



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Valdemar Smilgin

PROTOTIPŲ MECHANINIO APDIRBIMO OPTIMIZAVIMO TYRIMAI

RESEARCH OF OPTIMIZATION OF MACHINING OF PROTOTYPES

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 621H77001

Pramonės technologijos specializacija

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Prof.dr. Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

Valdemar Smilgin

PROTOTIPŲ MECHANINIO APDIRBIMO OPTIMIZAVIMO TYRIMAI

RESEARCH OF OPTIMIZATION OF MACHINING OF PROTOTYPES

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 621H77001

Pramonės technologijos specializacija

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas Prof.dr Mindaugas Jurevičius.

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas lekt. Angelika Petrėtienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 261H77001

Pramonės technologijos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Prof.dr. Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)

2012 -01-30

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2012-01-30 Nr. 8

Vilnius

Studentui

Valdemar Smilgin

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Prototipų mechaninio apdirbimo optimizavimo tyrimai

patvirtinta 2011 m. gruodžio 13 d. dekanų potvarkiu Nr. 326me

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2012m. gegužės 25 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Susipažinti su „PowerMill“, „IRBCAM“ programiniais paketais ir „Origin8“ programa. Ištirti pramoninio roboto „Motoman SSF-2000“ technologines galimybes ir vibroaktyvumą frezuojant įvairių medžiagų ruošinius trijų ašių sistemoje. Pateikti rezultatus ir suformuluoti išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

.....
(Paraša)

Prof.dr.Mindaugas Jurevičius
(Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

Valdemar Smilgin

(Vardas, pavardė)

2012 -01-30

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Mechanikos fakultetas

Mašinų gamybos katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk. 2

Data 2012-05-25

Mechanikos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Prototipų mechaninio apdirbimo optimizavimo tyrimai**

Autorius **Valdemar Smilgin**

Vadovas **prof. dr. Mindaugas Jurevičius**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐ užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama prototipų paskirtis, įvairovė, funkcijos ir jų gamybos būdai. Siekiant optimizuoti prototipų mechaninį apdirbimą panaudojant pramoninį robotą, sukurta tyrimo metodika, parinktos ruošinių medžiagos ir išnagrinėti robotizuotų sistemų privalumai lyginant su CNC staklėmis prototipų gamyboje. Išnagrinėta roboto „Motoman SSF-2000“ konstrukcija ir programiniai paketai, naudojami prototipų mechaniniam apdirbimui.

Tyrimo metu atliktas pasirinkto profilio frezavimas pjaunant skirtingo kietumo medžiagas esant skirtingiems pastūmos dydžiams, matuotas roboto riešo vibracinis aktyvumas frezuojant trijų ašių sistemoje ir kiekvienam bandiniui atliktas paviršiaus kokybės tikrinimas.

Išnagrinėjus teorinius ir praktinius prototipų apdirbimo aspektus, pateikti baigiamojo darbo rezultatai ir išvados.

Darbą sudaro 8 dalys: įvadas; apžvalginė dalis; tiriamoji problema, tyrimo objektas, tikslas ir uždaviniai; tiriamoji dalis; eksperimentinių matavimų duomenų analizė; išvados; literatūra; priedai.

Darbo apimtis – 75 p. teksto be priedų, 50 iliustr., 18 lent., 22 bibliografinių šaltinių, 5 priedai.

Prasminiai žodžiai: prototipai, robotas, optimizavimas, tyrimai.

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Mechanikos fakultetas

Mašinų gamybos katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk. 2

Data 2012-05-25

Mechanikos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Prototipų mechaninio apdirbimo optimizavimo tyrimai**

Autorius **Valdemar Smilgin**

Vadovas **prof.dr. Mindaugas Jurevičius**

Kalba

☐

lietuvių

☒

užsienio

Annotation

In the master thesis there are investigated the purpose of prototypes, variety, functions and production techniques. In order to optimize mechanical processing of prototypes while using industrial robot, there was developed research methodology, chosen materials of preforms and investigated advantages of robotic systems compared to CNC machines in production of prototypes. There are examined the design and software packages of robot “Motoman SSF-2000” that are used in mechanical machining of prototypes.

During the research there was carried out milling of the chosen profile while cutting materials of different hardness at different feed rates, measured vibration activity of the robot wrist while milling in three axes system, then there was performed control of surface quality of each sample.

After theoretical and practical investigation of machining of prototypes, there are introduced results and conclusions of master thesis.

Master thesis consists of 8 parts: introduction; overview; research problem, research object, purpose and objectives; part of research; analysis of experimental measurement data; conclusions; references; appendixes.

Volume of master thesis – 75 p. of text without appendixes, 50 figures, 18 tables, 22 references, 5 appendixes.

Keywords: Prototypes, robot, optimization, research.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų, sesijų ir
baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos
aprašo 2011-2012 m. m.

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Valdemar Smilgin, 20064725

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos fakultetas

(Fakultetas)

Pramonės inžinerija, PTfm-10

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2012 m. gegužės 28 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Prototipų mechaninio apdirbimo optimizavimo tyrimai“ patvirtintas 2011 m. gruodžio 13 d. dekanų potvarkiu Nr. 326me, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas doc. dr. Mindaugas Jurevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Valdemar Smilgin

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

IVADAS	11
1. APŽVALGINĖ DALIS	12
1.1 Prototipų paskirtis, įvairovė ir funkcijos	12
1.1.1 Sparti prototipų gamyba	13
1.1.2 Prototipų gamybos būdai	14
1.1.3 Gaminio kūrimas panaudojant automatizuotą trimačio projektavimo sistemą	15
1.1.4 IRBCAM - CAD/CAM robotams	17
1.2 Pramoninių robotų poreikis prototipų gamyboje	19
1.2.1 Prototipų mechaninis apdirbimas panaudojant robotą	20
1.2.2 Robotizuotų sistemų privalumai lyginant su CNC staklėmis prototipų gamyboje	22
1.2.3 Robotizuotų sistemų trūkumai lyginant su CNC staklėmis prototipų gamyboje	23
1.3 Pramoninių robotų ypatybės ir charakteristikos	24
1.3.1 Pramoninių robotų jutikliai	26
1.3.2 Roboto tikslumas ir pakartojamumas	27
1.3.3 Roboto pozicionavimo tikslumo nustatymas	30
2. TIRIAMOJI PROBLEMA, TYRIMO OBJEKTAS, TIKSLAS IR UŽDAVINIAI	33
2.1 Tiriamaoji problema	33
2.2 Tyrimo objektas	33
2.2.1 Roboto struktūra	35
2.2.2 Roboto valdymas	36
2.2.3 NX100 valdymo bloko režimai	37
2.2.4 Roboto „Motoman NX100“ valdiklis ir valdymas	37
2.3 Tyrimo tikslas	38
2.4 Tyrimo uždaviniai	38
3. TIRIAMOJI DALIS	39
3.1 Tyrimo metodika	39
3.2 Eksperimentinė įranga	41
3.3 Tyrimo proceso aprašymas	43
4. EKSPERIMENTINIŲ MATAVIMO DUOMENŲ ANALIZĖ	48
4.1 Virpesių parametrų matavimo duomenų analizė	48
4.2 Paviršiaus šiurkštumo matavimo duomenų analizė	64
4.3 Palyginamoji eksperimentinių matavimo rezultatų analizė	66
IŠVADOS	73
LITERATŪRA	74
PRIEDAI	Error! Bookmark not defined.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. 3D frezavimas robotu	15
2 pav. Kompiuterinės integruotos gamybos (CIM) paskirtis	15
3 pav. CAM sistemų pavyzdys.....	16
4 pav. Apdirbimas robotu panaudojus treką ir pasukimo stalą IRBCAM programoje.....	18
5 pav. Robotų panaudojimo pasaulyje statistiniai duomenys	20
6 pav. 3D modeliai: a) – CAM programoje; b) – pagamintas prototipas.....	21
7 pav. Robotų programavimo būdai.....	23
8 pav. 6 ašių pramoninis robotas su pjovimu įrankiu	25
9 pav. Robotų darbo erdvė: a) – kartinė; b) – cilindrinė; c) – sferinė	26
10 pav. Daviklių panaudojimas.....	27
11 pav. Roboto įrankio pozicionavimas tarp diskretinių taškų	28
12 pav. Roboto įrankio pozicionavimas į diskretinius taškus	28
13 pav. Galimas roboto įrankio nuokrypis.....	29
14 pav. Maksimalaus pakartojamumo nuokrypio radimas	29
15 pav. Manipulatoriaus kinematinės paklaidos nustatymo schema	31
16 pav. Robotas „Motoman SSF2000“	34
17 pav. Roboto kinematinė schema	35
18 pav. Roboto struktūra.....	36
19 pav. Sistemos turinys	36
20 pav. Roboto „Motoman SSF2000“ valdymo bloko NX100 nešiojamas valdymo pultas	37
21 pav. Optimaliausios pastūmos parinkimo algoritmas	39
22 pav. Tyrimo stendo blokinė schema	41
23 pav. Dvigubas mikroskopas „MHC-11“	42
24 pav. Vaizdas mikroskopo okuliare matavimo metu: Iškilimų linija - $h_{\max}$, Įdubimų linija - $h_{\min}$	42
25 pav. Omegos formos sinusoidės profilis sudarytas „SolidWorks“ programoje.....	43
26 pav. Omegos formos sinusoidės profilio įrankio apdirbimo trajektorijos sudarymas	43
27 pav. Apdirbtas omegos formos sinusoidės profilis „PowerMill“ sistemoje	44
28 pav. „NC“ kodų pavertimas į „Inform III“ kalbą fragmentas	44
29 pav. Simuliacija IRBCAM programoje	45
30 pav. Roboto įrankio kalibravimas	45
31 pav. Virpesių parametrų matavimo priemonių tvirtinimo taškai	46
32 pav. Apdirbti iš skirtingų medžiagų omegos formos sinusoidės profiliai.....	46
33 pav. Analizuojami roboto sukeltų vibracijų intervalai.....	48
34 pav. Roboto įrankiui įeinant į medieną ir pradedant frezuoti tiesiai su 1 mm/s pastūma: a) – 1 intervalas;	49
35 pav. Roboto įrankiui įeinant į medieną ir pradedant frezuoti tiesiai su 3 mm/s pastūma: a) – 1 intervalas;	50
36 pav. Roboto įrankiui įeinant į medieną ir pradedant frezuoti tiesiai su 5 mm/s pastūma: a) – 1 intervalas;	51
37 pav. Roboto įrankiui įeinant į medieną ir pradedant frezuoti tiesiai su 10 mm/s pastūma: a) – 1 intervalas;	52
38 pav. Sinusoidės profilis: 1- sinusoidės įdubimas, 2 – sinusoidės iškilimas	56
39 pav. Roboto įrankiui pradedant frezuoti omegos profilio sinusoidę iš polipropileno su 1 mm/s pastūma:.....	57
40 pav. Roboto įrankiui pradedant frezuoti omegos profilio sinusoidę iš polipropileno su 3 mm/s pastūma:.....	58
41 pav. Roboto įrankiui pradedant frezuoti omegos profilio sinusoidę iš polipropileno su 5 mm/s pastūma:.....	59
42 pav. Roboto įrankiui pradedant frezuoti omegos profilio sinusoidę iš polipropileno su 10 mm/s pastūma:.....	60

