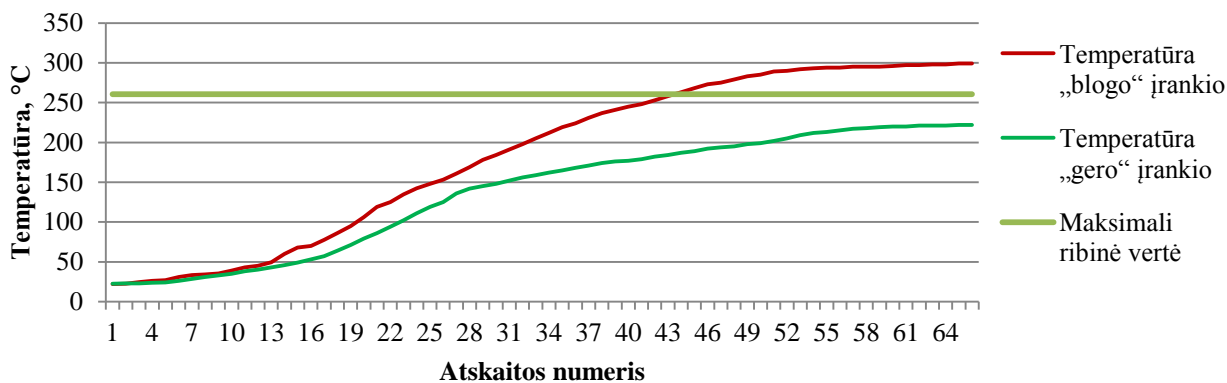
Kaip ir mažesnių diametrų frezų tyrimuose, „geros“ ir „blogos“ dvylikos milimetrų frezų skirtumai gerai matomi ant apdirbto metalo ruošinio. Apdirbimo kokybės skirtumas matomas tiek ant išpjovos šonų - ruošinyje, apdirbtame su „bloga“ freza matyti užvartos ir nelygus kraštas, tiek ant paviršiaus, kuris apdirbant „bloga“ freza gautas labai nelygus. Dvylikos milimetrų diametro frezos atveju ruošinių matmenys skiriasi daugiau nei mažesnių diametrų frezų - 0,09 mm. Tai gali rodyti didžiausią šios frezos nudilimą. Ruošinių, apdirbtų su „gera“ ir „bloga“ dvylikos milimetrų diametro frezomis pavyzdžiai pateikti 3.29 pav.



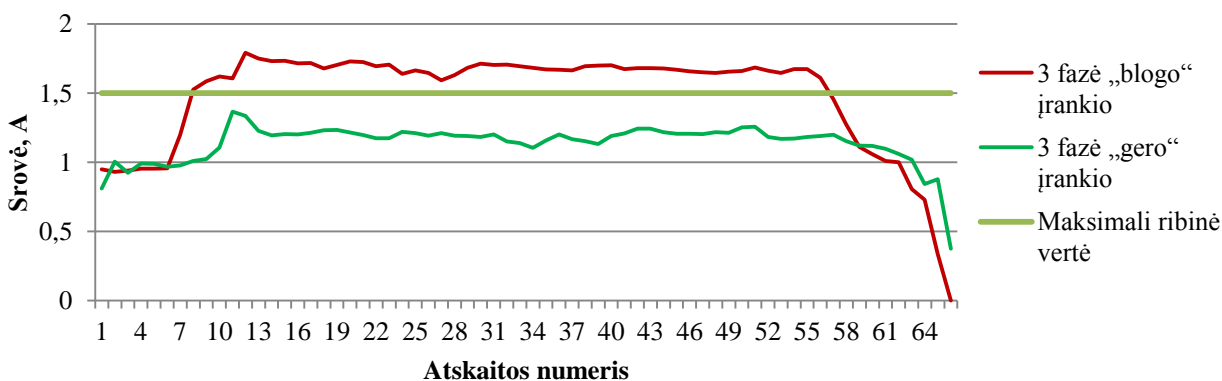
**3.29 pav.** Apdirbimo kokybė frezuojant aliuminį 12 mm diametro a) „gera“ ir b) „bloga“ freza



**3.30 pav.** Vibracijos, atsirandančios y ašyje frezuojant 12 mm diametro frezomis plieną



**3.31 pav.** Temperatūra, atsirandanti frezuojant 12 mm diametro frezomis plieną



**3.32 pav.** Srovės, atsirandančios pagrindinio variklio 3 apvijoje frezuojant 12 mm diametro frezomis plieną

Dvylikos milimetrų diametro frezų tyrimo grafikuose matyti užsiduotos vibracijų, temperatūros ir srovės ribinės vertės, kurios lygios: vibracijų minimali ribinė vertė lygi  $24,25G$ , o maksimali  $63,75G$ , temperatūros maksimali vertė  $260,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , suvartojamos energijos kiekio maksimali vertė  $1,5\text{ A}$ . Kai parametų vertės viršija šias ribines vertes, laikoma, kad dvylikos milimetrų freza gadina ruošinius ir yra nebetinkama apdirbimui. Tirtu atveju, frezuojant plieną „blogo“ freza vibracijų vertės viršija užsiduotas ribines vertes  $5\text{-}25\text{ G}$ , temperatūrų –  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o energijos suvartojimo iki  $0,3\text{ A}$ . Tai yra didžiausi viršijimai, gauti apdirbant plieną, kas rodo didžiausią iš tirtų frezos nusidėvėjimą.

Visi dvylikos milimetrų diametro frezų vibracijų tyrimo rezultatai pateikti 7 priede.

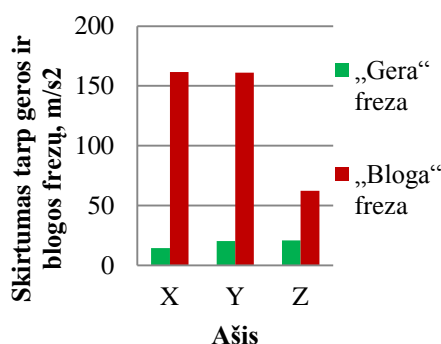
Visi dvylikos milimetrų diametro frezų srovės tyrimo rezultatai pateikti 9 priede.



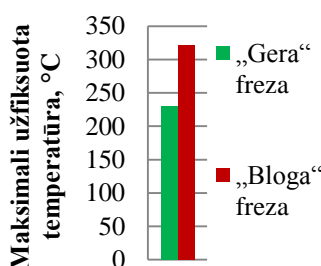
Aliuminio apdirbimo tyrimas:

**3.6 lentelė.** Didžiausios parametų vertės užfiksuotos 12 mm diametro frezomis apdirbant aliuminį

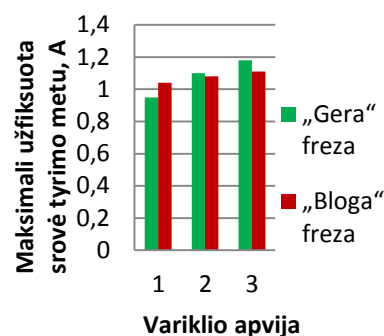
| Medžiaga               |                 | Aliuminis    |      |        |               |       |        |
|------------------------|-----------------|--------------|------|--------|---------------|-------|--------|
| Parametras             |                 | „Gera“ freza |      |        | „Bloga“ freza |       |        |
| Vibracijos             | Ašis            | X            | Y    | Z      | X             | Y     | Z      |
|                        | Min, G          | 53,5         | -6,5 | -199,5 | -18,5         | -68,5 | -211   |
|                        | Max, G          | 68           | 14   | -178,5 | 143           | 92,5  | -148,5 |
|                        | Skirtumas, G    | 14,5         | 20,5 | 21     | 161,5         | 161   | 62,5   |
| Energijos suvartojimas | Variklio apvija | 1            | 2    | 3      | 1             | 2     | 3      |
|                        | Max, A          | 0,95         | 1,1  | 1,18   | 1,04          | 1,08  | 1,11   |
| Temperatūra            | Max, °C         | 231          |      |        | 322           |       |        |



a)



b)

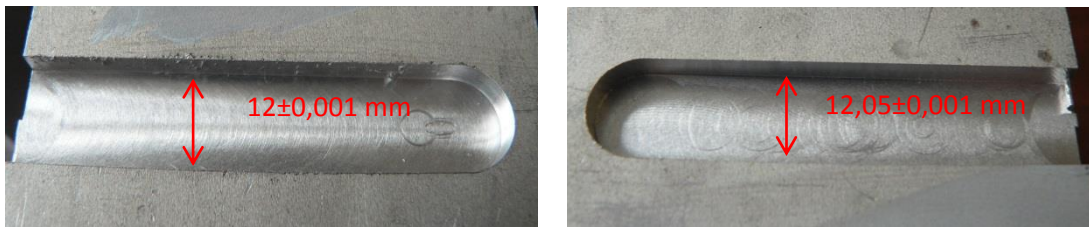


c)

**3.33 pav.** Didžiausios a) vibracijų b) temperatūros ir c) pagrindinio variklio suvartojamo energijos kiekio vertės užfiksuotos 12 mm diametro frezomis apdirbant aliuminį

3.33 pav. matyti, jog apdirbant aliuminį dvylikos milimetrų diametro frezomis, vibracijų, temperatūros ir suvartojamos energijos kiekio lygis skiriasi lyginant apdirbimą „gera“ ir „bloga“ frezomis. Vibracijų skirtumai didžiausi iš visų aliuminio tyrimų ir siekia ~67-91%. Temperatūros skirtumas 29 %, o energijos suvartojimas dėl aliuminio suminkštėjimo yra beveik lygus apdirbant ruošinį tiek su „gera“, tiek su „bloga“ frezomis.

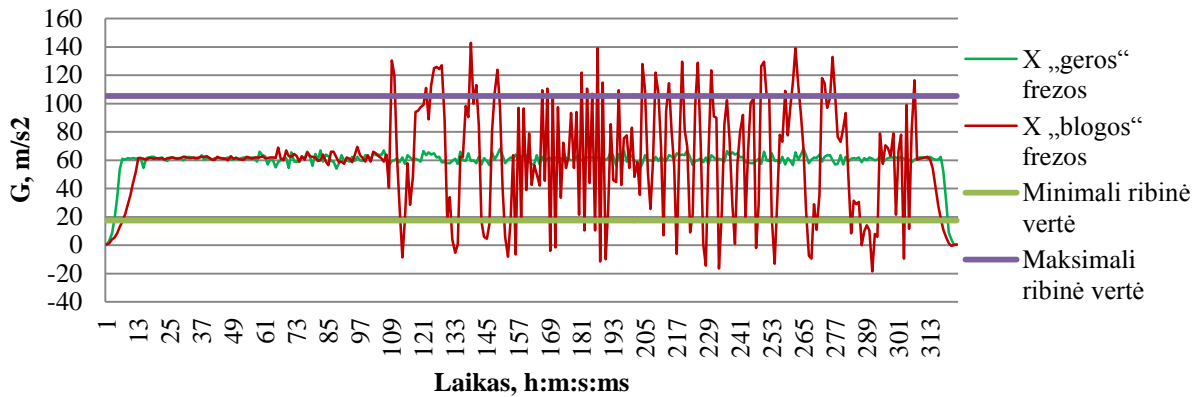
Skirtumai tarp apdirbimo „gera“ ir „bloga“ dvylikos milimetrų diametro frezomis yra mažiau pastebimi ant aliuminio ruošinių nei su šiomis frezomis ant plieno ruošinio – matmenų skirtumas 0,05 mm, o ant ruošinio, apdirbto su nebetinkančia naudojimui freza, paviršiaus matomi neryškūs defektai. Ruošinių, apdirbtų su „gera“ ir „bloga“ dvylikos milimetrų frezomis pavyzdžiai pateikti 3.34 pav.