43 pav. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės apdirbant medieną skirtinguose intervaluose.....	66
44 pav. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės apdirbant polipropileną skirtinguose intervaluose.....	67
45 pav. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės apdirbant ekstrudinį polistireną skirtinguose intervaluose	68
46 pav. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime	69
47 pav. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės iškilime.....	69
48 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime apdirbant medieną.....	70
49 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime apdirbant polipropileną.....	71
50 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime apdirbant ekstrudinį polistireną	71

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Objektyvo charakteristika.....	42
2 lentelė. Reikšmingos pagreičio amplitudės, kurios įtakoja frezuojamo profilio paviršiaus šiurkštumą 1–2 intervaluose	53
3 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui įeinant į medieną su tam tikra užduota pastūma.....	54
4 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui pradedant frezuoti tiesiai medieną su tam tikra užduota pastūma	55
5 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui įeinant į polipropileną su tam tikra užduota pastūma	55
6 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui pradedant frezuoti tiesiai polipropileną su tam tikra užduota pastūma	55
7 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui įeinant į ekstrudinį polistireną su tam tikra užduota pastūma	56
8 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui pradedant frezuoti tiesiai ekstrudinį polistireną su tam tikra užduota pastūma.....	56
9 lentelė. Reikšmingos pagreičio amplitudės, kurios įtakoja frezuojamo profilio paviršiaus šiurkštumą 3–4 intervaluose	61
10 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant medieną omegos sinusoidės įdubime su tam tikra užduota pastūma.....	62
11 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant medieną omegos sinusoidės iškilime su tam tikra užduota pastūma.....	62
12 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant polipropileną omegos sinusoidės įdubime su tam tikra užduota pastūma.....	63
13 lentelė. . Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant polipropileną omegos sinusoidės iškilime su tam tikra užduota pastūma.....	63
14 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant ekstrudinį polistireną omegos sinusoidės įdubime su tam tikra užduota pastūma	63
15 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant ekstrudinį polistireną omegos sinusoidės iškilime su tam tikra užduota pastūma	64
16 Medienos bandinių šiurkštumo matavimų reikšmės	64
17 lentelė. Polipropileno bandinių šiurkštumo matavimų reikšmės	64
18 lentelė. Ekstrudinio polistireno bandinių šiurkštumo matavimų reikšmės	65

IVADAS

Šiandien daugybė pramonės įmonių gamybos linijose prototipų apdirbimo procesams naudoja CNC stakles. Prieš keletą metų šioje srityje atsirado antras būdas, kuris gali būti naudingesnis negu prototipų apdirbimas CNC staklėmis. Prototipų apdirbimo srityje pradėti taikyti pramoniniai robotai.

Šiuolaikinės technologijos turi vis daugiau įtakos mūsų gyvenimui. Tobulėja technologijos, greitėja žmonių gyvenimo tempas, neatsilieka ir pramonė. Pagrindinis gero verslo pagrindas – spartus ir kokybiškas darbas. Spartų ir kokybišką darbą užtikrina automatiniai įrenginiai – robotai.

Per pastaruosius keturis dešimtmečius, pramoniniai robotai buvo daugiausia naudojami tik tam tikroms operacijoms (ruošimams pakrauti ir iškrauti, gaminiamis perkelti, suvirinimas, pjovimas, dažymas purškiant ir kt.). Šiuo metu pramoninių robotų gamyba iš esmės pasikeitė. Kuriami didelių technologinių galimybių pramoniniai robotai, kurie gali būti pritaikyti įvairiems darbams.

Tam, kad būtų apdirbti prototipai CNC staklėmis, CAM kompiuterine programa suprojektuojami reikalingi prototipo apdirbimo ciklai ir parinkus reikiamą postprocesorių, sugeneruojama apdirbimo programa reikiamoms CNC staklėms. Pramoninius robotus pradėjo taikyti prototipams apdirbti, tada, kada pramoninių robotų gamintojai sukūrė programinę įrangą, kuri gali konvertuoti G-kodus į robotų suprantamą kalbą (Chen & Song, 2001).

Šio baigiamojo magistro darbo pirmojoje dalyje nagrinėjama prototipų paskirtis, sparti prototipų gamyba ir prototipų gamybos būdai. Aptariamas pramoninių robotų technologijos poreikis, jų ypatybės ir charakteristikos. Aptariami robotų privalumai lyginant su CNC staklėmis. Aprašomas 3D erdvinis modeliavimas ir mechaninis apdirbimas, kuris atliekamas su robotu. Taip pat pristatomas manipulatorius, su kuriuo atliekamas šis apdirbimas. Analizuojami jo konstrukcijos ir programinio valdymo klausimai.

Antrojoje dalyje aprašomi eksperimentai, atlikti su robotu. Tyrimams naudojama kompiuterinė technika, įvairūs programiniai paketai, kilnojamas virpesių matavimo įrenginys.

Pabaigoje aprašomi ir analizuojami gauti rezultatai. Pateikiamos išvados ir siūlymai.

1. APŽVALGINĖ DALIS

1.1 Prototipų paskirtis, įvairovė ir funkcijos

Kuriant geros kokybės gaminius, dažnai neapsieinama be prototipų. Prototipu vadinamas objektas, kurio viena ar kelios savybės ypač artimos suprojektuoto gaminio savybėms. Toks apibūdinimas apima platų objektų spektrą pradedant gaminio eskizu ar jo veikimą aprašančiomis matematinėmis priklausomybėmis ir baigiant jo bandomuoju pavyzdžiu (Henrikas Medekšas, 2003).

Prototipai naudojami projektuojamo gaminio arba jo dalių tarpusavio sąveikai, surenkamumui, ergonomikai ir kitoms savybėms patikslinti, gaminio koncepcijoms patikrinti bei patikslinti. Paprastai ištyrus prototipą, gaminio projektas tikslinamas ir tobulinamas. Dėl to prototipų gamyba yra svarbus gaminio projektavimo etapas, jo kokybės pagerinimo priemonė.

Naudojami fiziniai ir analitiniai prototipai.

Fiziniai prototipai yra materialūs objektai, daugiau arba mažiau panašūs į projektuojamą gaminį. Fizinių prototipų pavyzdžiai yra sumažintas arba padidintas gaminio modelis, natūralių matmenų gaminys, pagamintas vienetinės gamybos metodais, o ne taip, kaip numatyta projekte. Fiziniai prototipai pasižymi tuo, kad iš jų galima spręsti ne tik apie modeliuojamą gaminio savybę, bet ir pastebėti nenumatytas gaminio savybes. Taip yra dėl to, kad šie prototipai bandomi realioje aplinkoje, kur veikia visi gaminiui įtaką darantys veiksniai.

Analitiniais prototipais vadinamos matematinės priklausomybės arba kompiuteriniai skaitmeniniai modeliai, atspindintys ryšius tarp konstruktorius dominančių gaminio savybių bei aplinkos veiksnių. Analitiniai prototipai pasižymi dideliu lankstumu: konstruktorių dominančius jų parametrus galima lengvai keisti ir daug platesnėse ribose, negu fizinių prototipų parametrus.

Taip pat prototipai skirstomi į išsamiuosius ir sutelktuosius.

Išsamieji prototipai turi daugumą, o gal ir visas, gaminio savybes. Dažniausiai tai būna natūralaus dydžio, veikiantis gaminio variantas. Pvz.: vadinamieji *beta* prototipai, kurie pateikiami vartotojui įvertinti, ar gaminyje nėra projektavimo klaidų.

Sutelktieji prototipai įkūnija ne visas, o tik vieną arba tik keletą gaminio savybių. Pvz.: iš putų plastiko pagamintas mobiliojo telefono korpusas norint iširti jo ergonomines savybes ir išvaizdą. Dažniausiai gaminami du sutelktieji prototipai: vienas gaminio išvaizdai patikrinti, kitas – gaminio veikimo principui patikrinti. Paprastai du sutelktieji prototipai kainuoja pigiau negu vienas išsamusis.

Analitiniai prototipai dažniausiai yra sutelktieji, tuo tarpu fiziniai gali būti tiek sutelktieji, tiek išsamieji.

Prototipai padeda atsakyti į klausimus, kaip gaminys atrodo, kaip jis veikia ir pan. Šiuo atveju prototipas yra tarsi mokymo priemonė, padedanti konstruktoriams geriau suprasti projektuojamą gaminį. Bendravimo funkciją prototipas atlieka, kada jis naudojamas projekto tikslams paaiškinti vadovybei ar visuomenei. Integravimo funkcija atliekama, kai, pagaminus, pvz., detalių prototipus, tikrinamas jų surenkamumas ar savitarpio sąveika. Šiam tikslui geriausiai tinka išsamieji prototipai. Pagaliau prototipai gaminami užbaigus tam tikrą gaminio kūrimo proceso etapą. Šiuo atveju, pagaminus prototipą, įsitikinama, kad visi užsibrėžti tikslai pasiekti, ir galima pradėti tolesnį etapą.