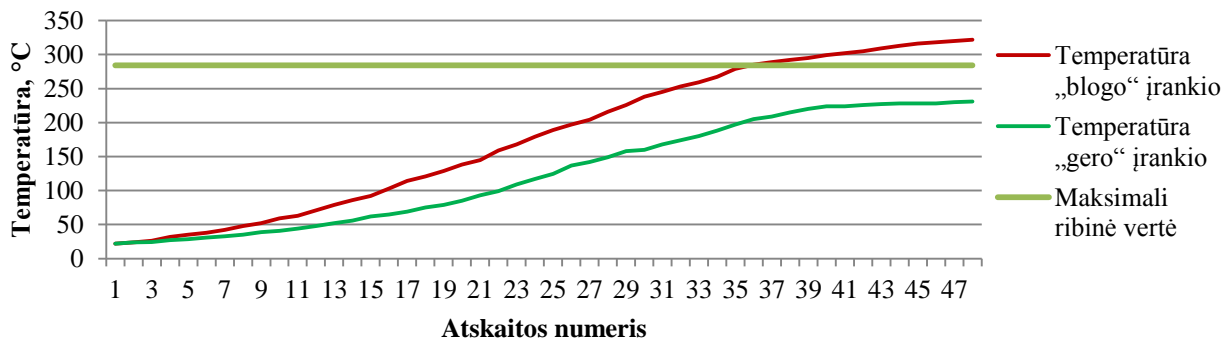
a)

b)

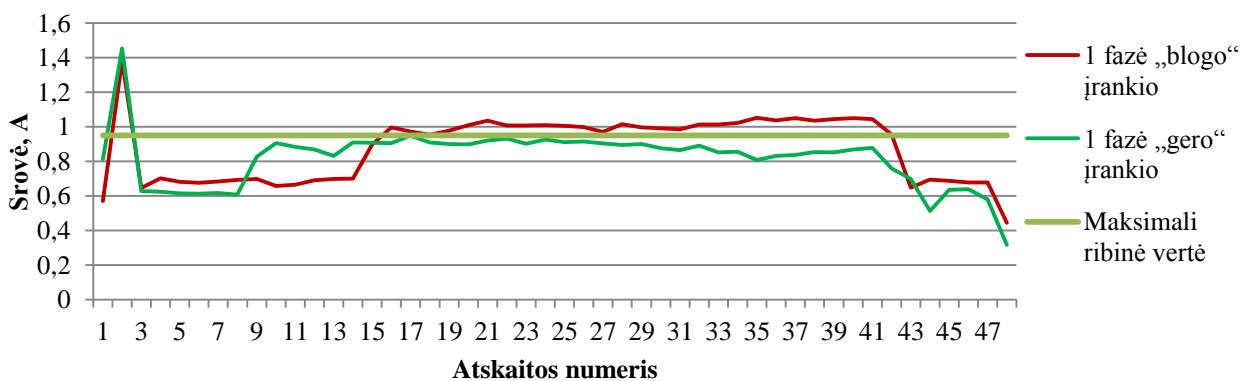
**3.34 pav.** Apdirbimo kokybė frezuojant aliuminį 12 mm diametro a) „gera“ ir b) „bloga“ freza



**3.35 pav.** Vibracijos, atsirandančios y ašyje frezuojant 12 mm diametro frezomis aliuminį



**3.36 pav.** Temperatūra, atsirandanti frezuojant 12 mm diametro frezomis aliuminį



**3.37 pav.** Srovės, atsirandančios pagrindinio variklio 1 apvijoje frezuojant 12 mm diametro frezomis aliuminį

Šiai frezai, naudojant aliuminį ir nustatytus apdirbimo režimus, vibracijų minimali ribinė vertė lygi 17,5G, o maksimali 105,5G, temperatūros maksimali vertė 284 °C, suvartojamos energijos kiekio maksimali vertė 0,95 A. Tirtu atveju, frezuojant aliuminį „bloga“ freza vibracijų vertės viršija užsiduotas ribines vertes 0,2-34G, temperatūrų – 38 °C, o energijos suvartojimo – 0,1 A. Dideli skirtumai vibracijų ir temperatūros parametruose, apdirbant aliuminį su „gera“ ir „bloga“ frezomis, kaip ir nemažas matmenų skirtumas bei prasta apdirbimo kokybė, rodo, kad dvylikos milimetrų diametro „bloga“ freza yra stipriai nudilusi ir ypatingai netinkama kietesnio metalo - plieno apdirbimui.

Visi dvylikos milimetrų diametro frezos vibracijų tyrimo rezultatai pateikti 7 priede.

Visi dvylikos milimetrų diametro frezos srovės tyrimo rezultatai pateikti 9 priede.

*Apibendrinimas.* Atsižvelgiant į atliktus dvylikos milimetrų diametro frezos tyrimus, naudojant tiek plieną, tiek aliuminį, galima teigti, kad vibracijų ir temperatūrų matavimą tikslinga pritaikyti kuriant sistemą, nusakančią įrankio nudilimą, nes skirtumai tarp apdirbimo „gera“ ir „bloga“ frezomis parametrų aiškiai matomi. Energijos suvartojimo tyrimas reikšmingas naudojant plieną, o aliuminio atveju galimai iškreipti dėl suminkštėjimo esant aukštai temperatūrai.

Nustatytos šio diametro frezos parametrų ribinės reikšmės. Tyrimo metu įsitikinta, kad „bloga“ freza šias reikšmes pasiekia, todėl būtų galima šias ribines vertes dėti į duomenų bazę, kuria naudojantis įrankio būklės stebėjimo sistema diagnozuotų ir signalizuotų netinkamą apdirbimui įrankį.

#### *Pastebėjimai ir rekomendacijos*

Atliekant metalo apdirbimo įrankio būklės tyrimą, pastebėta, kad vibracijos, temperatūra ir pagrindinio variklio energijos suvartojimas yra parametrai, leidžiantys spręsti apie įrankio nudilimą. Nepriklausomai nuo apdirbimo įrankio diametro ir apdirbamos medžiagos, visais atvejais, šie parametrai pastebimai skiriasi lyginant apdirbimą „gera“ ir nebetinkama naudojimui freza.

Atliekant tyrimą, pastebėta, jog vibraciją sukelia ne tik nudilęs įrankis, bet ir kiti veiksniai. Vienas iš jų yra apdirbimo režimas, kuris kinta ne tik nuo įrankio ar medžiagos, bet ir nuo pačių CNC staklių standumo. Skirtingo tipo ar gamintojo staklių standumai skiriasi. Taip pat vibracijų stiprumui svarbi ir apdirbama medžiaga - net tas pats, tos pačios rūšies ir markės metalas skirtingose liejimo partijose gali turėti priemaišų, pakeičiančių visą apdirbimo procesą.

Atlikus bandymą su pasirinktomis aštuonių, dešimties ir dvylikos milimetrų diametro frezomis didžiausias vibracijų lygis užfiksuotas tiriant apdirbimą dvylikos milimetrų freza, tiek su plienu, tiek su aliuminiu. Jis net kelis kartus viršijo vibracijas, gautas aštuonių milimetrų ir dešimties milimetrų diametro frezomis. Toks vibracijų netolygumas didinant frezų dydį galėjo

atsirasti dėl to, jog visi tirtieji „blogi“ įrankiai buvo nudilę skirtingai – daugiausiai nudilęs buvo dvylikos milimetrų diametro įrankis, mažiausiai – dešimties.

Kadangi tyrimas atliktas su skirtingais metalais ir įrankiais galima teigti, jog vibracija tikrai charakterizuoja visų apdirbimo įrankių būklę. Stebint vibracijų dydį masinėje gamyboje, pagal jas galima spręsti apie įrankio tinkamumą apdirbimo procesui ir atpažinti nusidėvėjusį įrankį. Vibracijos matavimo privalumas - norint įdiegti jutiklį, nereikia modifikuoti apdirbimo įrankių, o tik įrankių laikiklius. Be to, vibracijos gali parodyti net ir mažų frezų būseną, o žinant, kad naudojamas įrankis „geras“, padidėjusios vibracijos parodo prastą suklio būklę arba netinkamus metalo apdirbimo režimus.

Pastebėta, jog temperatūros stebėjimas duoda didelę naudą nustatant įrankio būklę, tačiau šio parametro pritaikymui pramonėje būtina įrankio modifikacija t.y. temperatūros jutiklio integracija į jį. Stebint įrankio laikiklio temperatūrą didelio temperatūros pokyčio ir efektyvaus sistemos reagavimo į nudilusį įrankį apdirbant medžiagą trumpą laiką neverta tikėtis, nes laikiklio masė yra didelė ir trumpo apdirbimo metu šiluma joje pasiskirsto stipriai nepakeldama temperatūros. Stebint temperatūrą arti apdirbamo paviršiaus galima pastebėti netinkamus apdirbimo režimus – tai pastebima, kai žinoma, kad apdirbimo įrankis yra „geras“, o temperatūra vis tiek pastebimai kyla.

Išanalizavus pagrindinio variklio suvartojamos energijos kiekio pokyčius, galima daryti išvadą, jog nors kai kuriais atvejais šis parametras leidžia spręsti apie įrankio būklę, stebint tik srovės suvartojimą nematomi mažų įrankių nudilimai. Taip yra dėl to, kad jie neturi didelio paviršiaus sąlyčio su apdirbama medžiaga ir negali tiek apkrauti variklio, kad skirtumas tarp apdirbimo „gera“ ir „bloga“ frezomis būtų pastebimas.

Suvartojamos energijos kiekio pokyčio svarba matoma ne visuose tyrimuose – teisingi duomenys gaunami tik tyrimuose su plieniu, nes apdirbant aliuminį jie galima iškreipiami dėl aliuminio minkštėjimo pasiektoje temperatūroje. Apdirbant plieną, pastebėta tendencija, kad didinant frezos diametrą, didėja verčių skirtumas tarp apdirbimo „gera“ ir „bloga“ frezomis. Šio parametro privalumas - matavimas paprastai įgyvendinamas ir pritaikomas pramoniniam naudojimui.

Siekiant panaudoti tyrimo metu gautus rezultatus, sistemos, kuri nusakytų įrankio būklę, kūrimui, sukurti ribinių verčių nustatymo scenarijus t.y. būdas, kuriuo remiantis būtų gaunamos ribinės vertės konkreitiems įrankiams ir apdirbimo režimams, o gauta informacija būtų sukeliama į sistemos duomenų bazę. Iš sistemos duomenų bazės parinkus naudojamą įrankį ir apdirbama medžiagą, sistema vykdančią apdirbimą, pagal ribines vertes identifikuotų įrankio nudilimą ir apie tai signalizuotų. Tyrimo metu buvo nustatytos visų trijų diametrų frezų ir abiejų metalų apdirbimo ribinės vibracijų, temperatūrų ir suvartojamos energijos kiekio vertės bei paskaičiuota

kokiomis vertėmis šias ribas peržengia konkrečios tirtos frezos, veikiant nustatytiems apdirbimo režimams. Pažymėtina, kad kuriant metalo apdirbimo mašinos įrankio būklę nusakančią sistemą, būtina atsižvelgti į aplinką, kurioje sistema veiks, parametrų vertes, kurias matuos bei vietą kur turi būti integruota tinkamam parametrų fiksavimui. Tyrimas parodė, kad siekiant gauti tikslius ir teisingus rezultatus, labai svarbu tinkamai parinkti apdirbimo režimą kiekvienai apdirbamai medžiagai ir įrankiui bei subalansuoti įrankio laikiklį su įdiegta sistema. Pastebėta, kad norint parinkti tinkamą režimą reikalingas aušinimas, o tam reikia užtikrinti sistemos atsparumą drėgmei. Norint matuojamų parametrų rezultatus ne tik stebėti, bet ir apdoroti bei analizuoti, reikia įgyvendinti duomenų siuntimą bevieliu ryšiu bei saugojimą laikmenoje.

## IŠVADOS

1. Ištirta rinka ir nustatyta, kad vienintelė panašios paskirties sistema - „Suprocktech“ eksperimentinis modelis. Vartotojams prieinamų sistemų, pritaikomų metalo apdirbimo mašinų įrankių būklės analizei nėra, todėl tokia sistema būtų naudinga, nes padidintų metalo apdirbimo įmonių darbo našumą.

2. Tyrimo objektu pasirinkti dažniausiai naudojamo metalo apdirbimui tipo – kietlydinio - trijų skirtingų diametrų – 8 mm, 10 mm ir 12 mm – apdirbimo įrankiai ir du metalai – aliuminis ir plienas. Pagal tai kiekvienai frezai ir metalui apskaičiuoti apdirbimo režimai – pagrindinio variklio apsisukimo dažnis ir apdirbamo paviršiaus judėjimo greitis, kurie pritaikyti rašant apdirbimo programą.

3. Pagal apdirbimo sąlygas jutikliams nustatytos matavimo ribos: temperatūrai 0-1000 °C, vibracijoms 0-250G, energijos suvartojimui 0-100A. Nustatyta, kad vibracijos jutiklio maksimalus dydis gali būti 4x4 mm, o temperatūros jutiklį privalu montuoti kuo arčiau apdirbamo paviršiaus.

4. Išanalizuoti rinkoje esantys jutikliai. Temperatūros matavimui parinkta kontaktinio matavimo, mažo korpuso, lengvai integruojama arti apdirbamo paviršiaus K tipo termopora, kurios matavimo ribos 0-2315<sup>0</sup>C. Vibracijų matavimui parinktas ADXL366 akcelerometras, kurio matavimo ribos ±250G, o korpuso dydis 3x3 mm. Pagrindinio variklio suvartojamos energijos matavimui parinktas PEL 103 tinklo analizatorius, kurio matavimo ribos 0-100 A.

4. Panaudojant pasirinktus jutiklius, sukurta eksperimentinė įranga: suprojektuota elektrinė-principinė schema, sudaryta spausdintino montažo schema, sukurta programa ir pagaminta įranga. 3 D spausdintuvu iš trijų dalių – apkabos, dėžutės ir dangtelio – pagamintas korpusas, kuriuo įrenginys tvirtinamas prie SK 40 įrankio laikiklio.