1.1.1 Sparti prototipų gamyba

Prototipai ypač išsamieji, yra tokie pat sudėtingi kaip ir gaminys, bet dėl vienetinės gamybos daug už jį brangesni. Sudėtingų prototipų gamyba įprastiniais metodais gali ilgai užtrukti (kelias savaites ar net mėnesius). Tačiau naujo gaminio kūrimo laikas paprastai yra ribotas: kuo jis trumpesnis, tuo greičiau gaminys pasieks rinką, tuo greičiau galima tikėtis sugrįžiant gaminiui kurti sunaudotas lėšas. Dėl to dabartiniu metu pramonėje įsigali sparti prototipų gamyba, t. y. vis plačiau naudojami specialūs įrenginiai ir procesai, leidžiantys per trumpą laiką (kelias valandas ar paras) iš specialių medžiagų pagaminti prototipą. Sparčiai gaminti prototipus galima tik tada, kai gaminys suprojektuojamas kompiuterine sistema CAD. Tuomet tiesiogiai iš CAD duomenų specialia įranga greitai pagaminamas prototipas.

Paspartinus prototipų gamybą projektuotojai gali išnagrinėti daugiau gaminio koncepcijų, optimizuoti gaminį išanalizavę daugiau alternatyvų, spręsti įrankių ir įrangos kūrimo problemas, tirti naujo gaminio rinkos paklausą ir t. t.

Sparti prototipų gamyba yra nauja technologija, kuri leidžia greitai, remiantis kompiuterizuotojo projektavimo duomenimis, pagaminti trimatį gaminio modelį. Tai visiškai automatizuotas procesas.

Prototipų gaminio tikslų yra keletas:

- ✓ įsitikinti, kad projekte nėra klaidų;
- ✓ ruošti įrankius ir įrangą CAD sistema suprojektuotam gaminiui apdirbti;
- ✓ greitai pagaminti gaminių seriją rinkos paklausai iširti.

Bendruoju atveju sparti prototipų gamyba prekės gamintojui suteikia esminių pranašumų:

- ✓ leidžia paspartinti ir sukonkretinti naujo gaminio kūrimo procesą pagaminant trimatį prototipą;
- ✓ patobulina automatizuotą gaminio projektavimą, sudarydama sąlygas visapusiškai įvertinti projektuojamo gaminio eksploatacines savybes (dizainą, ergonomiką, kinematiką, dinamiką ir pan.) ir jo apdirbimo bei surinkimo galimybes.

Pirmas pranašumas leidžia tiesiogiai pagerinti naujo gaminio konkurencingumą, antrasis yra daugiau orientuotas į kuriamo gaminio inžinerinio tobulumo ieškojimą. Šiuo aspektu sparti prototipų gamyba padeda optimizuoti gaminio konstrukciją, tiksliau įvertinti detalių apdirbimą ir surenkamumą. Sparti prototipų gamyba užtikrina grįžtamąjį ryšį su gaminio projektu, todėl projekto kokybė labai pagerėja.

1.1.2 Prototipų gamybos būdai

Sparti prototipų gamyba yra automatizuotas procesas, kuriame kieta fizinė detalė pagaminama per trumpą laiką tiesiogiai panaudojant kompiuterio CAD projekto informaciją. Bendruoju atveju iš CAD duomenų prototipai gali būti gaunami trejopai:

- ✓ Apdirbant rankomis. Taikant šį būdą, reikia labai kvalifikuotos darbo jėgos, jis yra brangus ir nespirtus (prototipo gamyba gali užtrukti 1–2 mėnesius);
- ✓ Taikant sparčią prototipų technologiją, kuriai įgyvendinti reikia specialių mašinų.
- ✓ Panaudojant skaitmenines programines stakles. Šis būdas gana gerai tinka plokščioms detalėms gaminti, tačiau trimatėms detalėms dažnai reikia papildomos įrangos ir specialių įrankių. Be to, reikalinga programinė įranga CAD informacijai pritaikyti naudoti CNC staklėse. Šiuo būdu pagaminti detalių vidines netaisyklingos formos ertmes įmanoma tik panaudojus 5 ašių apdirbimo centrus .
- ✓ Panaudojant 6-ių laisvės laipsnių robotą, galimybės apdirbant minkštas medžiagas yra neribotos, galima apdirbti bet kokią 3D modelį (1 pav.).

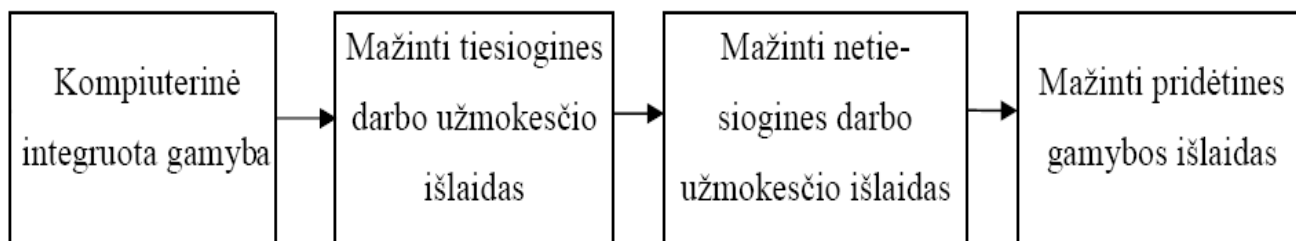


1 pav. 3D frezavimas robotu

1.1.3 Gaminio kūrimas panaudojant automatizuotą trimačio projektavimo sistemą

Naujiems gaminiams projektuoti plačiai taikomos automatizuotos trimačio projektavimo 3D CAD sistemos, kurios orientuotos ne į brėžinio kūrimą, o į objekto modeliavimą. Pagrindinis jų privalumas – didelis darbo efektyvumas, nes jos modeliuoja trimatį erdvinį objektą, o jį sukūrus – automatiškai braižo objekto brėžinius.

Šiose sistemose gaminio modelio duomenys automatiškai pakeičiami reikalinga forma ir perduodami į kitus projektavimo sistemos posistemius: analizės, skaičiavimų, konstruktorinės dokumentacijos rengimo, technologinio gamybos rengimo ir kitas CIM (kompiuterinė integruota gamyba) gamybos sistemos programines sąsajas. Šių sistemų darbo rezultatas - gaminio geometrinio modelio sukūrimas trimatėje erdvėje. Įvairūs šio modelio dvimačiai vaizdai bei pjūviai minėtose sistemose sukuriama automatiškai.



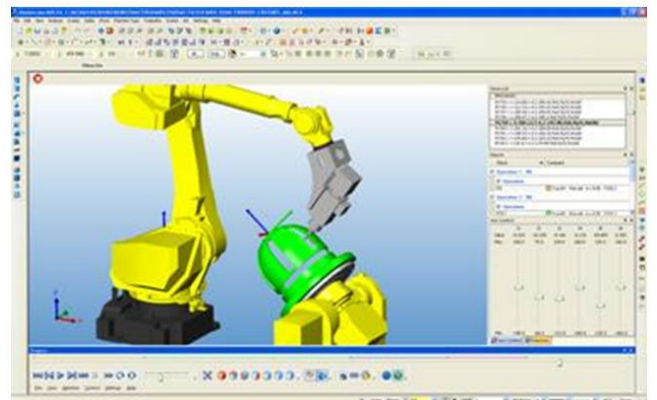
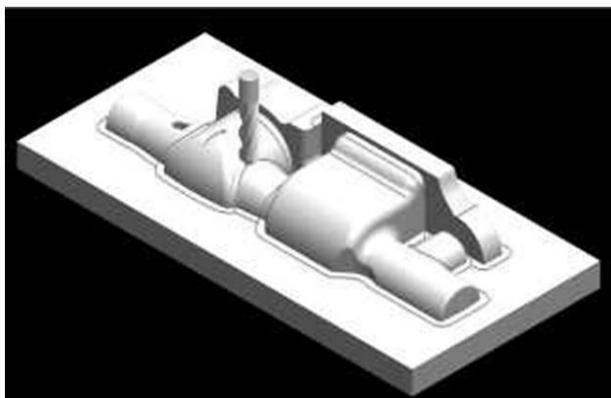
2 pav. Kompiuterinės integruotos gamybos (CIM) paskirtis

Visų 3D CAD sistemų projektuojamos detalės ir surinkimo vienetai pasižymi parametrinėmis savybėmis, todėl projektuojamų objektų matmenis galima koreguoti beveik

kiekvienoje jų projektavimo stadijoje. 3D CAD sistemos suvokia įvairius sujungimus, skyles, nuožulas ir pan. kaip konstrukcinius-technologinius elementus. Tokiu būdu trimačiai gaminių modeliai jose projektuojami tarsi dviem etapais: pirmiausia sukuriamas būdingas detalės profilis plokštumoje, o vėliau jam suteikiamas trečias matmuo. Projektavimo metu nuolat veikia abipusis modelio ir brėžinio ryšys, dėl to, esant parametrinėms savybėms, galima taisyti ir pačiame modelyje, ir jo projekciniuose vaizduose. Šios 3D CAD sistemų savybės padeda vartotojui projektuoti trimačius objektus ir surinkimo vienetus nesusiejus jų nuo projektavimo pradžios su konkrečiais detalių matmenimis ir surinkimo vieneto sudėtimi, o optimizuoti modelį jo kūrimo metu. Pavyzdžiui, galima patikrinti stiprumo sąlygas taikant stiprumo teorijos ar baigtinių elementų metodus ir tuomet, kai yra nuokrypių nuo priimtų stiprumo kriterijų, galima vėl grįžti prie trimačio modeliavimo.

Prototipų CIM gamybos procesą galima išskirti į šiuos etapus:

- būsimo gaminio projektavimas CAD sistemomis. CAD trimačio modeliavimo sistemų naudojimas įrangos gamyboje yra ypač efektyvus, nes ten yra gaminamos sudėtingos formos gaminiai;
- gaminio pvz. 3D kūno kūrimas CAD sistemoje;
- valdymo programos prototipui apdirbti SPV staklėmis ar robotu kūrimas CAM (Computer Aided Machining) sistemoje (3 pav.). CAM sistemos leidžia kurti mechaninio apdirbimo valdymo programas bet kokio sudėtingumo paviršiams apdirbti.



3 pav. CAM sistemų pavyzdys

CAD ir CAM integravimas leidžia pagerinti bendradarbiavimą tarp šių dviejų sričių gamybos cikle. Tiesioginis 3D erdvinių modelių įvedimas į CAM ir asociatyvi sąsaja su pradiniais modeliais yra pagrindinis elementas, supaprastinantis tokį bendradarbiavimą tarp projektavimo ir gamybos. Akivaizdu, kad privalumas yra laiko tarp projektavimo ir gamybos sumažinimas.

Kai įvedamas 3D erdvinis modelis į CAM sistemą, svarbu, kad nebūtų prarastas nė vienas geometrinis elementas bei kad vėlesni suprojektuoto modelio pakeitimai būtų nustatomi automatiškai. Akivaizdu, kad, siekiant išvengti klaidų, neturėtų būti pakeistas duomenų formatas. Sėkmingiausias metodas yra naudoti CAM sistemą su integruotu CAD modeliavimo moduliu. Tada ne tik nereikia keisti duomenų formato, bet ir CAM naudojami duomenys susiejami su pradiniu CAD modeliu. CAM programinės įrangos galimybė tiesiogiai susisiekti su projektuojamu modeliu ir nustatyti pakeitimus leidžia CAM sistemai atpažinti 3D erdvinio modelio pokyčius per visą jo gyvavimo ciklą.

3D CAM sistemos šiandien duoda gerus rezultatus dėl padidėjusio detalių apdirbimo programavimo greičio. Pastaruoju metu pradėjus taikyti geriausia praktika paremtus metodus ir užtikrinus aukštą kokybę bei asociatyvią sąsają su pradiniu 3D modeliu, labai padidėjo automatizavimo galimybės.

3D CAM sistemoje galima dirbti su įvairiais pagrindiniais režimais, tokiais kaip: frezavimas, tekinimas, gręžimas, šlifavimas, medžio apdirbimas, kietų kūnų modeliavimas, meninių vaizdų sudarymas ir apdirbimas, 3D paviršinis modeliavimas ir braižymas. Racionalus pagrindinis meniu ir visiška proceso kontrolė leidžia greitai ir patogiai programuoti apdirbimą bei planuoti tolesnį darbą.

Automatinis apdirbimo programavimas leidžia tiksliai sudaryti pjovimo įrankio apdirbimo trajektoriją. Jei atsiranda pasikeitimų pradinėje rinkmenoje, programa automatiškai koreguoja trajektoriją tolesnėse operacijose.

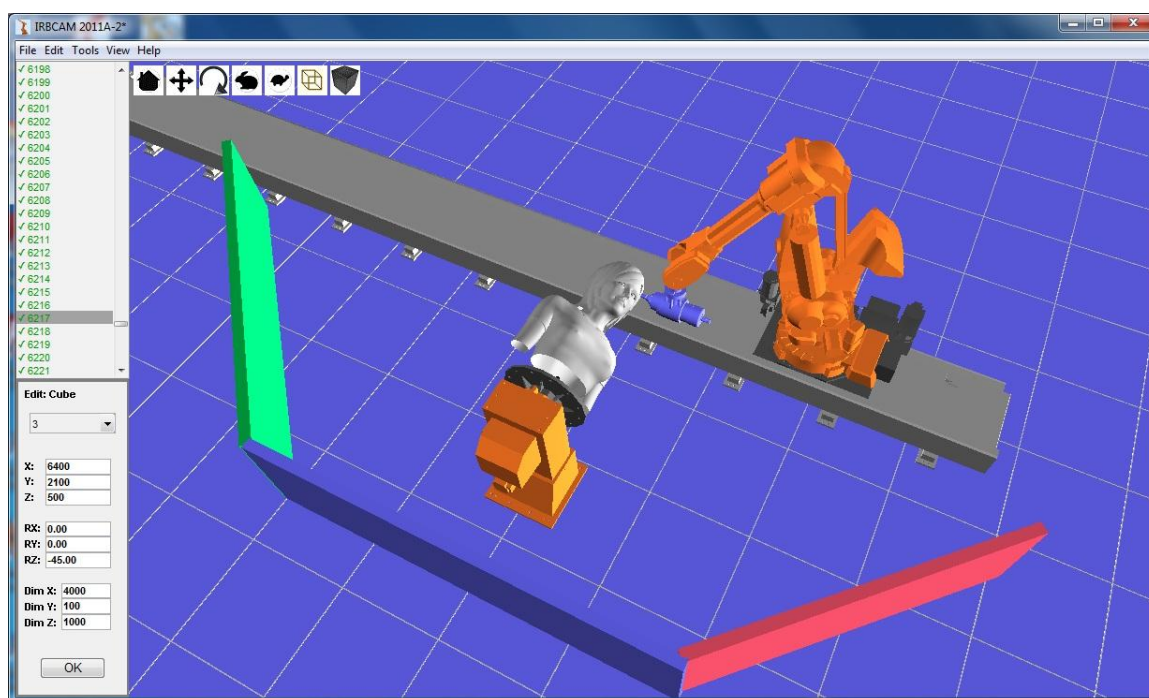
1.1.4 IRBCAM - CAD/CAM robotams

IRBCAM konvertuoja APT-cl arba ISO G-kodų formatus į ABB Rapid robotų kalbą, Kuka KRL, Comau PDL2, MOTOMAN Žinios III arba FANUC Karelą kalbą. IRBCAM pripažįsta ABB valdiklius S4, S4C, S4C + ir IRC5, taip pat Kuka KRC, Comau C3G/C4G, MOTOMAN NX100/DX100 ir FANUC RJ3/RJ4 valdiklius. IRBCAM atveria galingų CAD / CAM galimybių panaudojimą robotų vartotojams: ABB, KUKA, Comau, MOTOMAN ir FANUC.

Gera sukalibravus robotą galime pasiekti roboto tikslumą iki 0,3–1,0 mm, parkartojamumą iki 0,2 mm ir darbo srities apimtį su spinduliu 3,9 metro (Roboto kalibravimas yra svarbus procesas. Netinkamai sukalibruotas robotas turės kelių milimetrų paklaidą).

IRBCAM programoje išorinės ašys leidžia išplėsti darbo sritį panaudojus tipiškas linijines trasas (nuo 5 iki 10 metrų ilgio), sukamosios išorinės ašys leidžia apdirbti ruošinį iš visų pusių vienu pastatymu. Lanksčiausias procesas apdirbant didelių gabaritų ruošinius yra, kada

robotas montuojamas ant linijinės trasos (ant treko), o ruošinys tvirtinamas ant pasukamo stalo (4. pav.).



4 pav. Apdirbimas robotu panaudojus treką ir pasukimo stalą IRBCAM programoje

IRBCAM pristatomas kaip sistemos modulis, kuris, sumontavus roboto valdiklį, leidžia be pertraukos frezuoti didelių gabaritų ruošinį (neviršijantį roboto valdiklio vidaus disko dydžio). Su IRBCAM įranga galima atlikti 3–5 ašių apdirbimo operacijas, o tai tinka sparčiai prototipų gamybai (pjovimui, frezavimui, šlifavimui). Be tradicinių apdirbimo operacijų, IRBCAM programinė įranga taip pat gali būti naudojama pjovimui vandens srove, plazma ir pjovimui lazeriu, klizavimui ir taip pat tapybai.

5 priežastys pasirinkti IRBCAM programą:

Prieinama kaina: anksčiau buvo labai brangu ir sudėtinga „NC“ kodus konvertuoti į roboto suprantamą kalbą. IRBCAM suteikia šią technologiją už prieinamą kainą, dėl to vartotojų kiekis yra gausus. Universitetams ir mokymo įstaigoms yra suteikiama 90 % nuolaida šiai programai įsigyti (mokymo medžiaga, pagal pageidavimą).

Naudojimo paprastumas: IRBCAM yra intuityvi ir patogi 3D sąsaja. Net sudėtingos robotizuotos sistemos, įskaitant išorines ašis, gali būti konfigūruojamos intuityviai grafiniais vedliais. Šiuo metu techninėse mokymo įstaigose IRBCAM paketas naudojamas kaip robotų mokymo priemonė.

Lankstumas: IRBCAM nėra konkretaus robotų gamintojo ar konkrečių CAD / CAM programinė įranga. Ji yra pritaikyta įvairių gamintojų robotams, pvz.: ABB, Kuka, Comau, MOTOMAN ir FANUC ir t. t. IRBCAM atpažįsta daug įvairių CAD / CAM programinių įrangų. Mes neturime pereiti prie naujos CAD / CAM programinės įrangos, prieš perkant IRBCAM paketą. IRBCAM paketas buvo išbandytas ir dirba su SURFCAM, Catia, ProEngineer, VisualMill, PowerMill, SolidWorks arba SolidCAM ir kt.

OFF–LINE programavimas: taip pat IRBCAM gali būti naudojamas kaip savarankiškas OFF–LINE programavimo ir tikrinimo įrankis, įskaitant tikrinimo savitumą ir roboto konfigūraciją (lenkimas atgal / pirmyn, alkūnę aukštyn / žemyn, apversti riešą). Roboto programa gali būti sukurta ir patikrinta 3D erdvėje, nenaudojant G-kodo arba Apt-CL įrankių kelio iš CAD / CAM programinės įrangos.

Nuolatiniu gamybos tobulinimu: IRBCAM programinė įranga yra nuolat plėtojama ir papildoma naujomis funkcijomis pagal kliento pageidavimą.