5. Sukurta eksperimentinė įranga atliktas frezavimo įrankio būklės tyrimas. Nustatyta, kad 8 mm diametro frezos būklę gerai charakterizavo temperatūra ir vibracijos, kadangi pastebėti aiškūs skirtumai tarp šių parametrų verčių, lyginant apdirbimą „gera“ ir „bloga“ freza. Šio diametro freza apdirbant plieną, vibracijų vertės skyrėsi 50-62 %, o temperatūros - 27 %. Aliuminio apdirbimo metu vibracijų skirtumas siekė 55 %, o temperatūros – 20 %. Kadangi variklio energijos sunaudojimo vertės plieno apdirbimo metu skyrėsi tik 7 %, o aliuminio 15 %, lyginant apdirbimą „gera“ ir „bloga“ frezomis, galima teigti, kad šis parametras nėra informatyvus nustatant 8 mm diametro įrankio būklę.

Tiriant 10 mm diametro įrankį pastebėtos skirtingos parametrų verčių skirtumų tendencijos. Apdirbant plieną informatyviausi rodikliai buvo vibracijos ir suvartojamos energijos kiekis, kurių skirtumai, lyginant apdirbimą „gera“ ir „bloga“ frezomis siekė iki 21 %, kai tuo

tarpu temperatūros – iki 13 %. Apdirbant aliuminį didžiausi verčių skirtumai užfiksuoti matuojant temperatūrą – iki 31 %, o vibracijas – iki 15 %. Pastebėta, kad aukšta temperatūra priverčia aliuminį suminkštėti ir dėl to iškreipia energijos suvartojimo rezultatus, todėl šis parametras nėra tinkamas nusakyti 10 mm diametro įrankio būklę apdirbant aliuminį.

12 mm diametro įrankio tyrimo metu pastebėta, kad šio įrankio nudilimą geriausiai charakterizuoja vibracijos, kurių skirtumas, apdirbant medžiagą „gera“ ir „bloga“ frezomis plieno atveju siekia 86 %, o aliuminio - net 91 %. Tai didžiausi parametru skirtumai, užfiksuoti visame tyrime. Temperatūrų skirtumai taip pat gerai nusako įrankio būklę ir tiek plieno, tiek aliuminio tyrimo atveju siekia 26 %. Pastebėta tendencija, kad didėjant įrankio diametrai, plieno apdirbimo metu, energijos suvartojimo parametro reikšmė taip pat didėja – 12 mm diametro įrankiui siekia 26 % (8 mm diametro 7 %, 10 mm diametro – 21 %). Apdirbant aliuminį pastebėta analogiška situacija, kaip tiriant 10 mm diametro frezą – suminkštėjęs metalas galimai iškreipė parametro matavimo rezultatus.

Pastebėta, kad lyginant apdirbimą „gera“ ir „bloga“ frezomis vibracijų ir temperatūros verčių skirtumai daugeliu atvejų viršija 20 %, todėl šiuos parametrus tikslinga panaudoti kuriant metalo apdirbimo įrankio būklės nustatymo sistemą.

Nustatyta, kad skirtumai, tarp apdirbimo „gera“ ir „bloga“ frezomis matomi ant apdirbtų metalų ruošinių. Didžiausi išfrezuotų kontūrų matmenų skirtumai gaunami apdirbant 8 mm diametro įrankiu - plienui 0,07 mm, aliuminiui 0,11 mm, o mažiausi - 10 mm diametro įrankiu - plienui 0,07 mm, aliuminiui 0,02 mm. Šie skirtumai gaunami dėl nevienodo „blogų“ frezų nusidėvėjimo.

6. Pagal gautus parametru tyrimo rezultatus kiekvienai tirtai frezai ir metalui nustatytos ribinės vibracijų, temperatūros ir pagrindinio variklio suvartojamos energijos kiekio, vertės, kurios kuriant įrankio būklę nusakančią sistemą atliktų pagrindinį identifikacinį vaidmenį – parametrai pasiekus ribines vertes būtų identifikuojamas ir signalizuojamas įrankio nudilimas. Šios vertės yra lygios 50 % nuo maksimalių parametru, gautų apdirbant „bloga“ freza ir „gera“ freza skirtumo.

8 mm diametro įrankio ir plieno tyrimo metu vibracijos ribinę vertę (kuri lygi 6,25G) viršijo 5 G, temperatūra (198 °C) - 30 °C, o energijos suvartojimas (1,075 A) – 0,04 A. Šia freza apdirbant aliuminį, vibracijos ribinę vertę (kuri lygi 12G) viršijo 4 G, temperatūra (236 °C) - 24 °C, o energijos suvartojimas (0,86 A) – 0,12 A.

Tiriant 10 mm diametro įrankį ir plieną, vibracijos ribinę vertę (kuri lygi 13,25G) viršijo 1,25 G, temperatūra (251 °C) - 14 °C, o energijos suvartojimas (1,15 A) – 0,1 A. Šia freza apdirbant aliuminį, vibracijos ribinę vertę (kuri lygi 13,25G) viršijo 0,7 G, temperatūra (300,5 °C) - 36 °C, o energijos suvartojimas (1,025 A) – 0,06 A.

12 mm diametro įrankiu apdirbant plieną, vibracijos ribinę vertę (kuri lygi 63,75G) viršijo 25G, temperatūra (260,5 °C) - 38 °C, o energijos suvartojimas (1,5 A) – 0,3 A. Šia freza apdirbant aliuminį, vibracijos ribinę vertę (kuri lygi 105,5G) viršijo 34 G, temperatūra (284 °C) - 36 °C, o energijos suvartojimas (0,95 A) – 0,1 A.



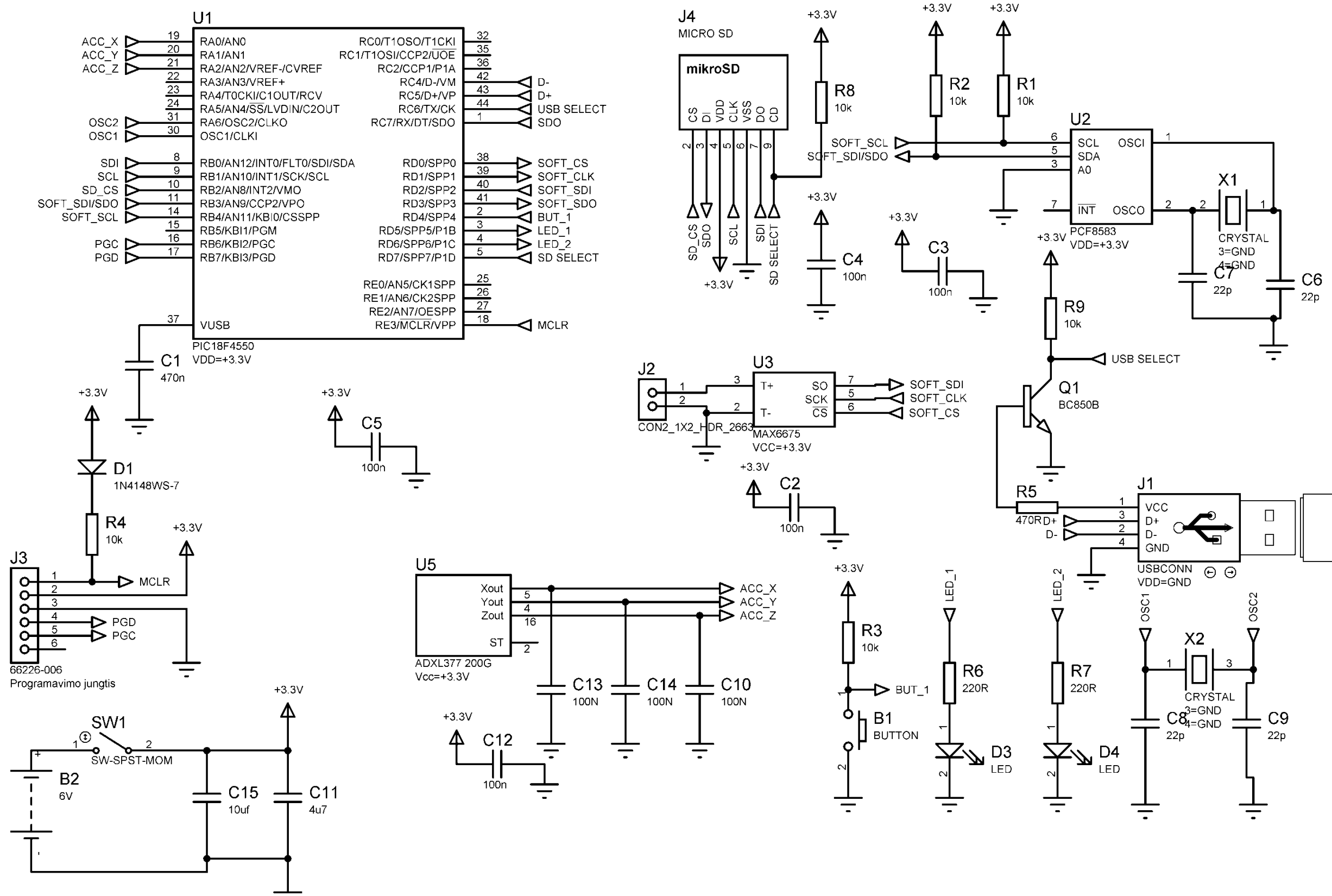
## LITERATŪROS ŠARAŠAS

1. Metalo apdirbimo sektoriaus analizė [interaktyvus] 2010. [žiūrėta 2015 – 03 – 24]. Prieiga per internetą: [http://www.verslilietuva.lt/files/files/PDF/metalu\\_apdirbimo\\_sektorius.pdf](http://www.verslilietuva.lt/files/files/PDF/metalu_apdirbimo_sektorius.pdf)
2. Temperatūros matavimo sistema Pt-21/22 [interaktyvus] 2015[žiūrėta 2015 – 03 – 24]. Prieiga per internetą: <http://www.kingtill.com/Thermocouple-Thermometer-PT-21-22-s-36.html>
3. Temperatūros matavimo sistema PR-30A [interaktyvus] 2015[žiūrėta 2015 – 03 – 24]. Prieiga per internetą: <http://www.kingtill.com/Infrared-Thermal-Imager-PR-30A-s-90.html>
4. Temperatūros matavimo sistema TOPSW-11,21 [interaktyvus] 2015[žiūrėta 2015 – 03 – 28]. Prieiga per internetą: [http://interautomatika.lt/topsw-1121-ttjsw-1121-ttksw-1121?3\\_20=](http://interautomatika.lt/topsw-1121-ttjsw-1121-ttksw-1121?3_20=)
5. Temperatūros matavimo sistema E5CWT [interaktyvus] 2015[žiūrėta 2015 – 03 – 28]. Prieiga per internetą: <http://www.made-in-china.com/showroom/susanna-panglobe/product-detailBboEGdkvlMWD/China-Temperature-Controller-E5CWT-.html>
6. Temperatūros matavimo sistema MBT 5250 [interaktyvus] 2015[žiūrėta 2015 – 03 – 28]. Prieiga per internetą: <http://sensors.danfoss.com/temperature-sensors/mbt5250-mbt5260-mbt5252/>
7. Vibracijų matavimo sistema Extech 461880 [interaktyvus] 2015[žiūrėta 2015 – 03 – 28]. Prieiga per internetą: <http://www.extech.com/instruments/product.asp?catid=21&prodid=541>
8. Vibracijų matavimo sistema SVAN 946 [interaktyvus] 2015[žiūrėta 2015 – 03 – 28]. Prieiga per internetą: [http://www.acu-vib.com.au/svan\\_946.htm](http://www.acu-vib.com.au/svan_946.htm)
9. Srovės matavimo sistema PEL103 [interaktyvus] 2015[žiūrėta 2015 – 03 – 28]. Prieiga per internetą: <http://www.chauvin-arnoux.com/en/produit/pel103-power-energy-logger.html>
10. Sistema stebinti įrankio būklę [interaktyvus] 2015[žiūrėta 2015 – 03 – 28]. Prieiga per internetą: <http://www.sensorsmag.com/sensors/acceleration-vibration/making-smarter-tools-1533>
11. Fizikiniai jutiklių pagrindai, 1 dalis [interaktyvus]. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, Fizikos katedra 2010. [žiūrėta 2014 – 04 – 14]. Prieiga per internetą: <http://www.fizika.ktu.lt/Fizjut/Jutikliu-pagrindai-konspektas-1-3.doc>.
12. Fizikiniai jutiklių pagrindai, 2 dalis [interaktyvus]. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, Fizikos katedra 2010. [žiūrėta 2014 – 04 – 15]. Prieiga per internetą: <http://www.fizika.ktu.lt/Fizjut/Jutpgkonsp-2-3.doc>.

13. Pjezo keramikos jutikliai [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014 – 09 – 20]. Prieiga per internetą: <<https://www.sparkfun.com/products/9199>>.
14. Vibracijos matavimas [interaktyvus] 2012 – 08 – 05. [žiūrėta 2014 – 09 – 20]. Prieiga per internetą: <http://www.coleparmer.com/TechLibraryArticle/825>
15. Termoporos signalo keitiklio MAX6675 techninis aprašas [interaktyvus] 2010. [žiūrėta 2015 – 01 – 16]. Prieiga per internetą: < <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>>.
16. Akcelerometro ADXL377 techninis aprašas [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2015 – 04 – 16]. Prieiga per internetą: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL377.pdf>
17. Mikrovaldiklio PIC18LF4550 techninis aprašas [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2015 – 04 – 16]. Prieiga per internetą: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>
18. RTC laikrodžio techninis aprašas [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2015 – 04 – 16]. Prieiga per internetą: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/PCF8583.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCF8583.pdf)

## PRIEDAI

Priedas 1. Eksperimentinės įrangos elektrinė schema



## Priedas 2. Metalo apdirbimo programos

Metalo apdirbimo programa 8 mm VHM frezai, apdirbant aliuminį:

```
N1 G90
N2 ; set machine zero point 'G49'
N3 G54
N5 T6
N6 M6
N7 D1
N8 G94 F140 S1800 M3
N9 G0 X-115 Y110
N10 G0 Z10 M8
N11 G0 X0 Y6
N12 G0 Z4
N13 G1 Z-4 F90 M8
N14 G1 X50 F140 M8
N15 G0 Z4
N16 G0 Z10
N21 M30
```

Metalo apdirbimo programa 8 mm VHM frezai, apdirbant plieną:

```
N1 G90
N2 ; set machine zero point 'G49'
N3 G54
N5 T6
N6 M6
N7 D1
N8 G94 F78 S990 M3
N9 G0 X-115 Y110
N10 G0 Z10 M8
N11 G0 X0 Y6
N12 G0 Z4
N13 G1 Z-4 F90 M8
N14 G1 X50 F78 M8
N15 G0 Z4
N16 G0 Z10
N21 M30
```

Metalo apdirbimo programa 10 mm VHM frezai, apdirbant aliuminį:

```
N1 G90
N3 G54
N5 T6
N6 M6
N7 D1
N8 G94 F136 S2200 M3
N9 G0 X-115 Y110
N10 G0 Z10 M8
N11 G0 X0 Y6
N12 G0 Z4
N13 G1 Z-5 F90 M8
N14 G1 X50 F136 M8
N15 G0 Z4
N16 G0 Z10
N21 M30
```

Metalo apdirbimo programa 10 mm VHM frezai, apdirbant plieną:

N1 G90  
N3 G54  
N5 T6  
N6 M6  
N7 D1  
N8 G94 F75 S1200 M3  
N9 G0 X-115 Y110  
N10 G0 Z10 M8  
N11 G0 X0 Y6  
N12 G0 Z4  
N13 G1 Z-5 F50 M8  
N14 G1 X50 F75 M8  
N15 G0 Z4  
N16 G0 Z10  
N21 M30

Metalo apdirbimo programa 12 mm VHM frezai, apdirbant aliuminį:

N1 G90  
N3 G54  
N5 T6  
N6 M6  
N7 D1  
N8 G94 F105 S2200 M3  
N9 G0 X-115 Y110  
N10 G0 Z10 M8  
N11 G0 X0 Y6  
N12 G0 Z4  
N13 G1 Z-6 F50 M8  
N14 G1 X50 F105 M8  
N15 G0 Z4  
N16 G0 Z10  
N21 M30

Metalo apdirbimo programa 12 mm VHM frezai, apdirbant plieną:

N1 G90  
N3 G54  
N5 T6  
N6 M6  
N7 D1  
N8 G94 F60 S1200 M3  
N9 G0 X-115 Y110  
N10 G0 Z10 M8  
N11 G0 X0 Y6  
N12 G0 Z4  
N13 G1 Z-6 F50 M8  
N14 G1 X50 F60 M8  
N15 G0 Z4  
N16 G0 Z10  
N21 M3

### Priedas 3. Apdirbimų režimų skaičiavimai

Apdirbimo parametrai:

- 12 mm VHM frezai:
  - Apdirbama medžiaga: Aliuminis.

Pagal 5.1 formulę:  $n = \frac{100 \cdot 1000}{3.14 \cdot 12} = 2654 \text{ aps/min};$

Pagal 5.2 formulę:  $f_v = 2654 \cdot 3 \cdot 0.026 = 207 \text{ mm/min};$

— Apdirbama medžiaga : Plienas.

Pagal 5.1 formulę:  $n = \frac{55 \cdot 1000}{3.14 \cdot 12} = 1460 \text{ aps/min};$

Pagal 5.2 formulę:  $f_v = 1460 \cdot 3 \cdot 0.026 = 114 \text{ mm/min};$

- 10 mm VHM frezai:
  - Apdirbama medžiaga: Aliuminis.

Pagal 5.1 formulę:  $n = \frac{100 \cdot 1000}{3.14 \cdot 10} = 3184 \text{ aps/min};$

Pagal 5.2 formulę:  $f_v = 3184 \cdot 3 \cdot 0.026 = 200 \text{ mm/min};$

— Apdirbama medžiaga: Plienas.

Pagal 5.1 formulę:  $n = \frac{55 \cdot 1000}{3.14 \cdot 10} = 1752 \text{ aps/min};$

Pagal 5.2 formulę:  $f_v = 1752 \cdot 3 \cdot 0.026 = 110 \text{ mm/min};$

- 8 mm VHM frezai:
  - Apdirbama medžiaga: Aliuminis.

Pagal 5.1 formulę:  $n = \frac{100 \cdot 1000}{3.14 \cdot 8} = 3981 \text{ aps/min};$

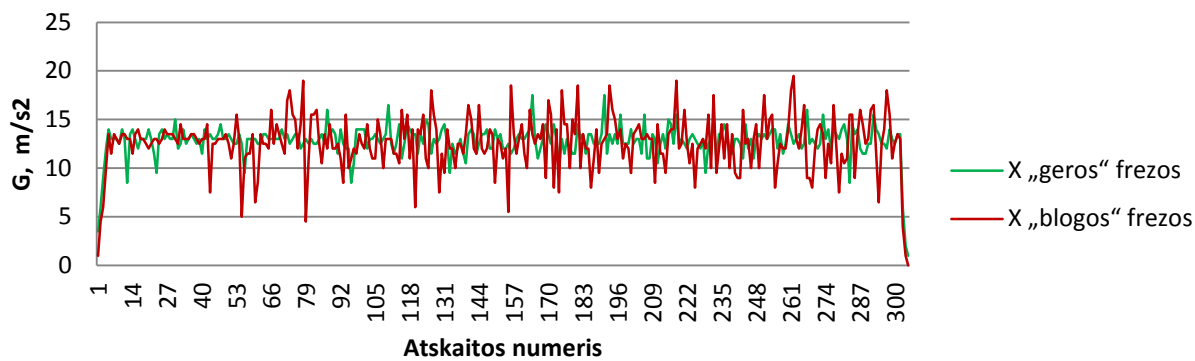
Pagal 5.2 formulę:  $f_v = 3981 \cdot 3 \cdot 0.026 = 191 \text{ mm/min};$

— Apdirbama medžiaga: Plienas.

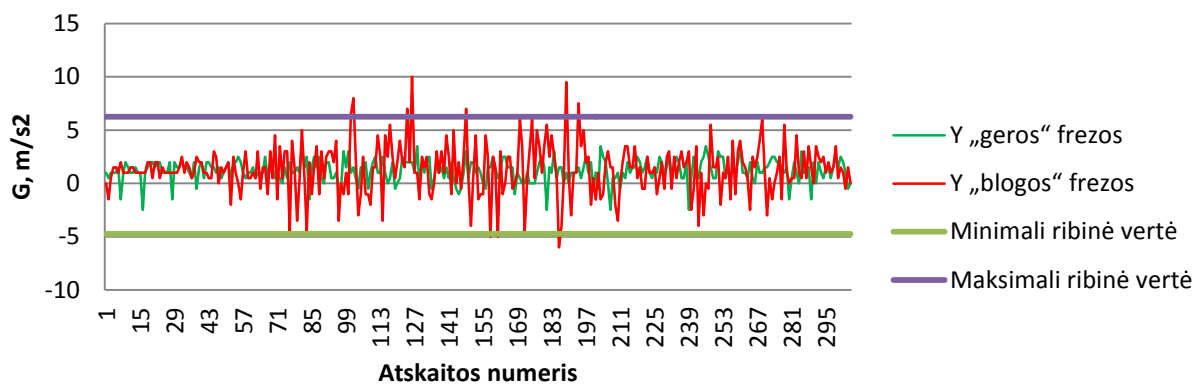
Pagal 5.1 formulę:  $n = \frac{55 \cdot 1000}{3.14 \cdot 10} = 2190 \text{ aps/min};$

Pagal 5.2 formulę:  $f_v = 2190 \cdot 3 \cdot 0.026 = 105 \text{ mm/min};$

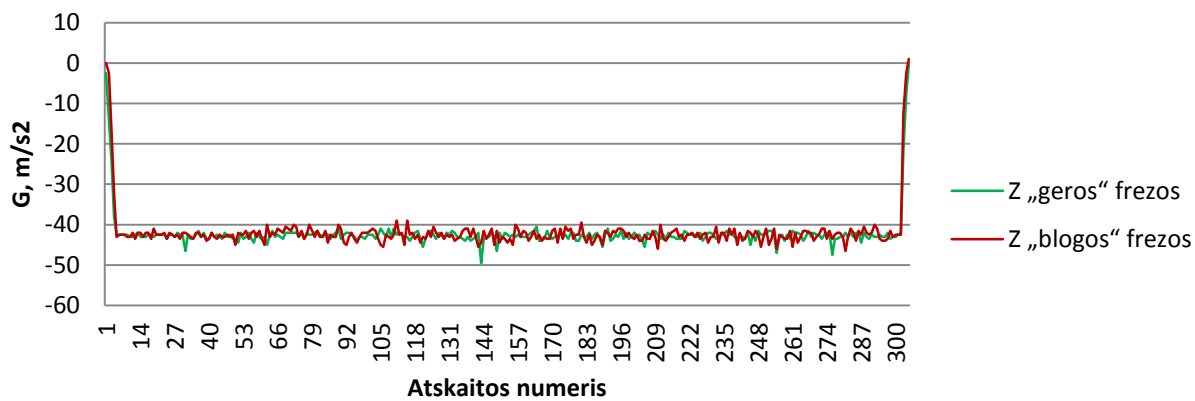
#### Priedas 4. 8 mm frezos vibracijų tyrimas



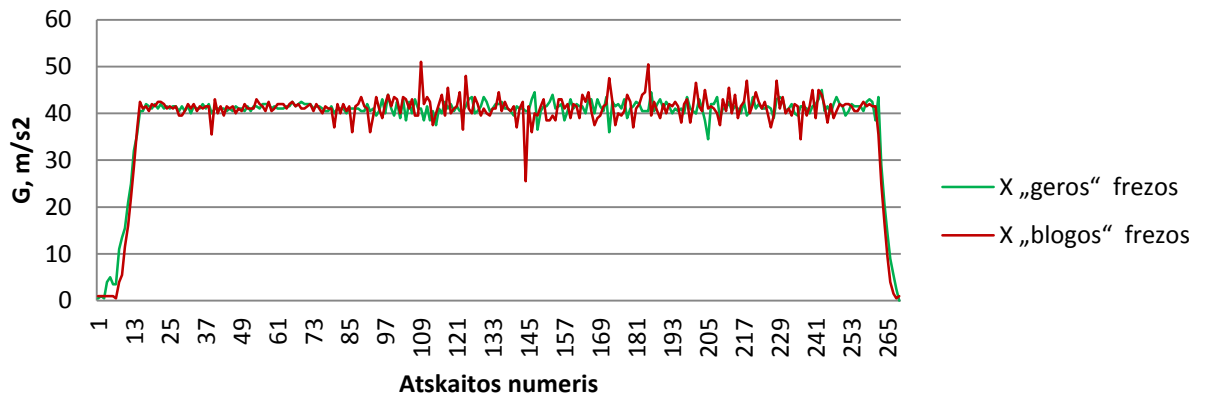
Vibracijos atsirandančios x ašyje frezuojant 8 mm frezomis plieną



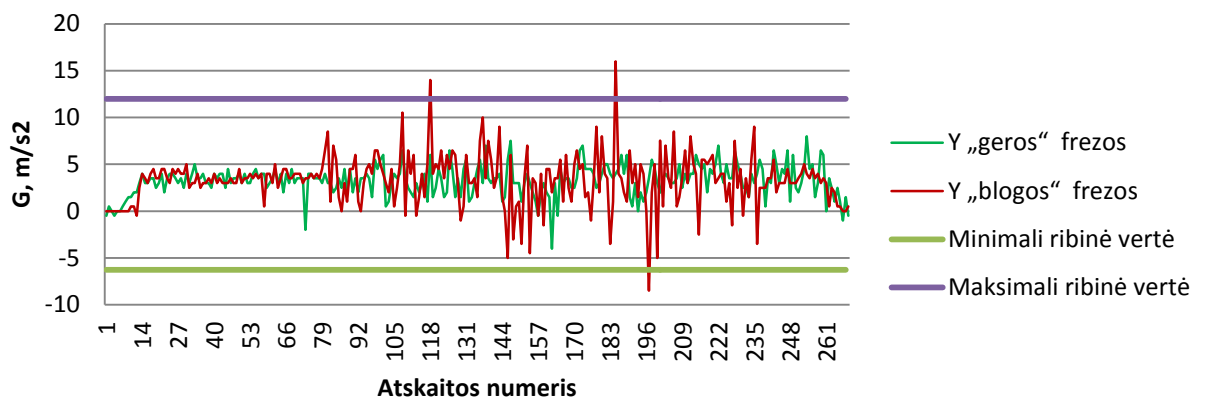
Vibracijos atsirandančios y ašyje frezuojant 8 mm frezomis plieną