1.2 Pramoninių robotų poreikis prototipų gamyboje

Siekdamas išsilaikyti šiandieninės rinkos sąlygomis, kiekvienas gamintojas yra priverstas didinti gamybos našumą ir mažinti sąnaudas.

Didėjant būtinybei spartinti gamybą ir išlikti konkurencingoms augančioje pasaulinėje rinkoje, daugumai gamybos įmonių pagrindiniu klausimu tampa efektyvios ir lanksčios robotų technologijos poreikis (Chryssolouris 2006 m.).

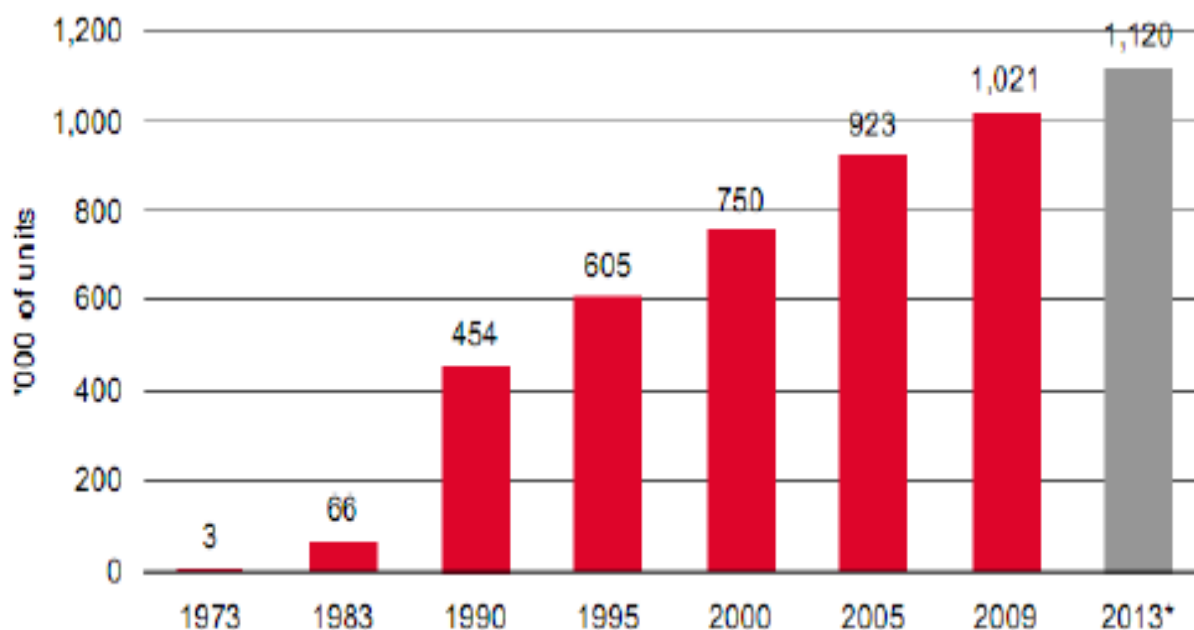
Lanksčių gamybos procesų ir trumpesnės gamybos trukmės poreikis, taip pat didėjančios gamybos sąnaudos bei griežtesni saugos ir sveikatos reikalavimai šiose srityse skatina investicijas į pramoninių robotų suteikiamą greitį, tikslumą bei universalumą.

Tinkamai prižiūrimo, suderinto ir programuoto roboto naudojimo ciklo trukmė yra vidutiniškai penkiolika metų, iš jų galbūt penkeri be jokių, net menkų, sutrikimų, esant tokiam pat darbo našumui, apimančiam darbų vykdymo greitį, universalumą ir pastovumą.

Dėl aukštesnės technologijos robotų instaliavimo darbų apimtys yra mažesnės, robotų atliekamo darbo – didesnės, darbinis triukšmas mažesnis, programavimas ir sujungimas su kitomis sistemomis lengvesnis, klaidų / sutrikimų dažnis sumažėja.

Skirtingai nuo fiksuotos automatizacijos, esančios CNC įrenginiuose, daugiausia pramoniniai robotai gali būti panaudoti naujuose procesuose naujoms funkcijoms atlikti ir inžinieriams nereikia kurti visiškai naujų gamybos linijų.

Be to, robotų panaudojimo pasaulyje statistiniai duomenys rodo, kad pramoninių robotų skaičius nuolat didėja visame pasaulyje ir ateities prognozės rodo, kad robotų rinka ir toliau plėsis ir klestės.



5 pav. Robotų panaudojimo pasaulyje statistiniai duomenys

Pasaulyje yra nemažai įvairių įmonių robotų sistemų kūrimo srityje. Pvz.: „Fanuc Robotics“, „Kuka“, „Newtec“, „ABB“, „Staubli“, „Comau“, „Motoman Yaskawa company“.

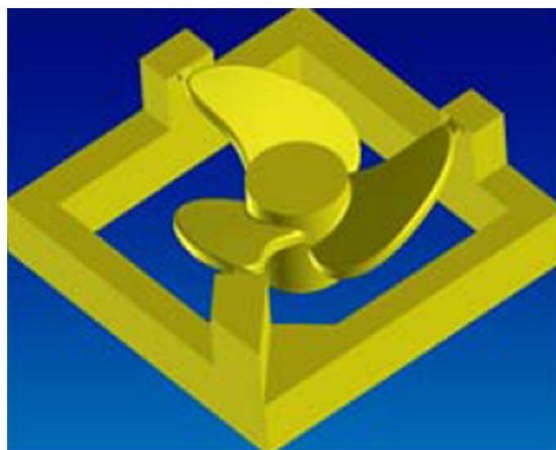
1.2.1 Prototipų mechaninis apdirbimas panaudojant robotą

Kai robotizuotas 3D mechaninis apdirbimas tapo įgyvendinamas, atsiranda vis daugiau įvairios informacijos ir literatūros apie jį. Pvz.: kas yra 3D apdirbimas, kaip jis atliekamas, kokia įranga tam reikalinga ir pan. Akivaizdu, jog norint suprasti ir įvykdyti šį apdirbimą, neužtenka vien paprastų žinių ir minimalios informacijos apie jį. Praktiškai atlikti tokio tipo apdirbimą su robotu yra pakankamai sudėtinga tiek įrangos, tiek programinių paketų valdymo prasme.

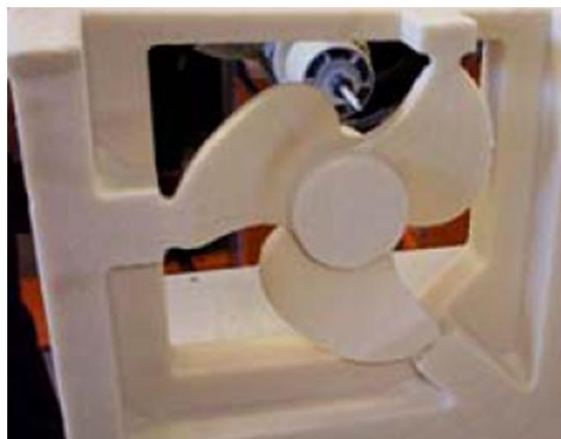
Norint frezuoti prototipą su robotu, būtinos šios pagrindinės priemonės:

- programuojamas robotas (ne mažiau kaip 6 laisvės laipsnių);
- kompiuteris su visa reikalinga programine įranga;
- apdirbimo įrankis (frezavimo galvutė ar kt.);
- ruošinys, įtvirtintas roboto darbo zonoje.

Kai išmokstama dirbti su robotu ir programine įranga, 3D modeliavimas ir mechaninis apdirbimas vykdomas gana paprastai.



a)



b)

6 pav. 3D modeliai: a) – CAM programoje; b) – pagamintas prototipas

Iš pradžių, pasinaudojus CAD sistema, nubraižomas 3D prototipo erdvinio modelis, kurį norime frezuoti.

CAD sistemoje nubraižytas prototipas perkliamas į CAM sistemą. CAM sistemoje parenkamas apdirbimo įrankis ir nustatomi apdirbimo būdai, greičiai ir kiti būtini parametrai.

Baigus modeliavimą, detalę perkliama į „IRBCAM“ arba į kitą kokią nors roboto 3D sąsają. Joje įvedamos įtvirtinto ruošinio padėties koordinatės ir parenkamas frezavimo pradžios taškas. Su „IRBCAM“ kiekviena operacija patikrinama, ar robotas galės ją įvykdyti, ar nėra nepasiekiamų vietų, ar roboto darbinė trajektorija yra taisyklinga. Baigus tikrinimą paleidžiama roboto darbo simuliacija. Simuliacijos metu galima stebėti patį robotą, darbo įrankį, jo judėjimo trajektorijas, ruošinį ir kaip atliekamas visas apdirbimas. Naudojant roboto darbo simuliaciją, galime įsitikinti, jog robotas dirba tvarkingai ir nedaro klaidų, sukuriame „G“ kodai.

Kompiuterio pagalba jie perkliami į robotą.

Su programavimo pultu nustačius reikiamus parametrus įvykdomas mechaninis apdirbimas ir gaunamas detalės prototipas.

Tokiu būdu yra atliekamas 3D prototipų frezavimas su robotu. Nesvarbu, kokia detalė ar figūra bus pasirinkta frezuoti, apdirbimo modeliavimo metodika bus labai panaši. Taip pat ji nesikeistų, jei būtų keičiamas pats apdirbimas, pvz.: gręžimas, graviravimas, šlifavimas ar suvirinimas. Tik tuo atveju robote reikės keisti ir iš naujo kalibruoti apdirbimo įrankį.

Pasaulyje prototipų mechaninis apdirbimas panaudojant robotą, plačiai naudojamas architektūroje. Suteikia galimybes frezuoti sudėtingų architektūrinių formų modelius (Anita Aigner, Sigrid Brell-Cokcan. 2009 m.).