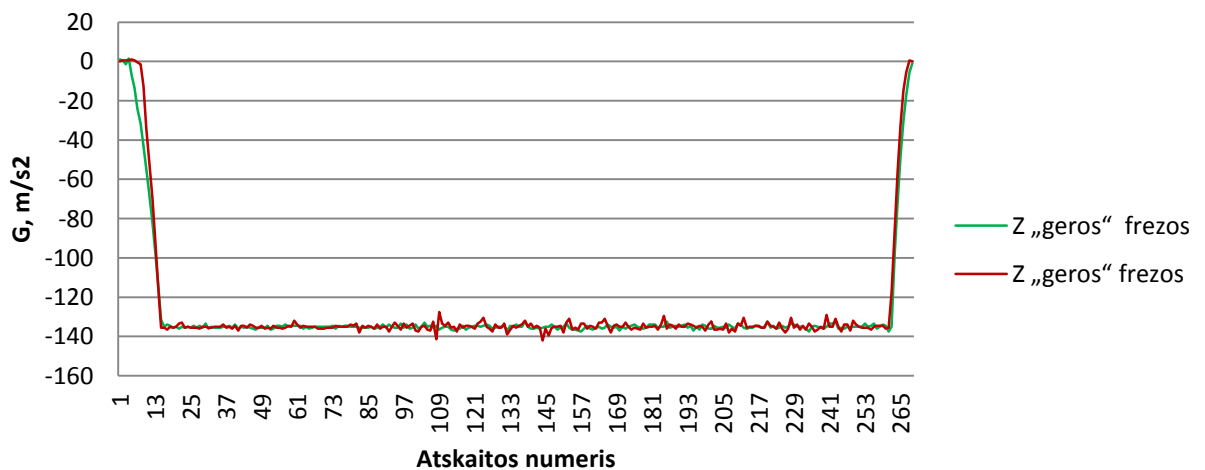
Vibracijos atsirandančios z ašyje frezuojant 8 mm frezomis plieną



Vibracijos atsirandančios x ašyje frezuojant 8 mm frezomis aliuminį



Vibracijos atsirandančios y ašyje frezuojant 8 mm frezomis aliuminį

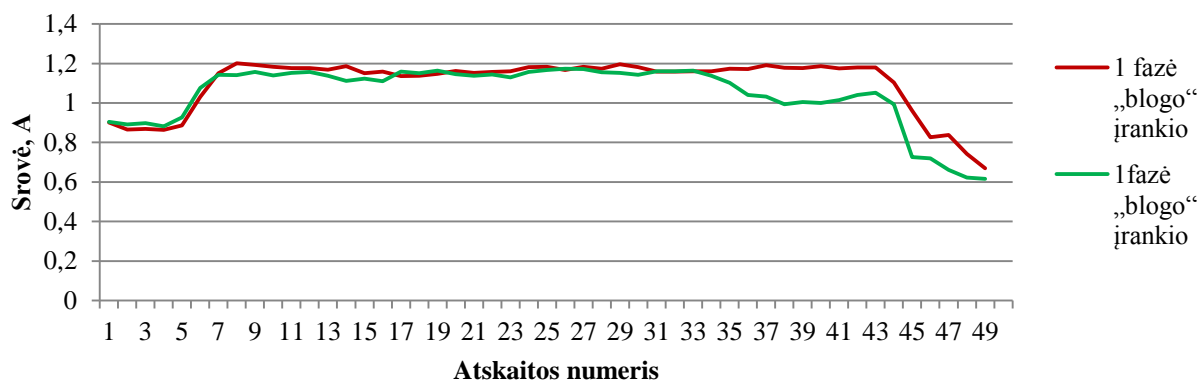


Vibracijos atsirandančios z ašyje frezuojant 8 mm frezomis aliuminį

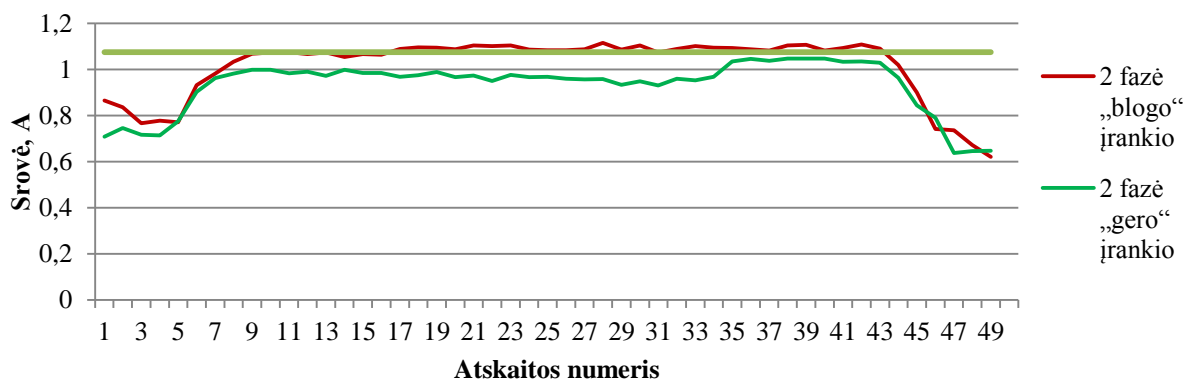


**Priedas 5. 8 mm frezos energijos suvartojimo tyrimas**

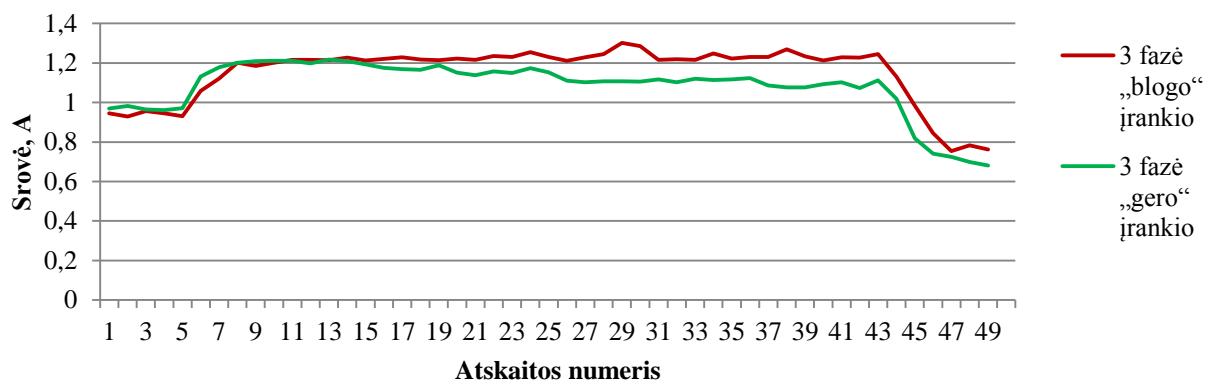
*8 mm VHM frezos tyrimas:*



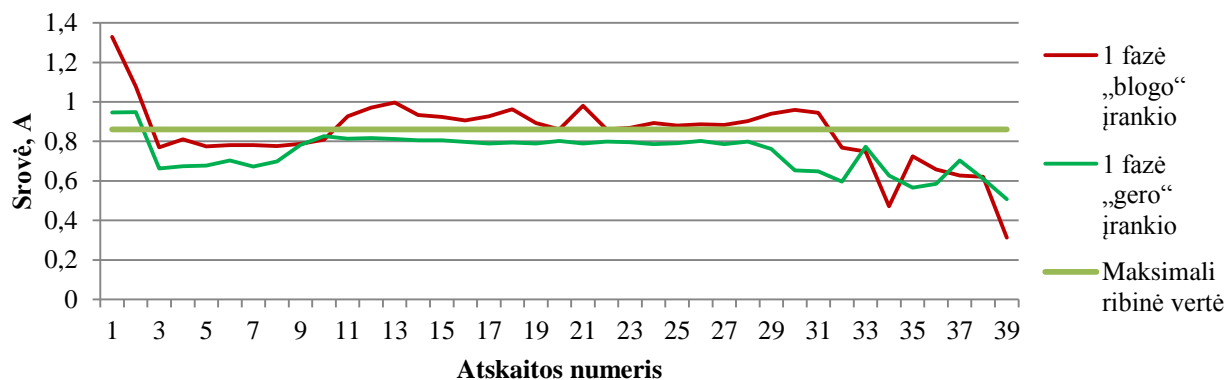
Srovės atsirandančios pagrindinio variklio 1 apvijoje frezuojant 8 mm frezomis plieną



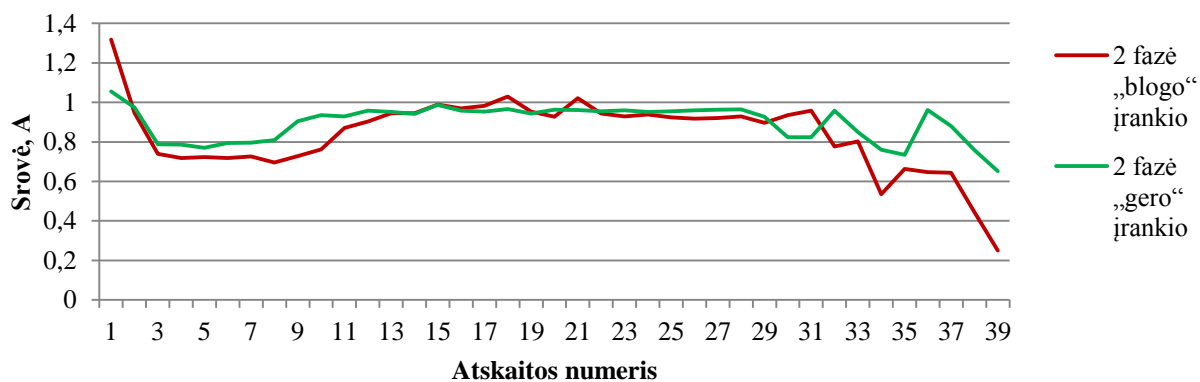
Srovės atsirandančios pagrindinio variklio 2 apvijoje frezuojant 8 mm frezomis plieną



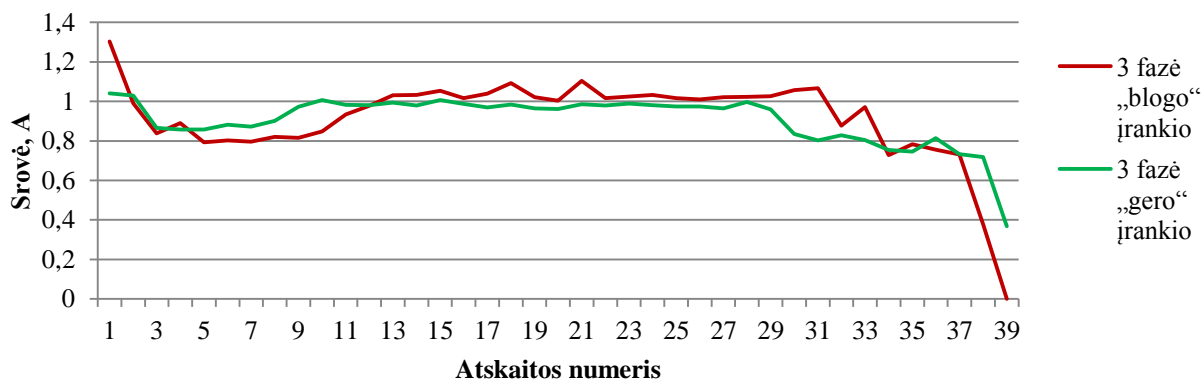
Srovės atsirandančios pagrindinio variklio 3 apvijoje frezuojant 8 mm frezomis plieną



Srovės atsirandančios pagrindinio variklio 1 apvijoje frezuojant 8 mm frezomis aliuminį



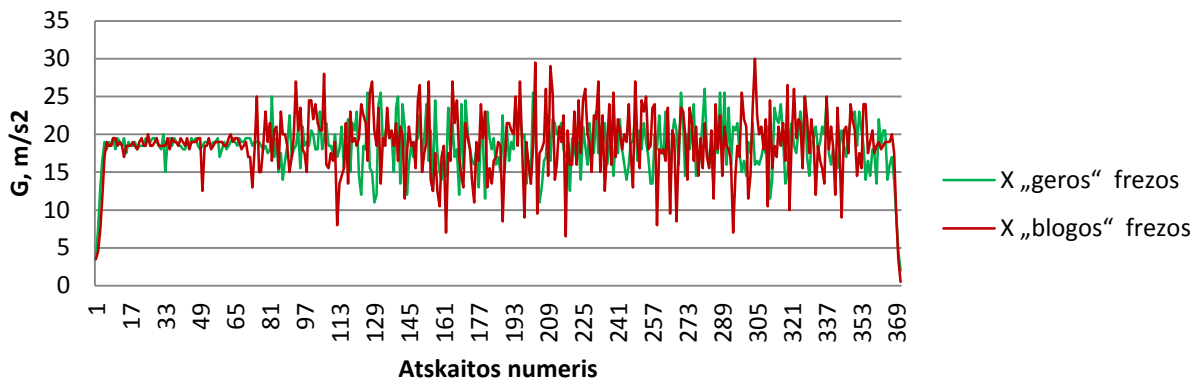
Srovės atsirandančios pagrindinio variklio 2 apvijoje frezuojant 8 mm frezomis aliuminį