1.2.2 Robotizuotų sistemų privalumai lyginant su CNC staklėmis prototipų gamyboje

Kur kas daugiau yra galimybių apdirbti 3D kūnus. Lyginant su tradiciniu metodu naudojant 5-ašių apdirbimo centrus, naudojant pramoninius robotus turint nedideles lėšas apdirbimui yra daugiau galimybių apdirbti 3D kūnus. Pramoninių robotų yra didesnė darbo zona, o tai leidžia apdirbti itin didelių gabaritų ruošinius, yra daugiau variantų kaip tvirtinti ar pozicionuoti ruošinius, sumažinant pastatymų skaičių. 6 ašių pramoninį robotą galima tvirtinti tiek vertikaliai aukštyn, tiek vertikaliai žemyn nukreipta Z ašimi.

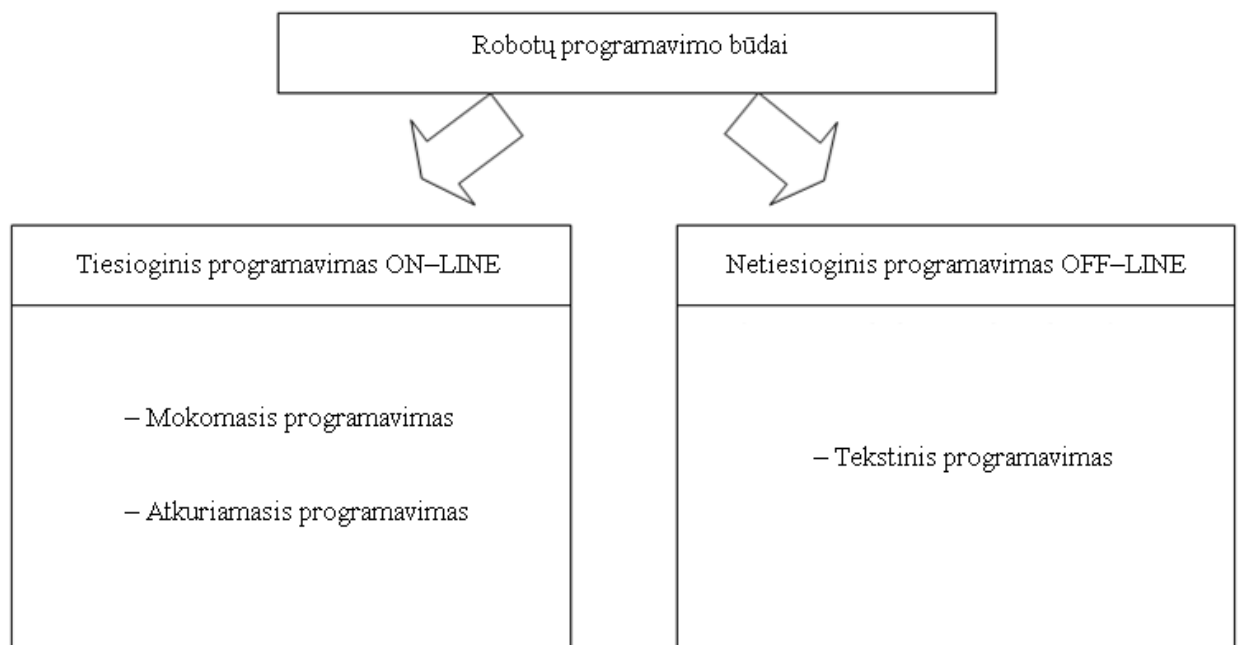
Didesnis patikimumas. Pirmaujančios įmonės pramoninių robotų gamintojos turi daugiau nei 30 metų patirtį apdirbant, gaminant ir eksploatuojant savo produkciją. Šiais laikais yra šimtai tūkstančių pramoninių robotų, kurie dirba įvairiose vietose, pvz., gamyklose, atlieka įvairiausius darbus. Masinėje, serijinėje robotų gamyboje, gaminant aukščiausiu lygiu, užtikrinti geri patikimumo rodikliai. Šiuolaikiniai robotai gali dirbti iki 60 000 val., o tai reiškia 7 metus dirbant be pertraukų, esant realioms darbo sąlygoms gali dirbti 20 metų. Su tokiais patikimumo rodikliais jie tik padidina eksploatacijos laiką.

Našumo padidinimas. Pramoninio roboto tuščiosios eigos greitis yra 2 m/s apdirbant ruošinį pjovimu, tai yra kelis kartus daugiau nei pjovimo galvutės, esančios koordinatinėse staklėse. Šitas faktorius gali leisti padidinti našumą gamyboje naudojant pramoninius robotus iki 40 % (Ostring, Gunnarsson, Norrlof, 2003; Ziaei, Liya, Wang, 2009).

Apdirbimo tikslumo padidinimas nemažinant produkcijos. Naudojant tradicinius apdirbimo centrus, siekiant kompensuoti apdirbimo kampus, yra mažinami pjovimo režimai arba naudojamos specialios dinaminės galvutės apdirbimo kampą kompensuoti, su galimybe pasukti 10–12 laipsnių kampą. Tokios galvutės kaina siekia 50 000 eurų, tai labai smarkiai padidina produkcijos savikainą, už tokią kainą galima įsigyti robotą. Aišku, kad pramoniniam robotui galimybė pasukti pjovimo galvutę aplink 5-tą ir 6-tą ašį kampą -190 iki + 190 ir nuo -360 iki +360 leidžia laisvai kompensuoti apdirbimo kampą nesumažinant pjovimo greičių. Pramoninių robotų pozicionavimo tikslumas 0,03–0,1 mm, o tai leidžia gaminti aukštos kokybės detales (Damak, Grosbois, De Smet, 2004 m.).

Priežiūros paprastumas. Minimalūs techniniai robotų-manipuliatorių priežiūros reikalavimai leidžia supaprastinti eksploataciją naudojant robotizuotus įrenginius.

Programavimas atliekamas ON–LINE režimu, t. y. tiesiogiai robote, arba OFF–LINE režimu be ryšio su robotu programuotojo darbo vietoje darbo parengimo metu (7 pav.).



7 pav. Robotų programavimo būdai

- Mokomojo programavimo metu robotas judėdamas pirmyn pasiekia erdvinius taškus ir atlieka griebimo veiksmus rankiniu būdu. Atlikta judėjimo arba manipuliavimo eiga matavimo signalų pavidalu įvedama į valdymo sistemą ir po to gali būti pakartojama tiek kartų, kiek reikia.
- Atkuriamasis programavimas atliekamas vedžiodamas ranka roboto ranką. Kas 20 ms valdymo sistema įsimena atitinkamas judėjimo trajektorijos padėtis.
- Naudojant tekstinį programavimą, programos eiga aprašoma operatorių (tekstų) pavidalu roboto programavimo kalba.

1.2.3 Robotizuotų sistemų trūkumai lyginant su CNC staklėmis prototipų gamyboje

Nepaisant visų prieš tai pateiktų robotų privalumų prieš CNC stakles, pramoniniai robotai negali iki galo pakeisti CNC staklių. Pjaunant prototipus iš kietesnių medžiagų roboto standumo neužtenka, norint pasiekti reikiamą apdirbimo tikslumą. Tokį prastą tikslumą ir standumą sukelia daugybė veiksnių, tokie kaip geometrinių parametrų paklaidos: leistini gamybos nuokrypiai, detalių nusidėvėjimas ir komponentų pakeitimai, taip pat ir negeometriniai veiksniai, tokie kaip sąnarių ir pavarų įrangos lankstumas, pavaros reakcija ir grįžtamasis ryšys, skaitiklio rezoliucijos paklaidos ir šiluminiai veiksniai (Elatta, Pei Gen, Liang Zhi, Daoyuan, & Fei, 2004; Khalil & Dombre, 2004; Shiakolas, Conrad, & Yih, 2002).

Atliekant mechaninį apdirbimą panaudojant pramoninį robotą, yra labai svarbu suplanuoti roboto įrankio trajektoriją. Tai yra pagrindinė problema robotuose. Gerai suplanuota

trajektorija garantuoja gerą kelio sekimą, mažiau judina mechaninę ir automatinio reguliavimo roboto sistemos struktūrą, kas leidžia išvengti vibracijų įtakojančių apdirbamų paviršių kokybę (Nakamura, 2007).

Skirtingai negu CNC staklėse, mechaninio apdirbimo pramoniniu robotu metu, negalima kontroliuoti įrankio pastūmos greičio.

Pasaulyje jau pasirodė specialieji pramoniniai robotai, kurie yra skirti būtent įvairiausių medžiagų frezavimo operacijoms, jie yra didelio standumo, patikimumo, pasiekia aukštą apdirbimo tikslumą. Bet jie praranda gebėjimą atlikti kitas operacijas, kitaip sakant, pramoninis robotas praranda savo universalumą.

1.3 Pramoninių robotų ypatybės ir charakteristikos

Pramoninis robotas – oficialiai apibrėžtas kaip automatiškai kontroliuojamas, programuojamas, daugiatakslis manipulatorius. Pramoninių robotų svarbiausios sąvokos yra reglamentuojamos standartų: vykdymo mechanizmas, darbo įtaisas, kinematinės grandys, koordinatinių judesių sistema, darbinė erdvė, darbo zona, priežiūros zona, nominali keliamoji galia, darbo įtaiso pozicionavimo paklaida, judrumo laipsniai. Iki šiol pramoniniai robotai daugiausia buvo kuriami tik tam tikroms operacijoms (ruošimams pakrauti ir iškrauti, gaminams perkelti ir kt.). Šiuo metu pramoninių robotų gamyba iš esmės pasikeitė. Kuriami didelių technologinių galimybių pramoniniai robotai, kurie gali atlikti labai įvairias operacijas ir turi daug judrumo laipsnių.