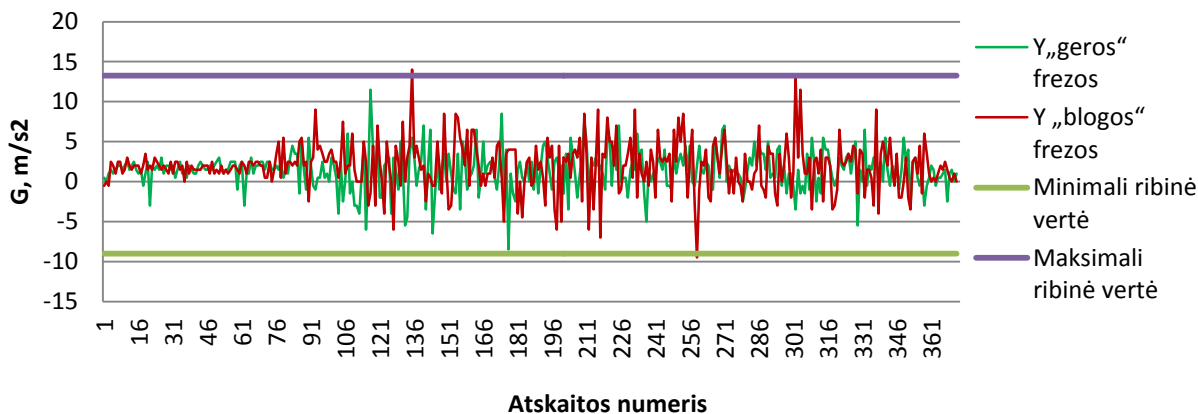
Srovės atsirandančios pagrindinio variklio 3 apvijoje frezuojant 8 mm frezomis aliuminį

## Priedas 6. 10 mm frezos vibracijų tyrimas

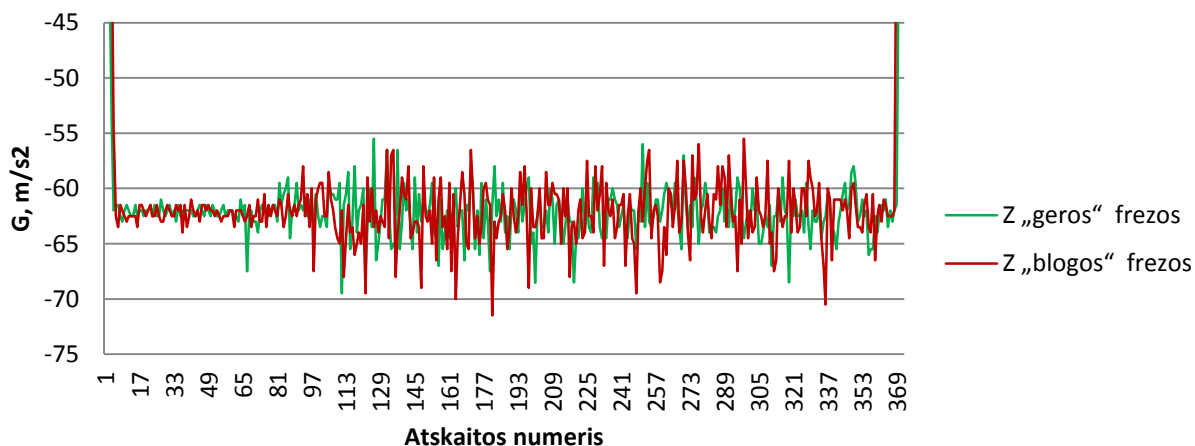
### 10 mm VHM frezos tyrimas:



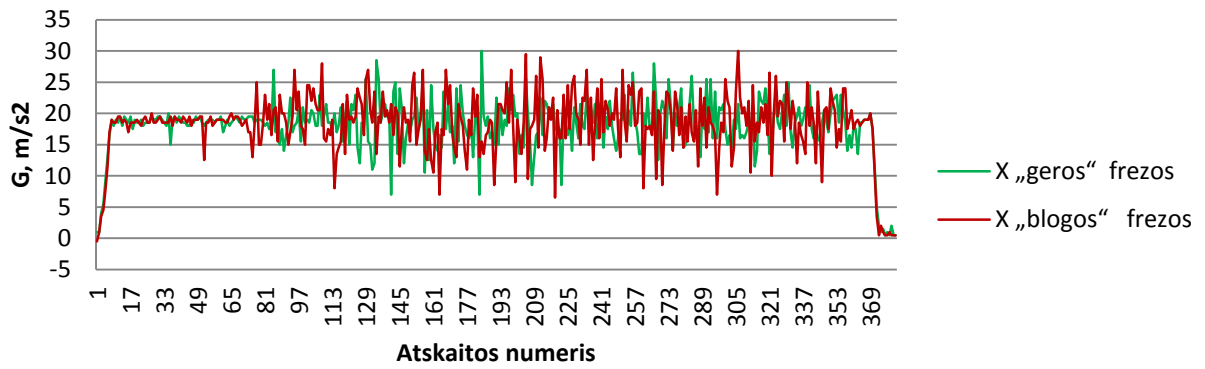
### Vibracijos atsirandančios x ašyje frezuojant 10 mm frezomis plieną



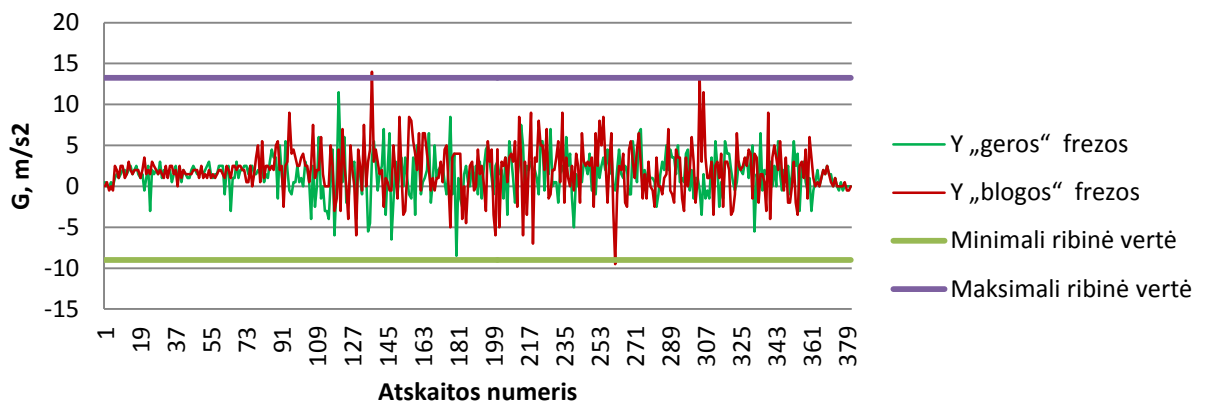
### Vibracijos atsirandančios y ašyje frezuojant 10 mm frezomis plieną



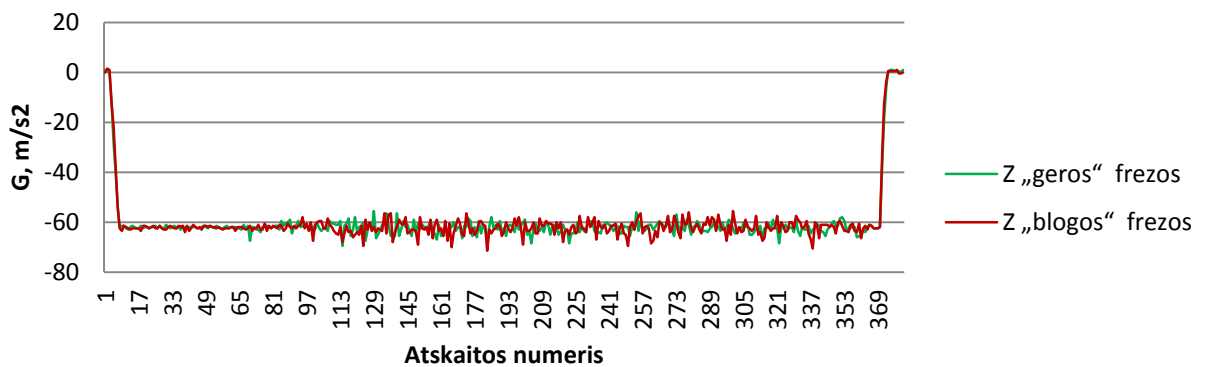
### Vibracijos atsirandančios z ašyje frezuojant 10 mm frezomis plieną



Vibracijos atsirandančios x ašyje frezuojant 10 mm frezomis aliuminį



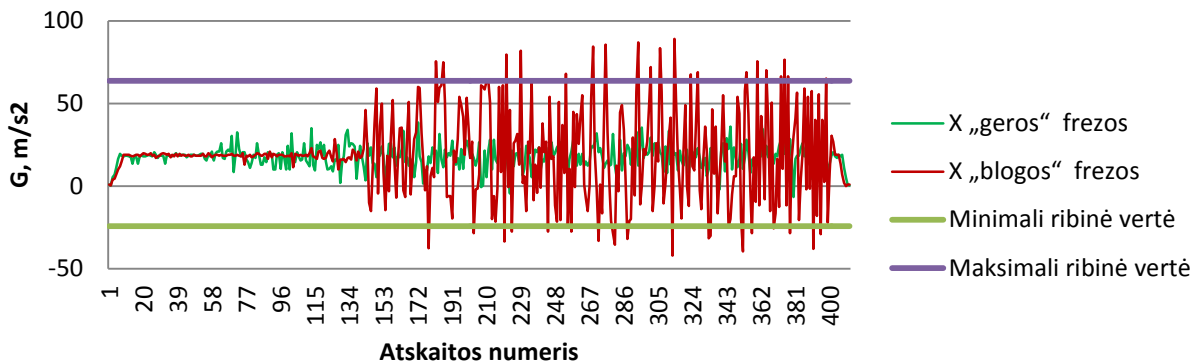
Vibracijos atsirandančios z ašyje frezuojant 10 mm frezomis aliuminį



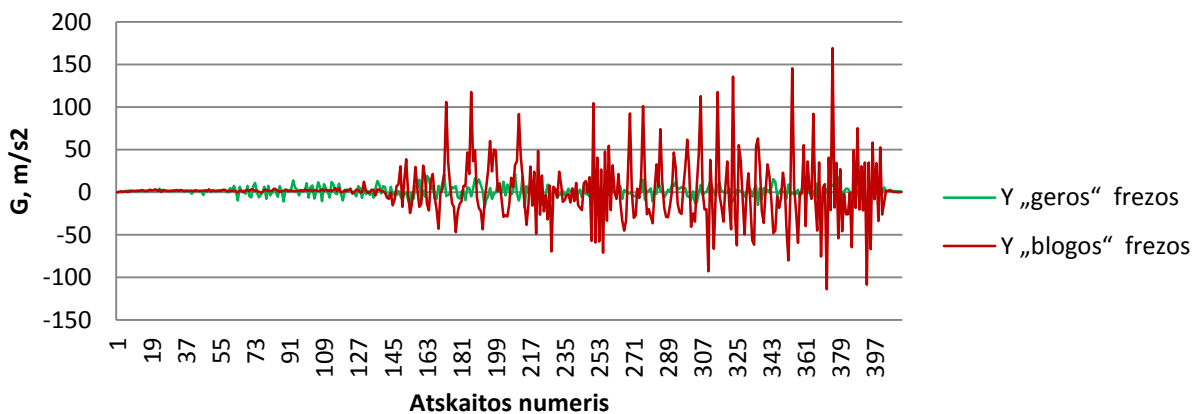
Vibracijos atsirandančios z ašyje frezuojant 10 mm frezomis aliuminį