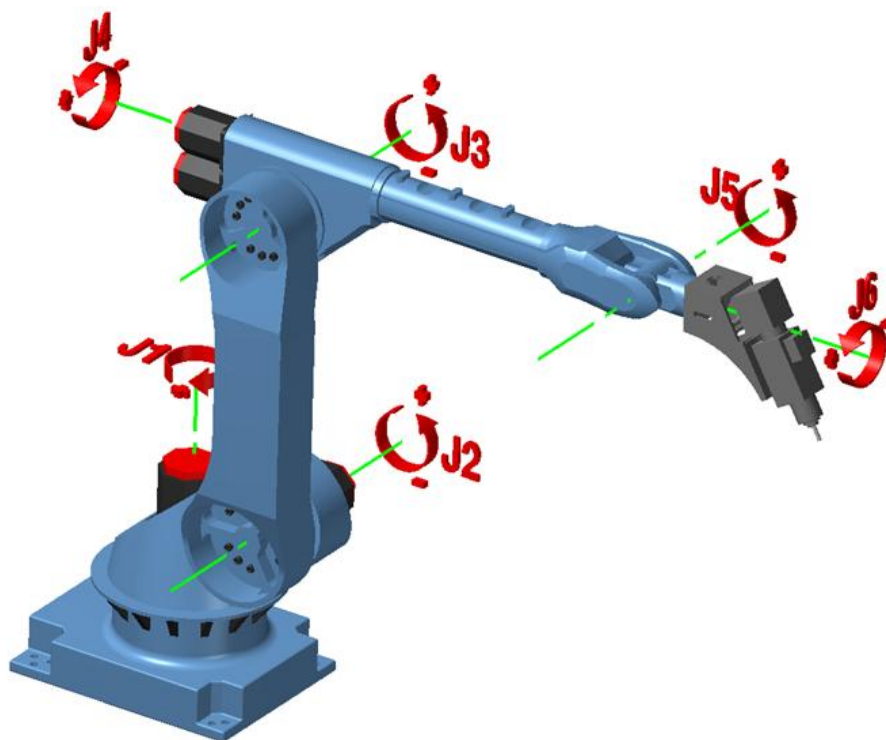
Pramoninio roboto konstrukcijos priklauso nuo šių veiksnių: 1) paskirties; 2) manipuliavimo objekto pobūdžio; 3) našumo rodiklių (ciklo trukmės, darbo įtaiso poslinkių, greičių ir pagreičių); 4) technologinio proceso parametrų. Robotų paskirtį lemia šie veiksniai: 1) automatizuojamojo technologinio proceso pobūdis; 2) aptarnaujamųjų įrenginių nomenklatūra; 3) konstrukciniai, technologiniai parametrai; 4) reikiama roboto manipuliavimo judesiai. Roboto konstrukcijai svarbūs šie technologinio proceso parametrai: procesui atlikti reikalingas roboto pozicionavimo tikslumas, pozicionavimo taškų skaičius ir jų išdėstymas, manipuliavimo objekto sugriebimas, jo pašalinimas iš roboto darbo zonos ir kt. Projektuojant robotą, būtina atsižvelgti į projektavimo sąlygas: aplinkos temperatūrą, drėgnumą, išorines vibracijas, patikimumo, remonto, derinimo, darbo saugos reikalavimus (Yaskawa Electric Corporation, 2010).

Robotų projektavimas turi dvi kryptis: 1) specializuotųjų ir specialiųjų. Šie robotai turi nedaug laisvės laipsnių, yra tikslūs, greitaveikiai, patikimi; 2) universaliųjų daugiafunkcinių. Šie

robotai atlieka daugiau technologinių operacijų, turi daugiau judrumo laipsnių, tačiau sunkiau pasiekti didesnę jų pozicionavimo tikslumą, darbo patikimumą, brangesnė jų gamyba (UAB Profibus, 2010).

Pagal atliekamo darbo pobūdį robotai aprūpinami griebtuvais arba įrankiais. Jų judesiai yra laisvai programuojami arba valdomi davikliais.

Pramoniniai robotai turi sudėtingą kinematikos sistemą. Kad kūną erdvėje būtų galima bet kaip sukuti ir pastumti, reikia mažiausiai šešių sukimosi ašių (8 pav.).



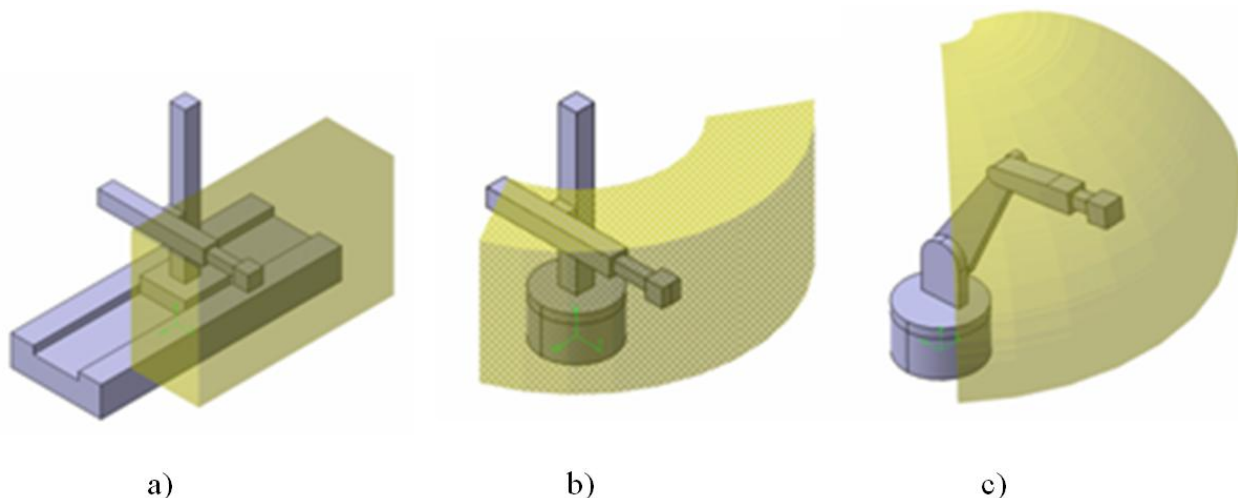
8 pav. 6 ašių pramoninis robotas su pjovimu įrankiu

Naudojantis pagrindinėmis ašimis (J_1 – J_3 ašys), galima pasiekti bet kurį roboto darbo zonos tašką. Pritaikius pagalbines ašis (4–6 ašys), griebtuvas arba įrankis gali įgyti norimą kryptį erdvėje. Ašys yra viena nuo kitos nepriklausomos varančiosios grandys. Griebtuvo judėjimo galimybės nepriklauso vien tik nuo ašių. Kinematinė roboto struktūra sudaryta iš sukimosi ir linijų ašių. Robotai skirstomi į robotus su linijinėmis ašimis (T = translation) ir sukimo ašimis (R = rotation).

Šešių laisvės laipsnių paraleliniai manipulatoriai turi šiuos privalumus:

- 1) neporinių judesių charakteristikos ir skirtingų užduočių pasirinkimo galimybę;
- 2) uždaros formos sprendimas tiesioginiam ir netiesioginiam poslinkiui;
- 3) supaprastinta kinematinė analizė, judesio planavimą ir kontrolės schemą;
- 4) lengvą kalibravimą ir balansavimą.

Robotų konstrukciją ir jo pagrindinių ašių išdėstymą riboja galima darbo erdvė (9 pav.). Darbo erdvė – tai erdvės dalis, kurioje gali judėti roboto darbo įtaisas. Joje negali būti kitų technologinio komplekso įrenginių bei statybinių konstrukcijų.



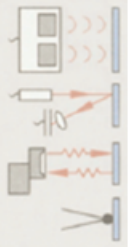
9 pav. Robotų darbo erdvė: a) – kartezinė; b) – cilindrinė; c) – sferinė

Pramoninio robotų darbo rodikliai priklauso nuo konstrukcijos tipo:

- *Judėjimo ašių skaičius* – kuo daugiau robotas turi ašių (lanksčių grandžių), tuo jis manevringesnis. Didžiausias laisvės laipsnis $f = 6$ reikalauja mažiausiai 6 judėjimo ašių.
- *Darbo zona* – apibūdina galimą judėjimo erdvę, pastaroji sudaryta iš visų ašių poslinkių diapazono ir kartu reiškia roboto saugaus darbo erdvę.
- *Nominali apkrova* – visada yra mažesnė už maksimaliai leidžiamą keliamąją galią ir neribojant greičio gali būti gabenama roboto.
- *Judėjimo ašių greitis* – išreiškiamas ašių judėjimu.
- *Pakartojimo tikslumas* – atsitiktinis nuokrypis, kuris atsiranda tokiomis pat sąlygomis siekiant pakartotinai užimti tą pačią padėtį.
- *Pozicionavimo tikslumas* – maksimalus nominalios apkrovos nuokrypis pozicionavimo metu.

1.3.1 Pramoninių robotų jutikliai

Jutikliai yra roboto „jutimo organai“, kurie smarkiai išplečia jo naudojimo galimybes (10 pav.). Kontaktiniai jutikliai „jaučia“ apdirbamos detalės formą ir padėtį. Bekontakčiai optiniai arba elektriniai jutikliai perduoda valdymo sistemai informaciją iš darbo zonos ir taip kontroliuojamos perduodamos jėgos ir judesiai.

Kontrolės paskirtis	Jutiklio tipas	
Padėties, koordinačių, greičio, pagreičio nustatymas		Segmentinė plokštelė Kampinių žingsnių jutiklis
Saugumas		Galinis jungiklis Fotoelektrinis įtaisas
Atstumo nustatymas		Induktyvinis arba talpuminis priartėjimo jutiklis: 0,1 – 10 mm Optinis nutolimo jutiklis: 1 mm – 10 m Garso jutiklis: 0,1 – 10 mm Kontaktinis jutiklis
Apdirbamos detalės: kontūro sekimas, padėties, būklės nustatymas, atpažinimas		Kontaktinis jutiklis Vaizdo apdorojimas naudojant kamerų sistemą
Jėgos, slėgio, sukimo momento nustatymas		Jėgos jutiklis

10 pav. Jutiklių panaudojimas

Iš jutiklių gaunamą informaciją robotui reikia apdoroti ir priimti sprendimus. Tam robotuose naudojami įvairios galios kompiuteriai: nuo mažyčių mikrovaldiklių iki galingų kompiuterių. Kas vyksta roboto „smegenyse“? Iš tikrųjų roboto procesorius tiesiog vykdo iš anksto parašytą programą, kuri stebi jutiklių duomenis ir priima atitinkamus sprendimus (Shon P., *et al.* 2009).