## Priedas 7. 12 mm frezos vibracijų tyrimas

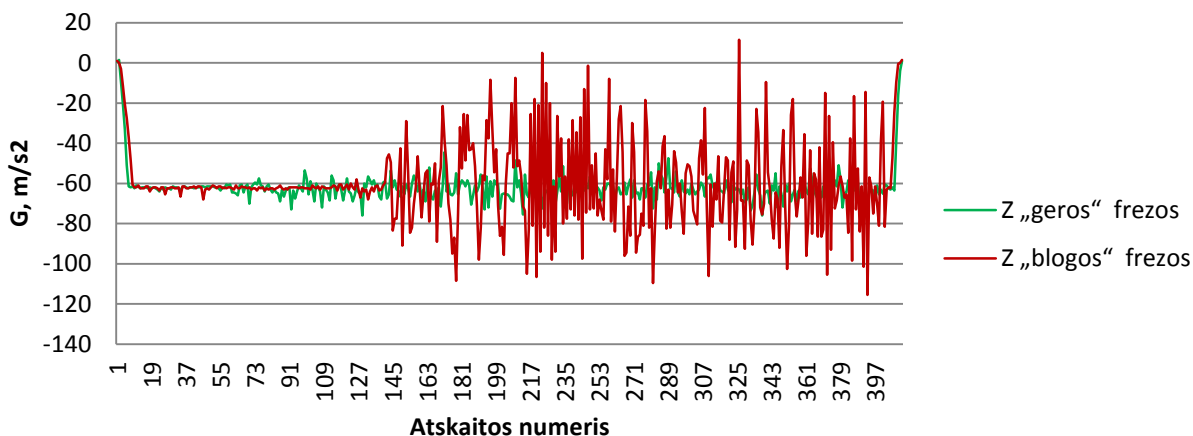
### 12 mm VHM frezos tyrimas:



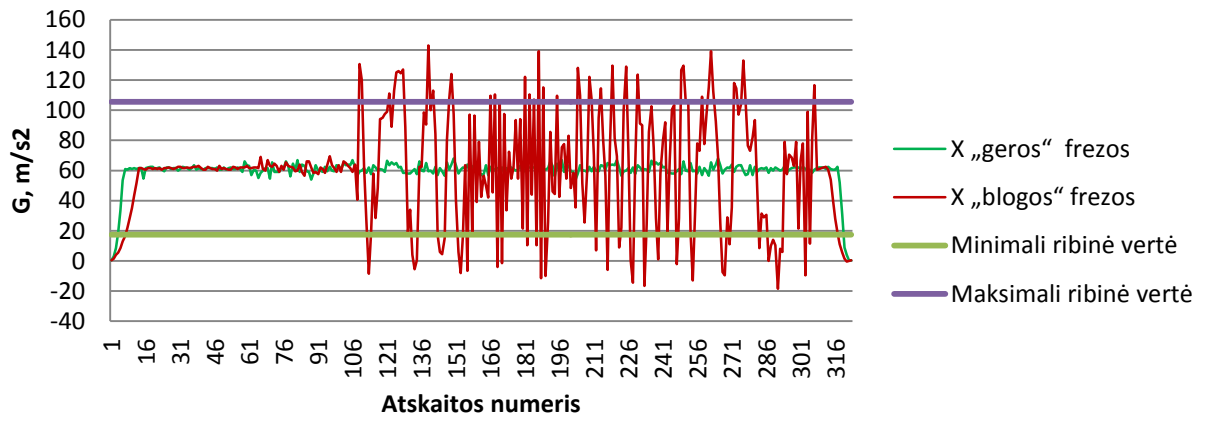
### Vibracijos atsirandančios x ašyje frezuojant 12 mm frezomis plieną



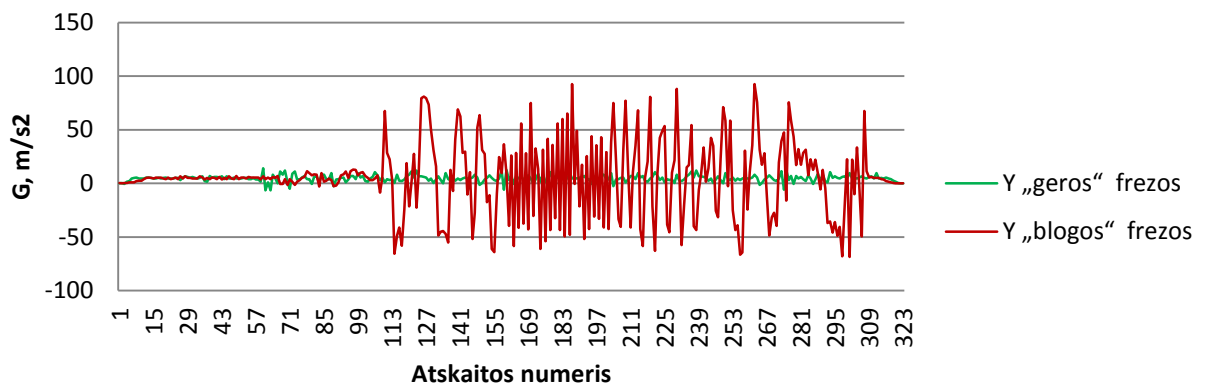
### Vibracijos atsirandančios y ašyje frezuojant 12 mm frezomis plieną



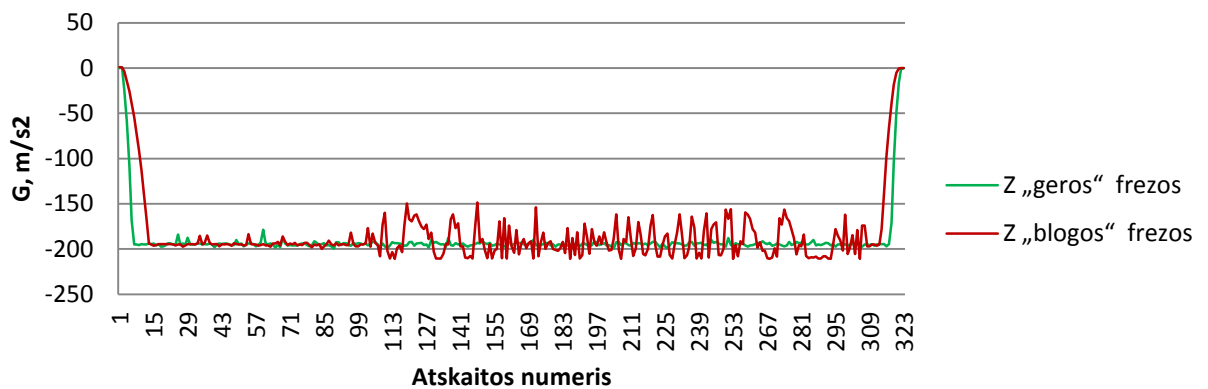
### Vibracijos atsirandančios z ašyje frezuojant 12 mm frezomis plieną



Vibracijos atsirandančios x ašyje frezuojant 12 mm frezomis aliuminį



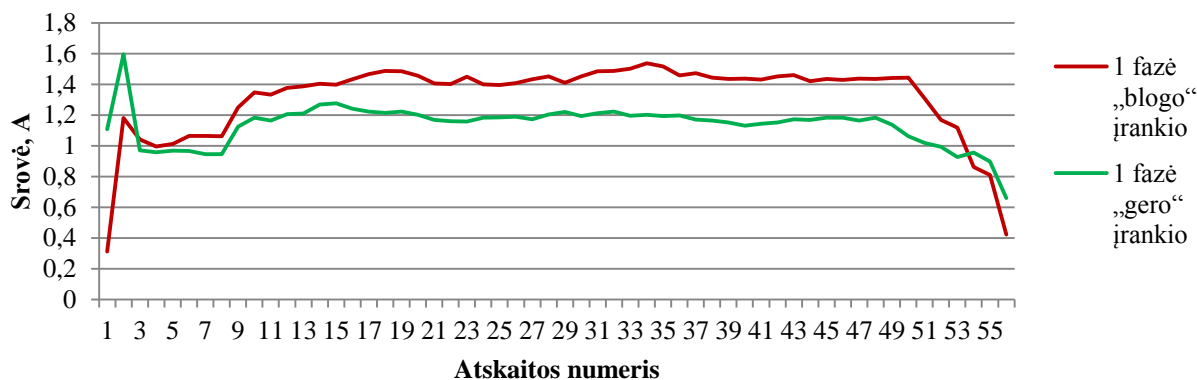
Vibracijos atsirandančios y ašyje frezuojant 12 mm frezomis aliuminį



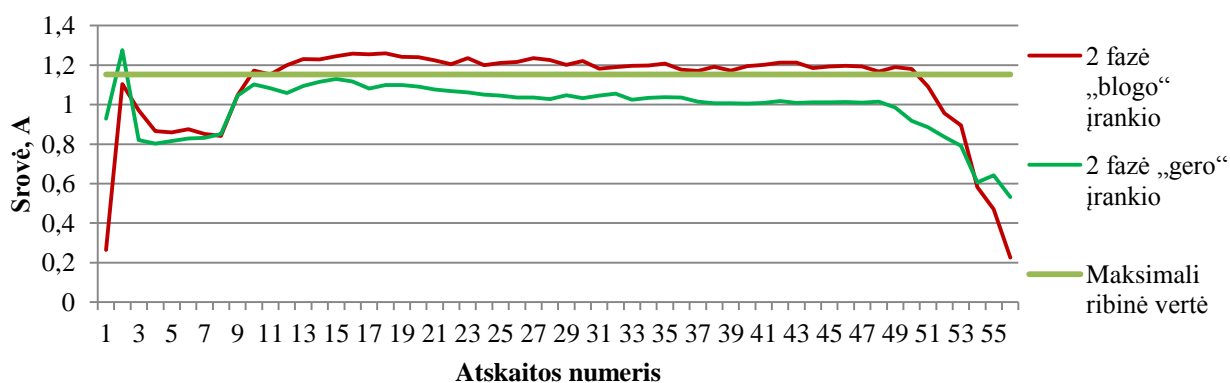
Vibracijos atsirandančios z ašyje frezuojant 12 mm frezomis aliuminį

## Priedas 8. 10 mm frezos energijos suvartojimo tyrimas

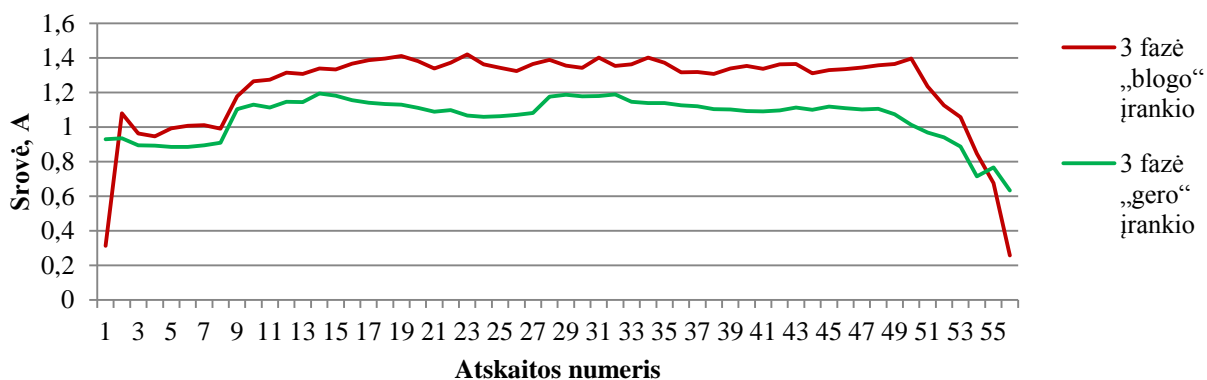
### 10 mm VHM frezos tyrimas:



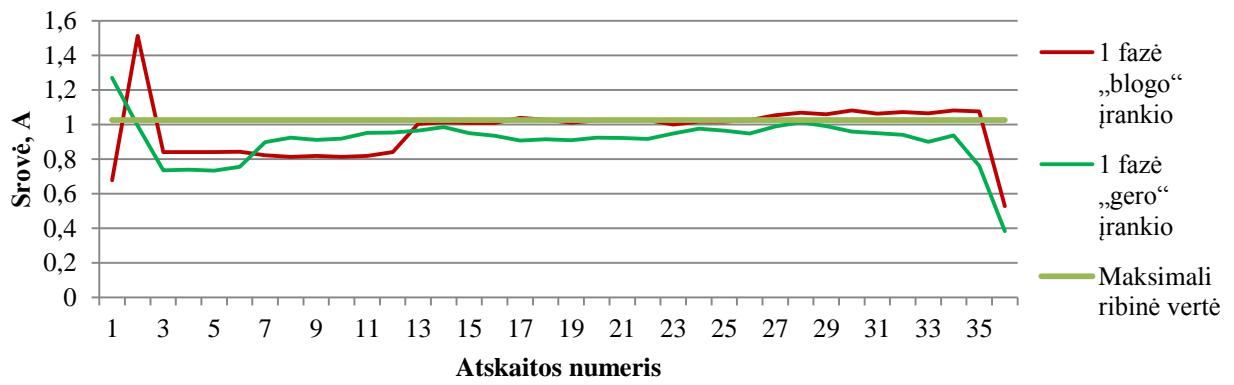
### Srovės atsirandančios 1 variklio apvijoje frezuojant 10 mm frezomis plieną



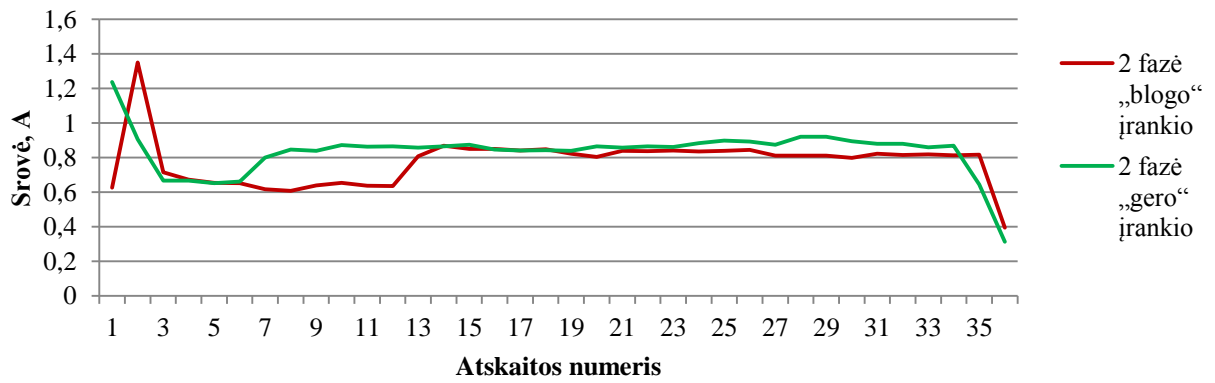
### Srovės atsirandančios 2 variklio apvijoje frezuojant 10 mm frezomis plieną



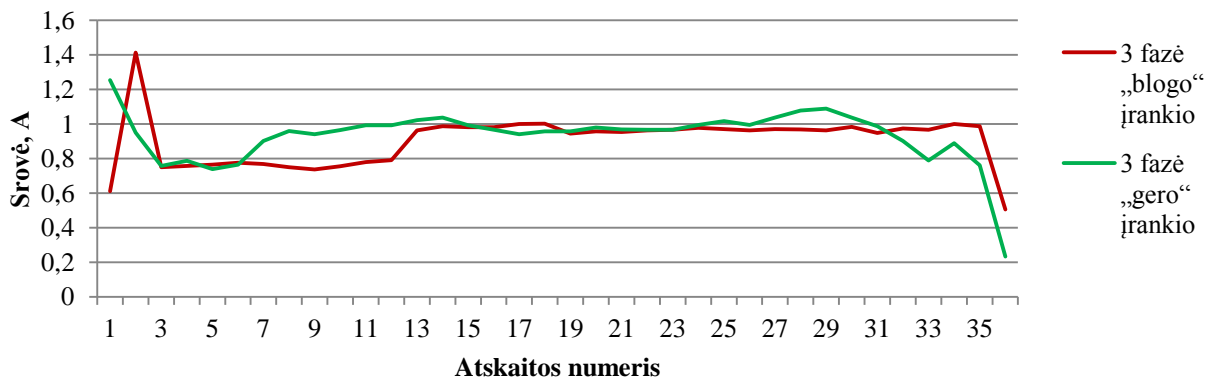
### Srovės atsirandančios 3 variklio apvijoje frezuojant 10 mm frezomis plieną



Srovės atsirandančios 1 variklio apvijoje frezuojant 10 mm frezomis aliuminį



Srovės atsirandančios 2 variklio apvijoje frezuojant 10 mm frezomis aliuminį

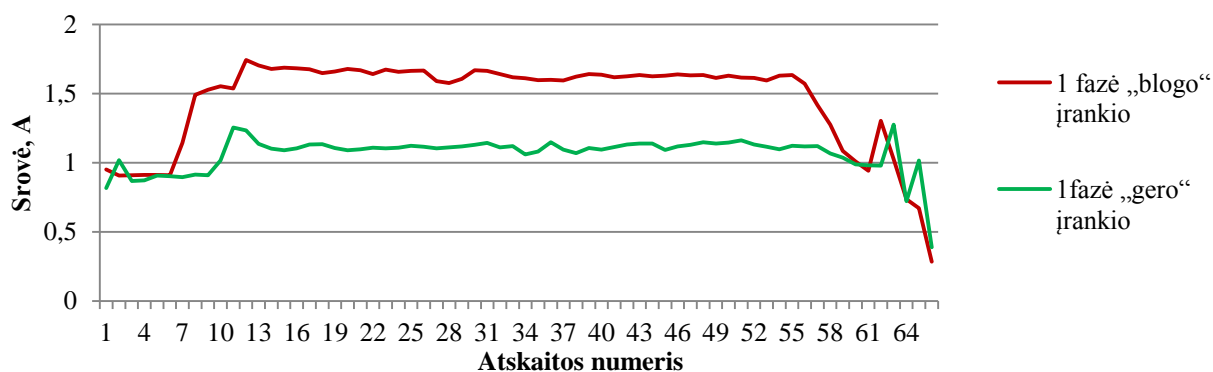


Srovės atsirandančios 3 variklio apvijoje frezuojant 10 mm frezomis aliuminį

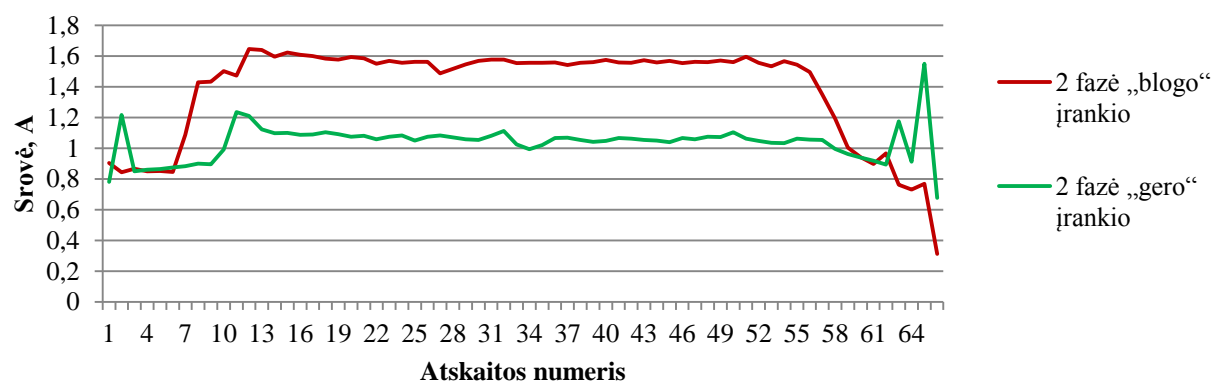


## Priedas 9. 12 mm frezos energijos suvartojimo tyrimas

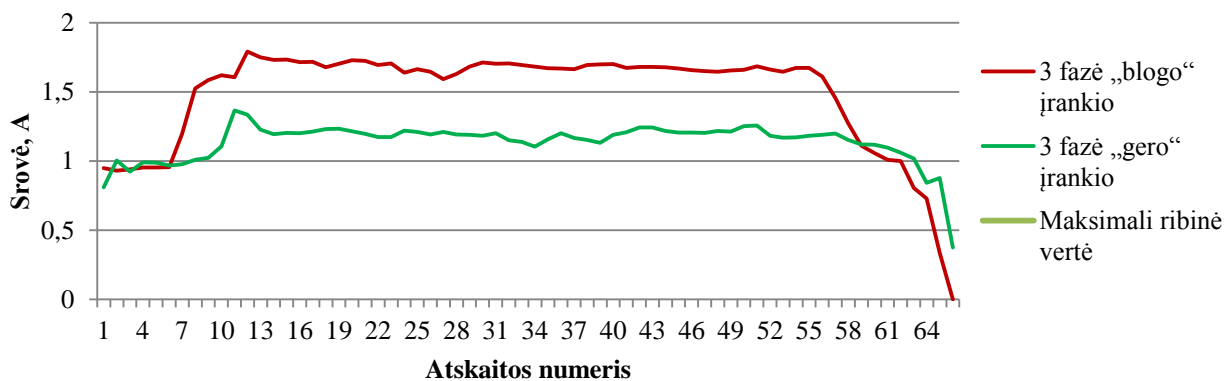
### 12 mm VHM frezos tyrimas:



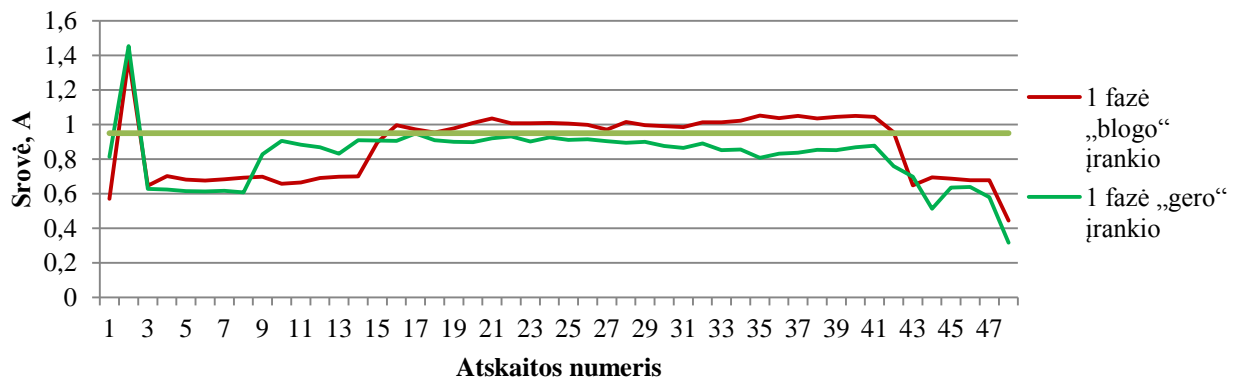
### Srovės atsirandančios 1 variklio apvijoje frezuojant 12 mm frezomis plieną



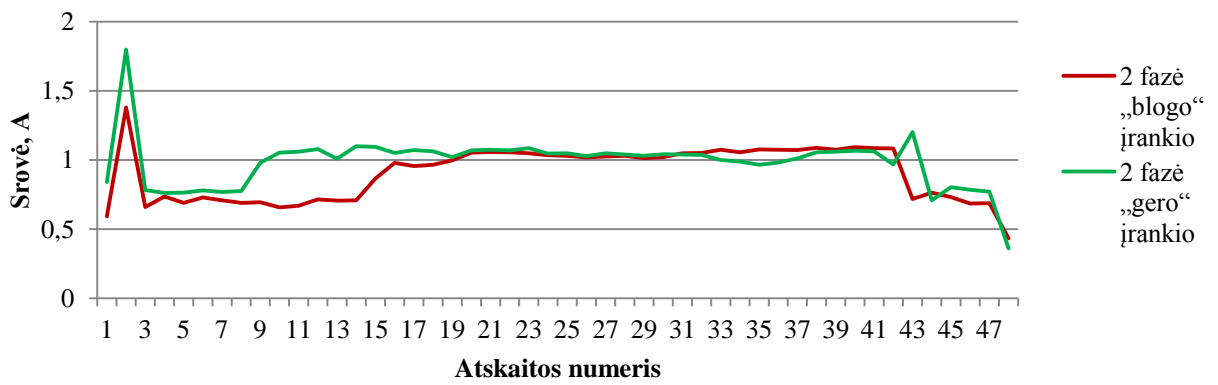
### Srovės atsirandančios 2 variklio apvijoje frezuojant 12 mm frezomis plieną



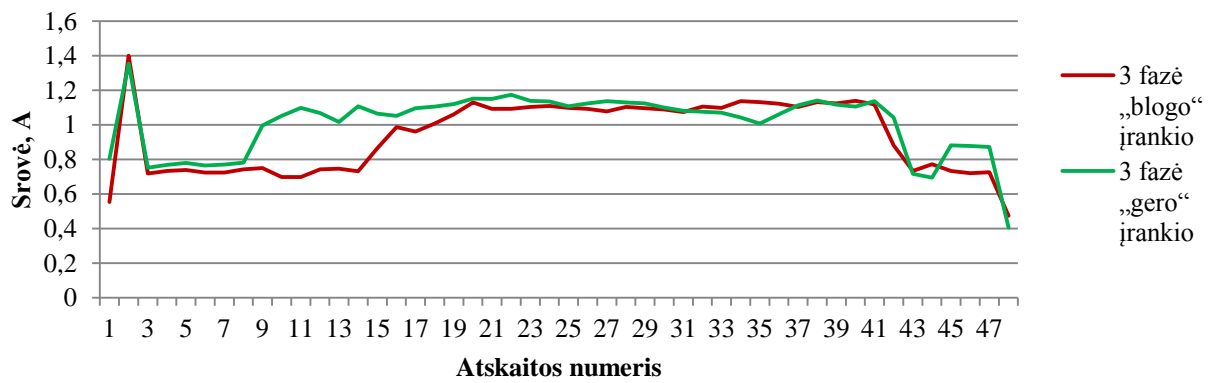
### Srovės atsirandančios 3 variklio apvijoje frezuojant 12 mm frezomis plieną



Srovės atsirandančios 1 variklio apvijoje frezuojant 12 mm frezomis aliuminį



Srovės atsirandančios 2 variklio apvijoje frezuojant 12 mm frezomis aliuminį



Srovės atsirandančios 3 variklio apvijoje frezuojant 12 mm frezomis aliuminį