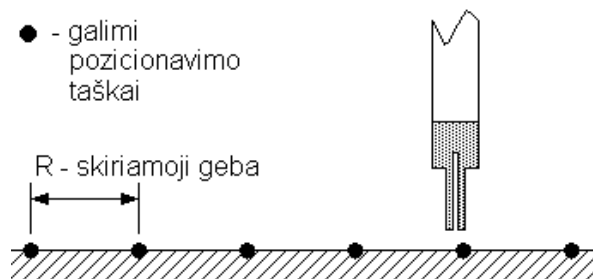
1.3.2 Roboto tikslumas ir pakartojamumas

Pozicionavimo tikslumas priklauso nuo daugelio veiksnių: robotui judesius suteikiančių pavarų paklaidų; mechanizmų detalių gamybos paklaidų; paklaidų, atsirandančių dėl roboto grandžių paslankumo. Priklausomai nuo roboto tipo, jo keliamosios galios, funkcionavimo sąlygų, kiekviena iš šių paklaidų gali turėti lemiamą reikšmę pozicionavimo tikslumui (Kyung-Jo Park, 2004).

Roboto judesių tikslumas ir pakartojamumas priklauso nuo:

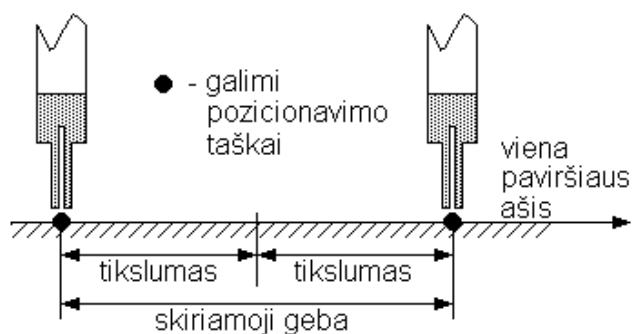
Valdymo sistemos skiriamosios gebos. Valdymo skiriamoji geba apriboja taškų, į kuriuos gali patekti roboto ranka, kiekį. Priklausomai nuo roboto konstrukcijos šie taškai gali būti tolygiai išdėlioti erdvėje arba atstumas tarp jų priklauso nuo roboto kinematinų grandžių padėties.

Tai reiškia, kad roboto rankos galo taškas gali būti pozicijuotas ne bet kur, o tik baigtiniame taškų kiekyje. Todėl vietoje vartotojui reikalingų koordinačių dažniausiai yra parenkamas artimiausias įmanomas diskretinis taškas.



11 pav. Roboto įrankio pozicionavimas tarp diskretinių taškų

Idealiai kinematinei roboto konstrukcijai tikslumas ir valdymo skiriamoji geba gali būti iliustruoti taip (12 pav.):



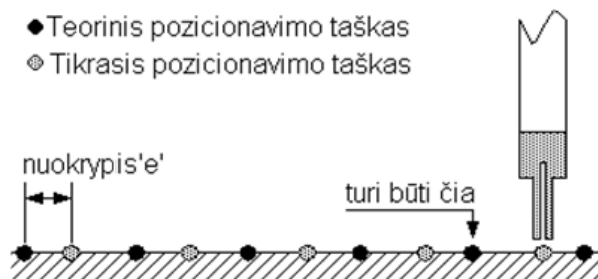
12 pav. Roboto įrankio pozicionavimas į diskretinius taškus

Idealiu atveju roboto ranka gali būti pozicijuojama tik į diskretinius taškus. Tuo būdu tikslumo dydis bus lygus pusei žingsnio tarp gretimų galimų pozicionavimo taškų. Realiesiems darbams būtina, kad žingsnis tarp galimų pozicionavimo taškų (valdymo skiriamoji geba) būtų daug mažesnis už darbinės erdvės padalinimo taškus.

Kinematinio modelio nuokrypiai. Roboto kinematinis modelis šiek tiek skiriasi nuo tikrojo roboto kinematikos – atstumai tarp ašių, atstumas tarp kreipiančiųjų ir slystančios dalies, ašių lygiagretumas ar statmenumas. Dėl to teoriškai apskaičiuoti sujungimų poslinkio dydžiai ir posūkio kampai realiame robote sukels nuokrypį nuo reikiamų vartotojui koordinačių.

Kalibravimo nuokrypiai. Pozicionavimo taškas, išmatuotas kalibravimo metu, gali šiek tiek pasislinkti. Tada šis poslinkio nuokrypis taps nuokrypiu nuo apskaičiuoto pozicionavimo taško.

Kinematiniai ir kalibravimo nuokrypiai perstumia tikrąjį pozicionavimo tašką teorinio taško atžvilgiu dydžiu 'e'.



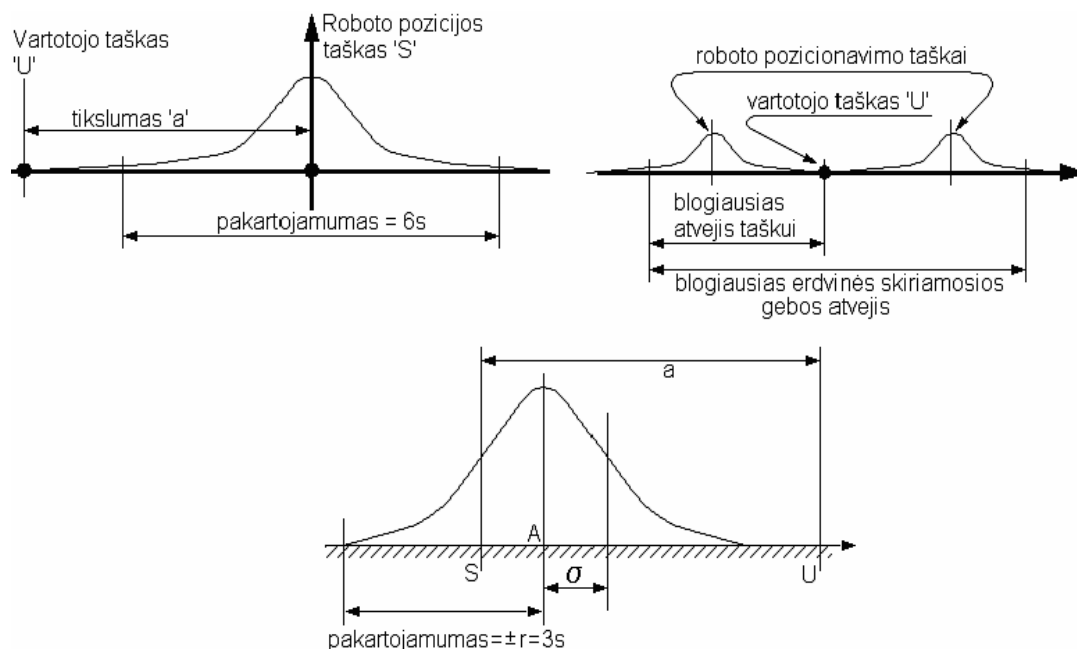
13 pav. Galimas roboto įrankio nuokrypis

Čia gali būti dviejų tipų nuokrypiai. Pastovus nuokrypis paprastai gaunama tada, kai modelio ir realaus roboto 'nulio' taškai nesutampa dydžiu e .

Didėjantis nuokrypis gaunamas tada, kai modelio ir realaus roboto kinematikos ar padėties jutiklių perdavimo koeficientai tarpusavyje nesutampa.

Atsitiktiniai nuokrypiai. Jie atsiranda roboto darbo metu. Pavyzdžiui, trintis, roboto kinematinų grandžių išlinkimai ar susukimai, grandžių geometrijos pakitimai dėl besikeičiančios temperatūros aplinkoje ar sujungimuose, tuščiaja eiga ar praslydimai perdavimo mechanizmuose ir kt.

Atsitiktiniai nuokrypiai neleidžia robotui tiksliai sugrįžti į tą patį tašką. Grįžimo vietos nuokrypiai nuo roboto realaus pozicionavimo taško gali būti aprašyti normaliniu pasiskirstymu. Maksimalus pakartojamumo nuokrypis randamas taip (14 pav.):



14 pav. Maksimalaus pakartojamumo nuokrypio radimas

Vartotojui reikalingas pozicionavimo taškas gali būti maksimaliai nutolęs nuo roboto realaus pozicionavimo taško dydžiu $a = (\text{skiriamoji geba})/2$. Tada:

$$e_{max} = a + e_{mod} + 3s \quad (1.1)$$

Čia: e_{mod} – modeliavimo nuokrypis.

Analizuojant greta esančių roboto pozicionavimo taškų nuokrypius ir vartotojui reikalingus taškus, galima gauti erdvinio pozicionavimo skiriamąją gebą. Tikslumas bendru atveju randamas taip: $\text{tikslumas} = (s - U) + e$.

Roboto pozicionavimo tikslumas taip pat priklauso ir nuo aplinkos, kurioje buvo atlikti tyrimai: nuo išorinių virpesių ir temperatūros kaitos (Koseki, 2009).

1.3.3 Roboto pozicionavimo tikslumo nustatymas

Pramoninių robotų tikslumą nusako pozicionavimo paklaida, kuri yra viena iš svarbiausių jų charakteristikų. Pozicionavimo tikslumas priklauso nuo daugelio veiksnių: robotui judesius suteikiančių pavarų paklaidų; mechanizmų detalių gamybos paklaidų; paklaidų, atsirandančių dėl roboto grandžių paslankumo. Priklausomai nuo roboto tipo, jo keliamosios galios, funkcionavimo sąlygų, kiekviena iš šių paklaidų gali turėti lemiamą reikšmę pozicionavimo tikslumui.

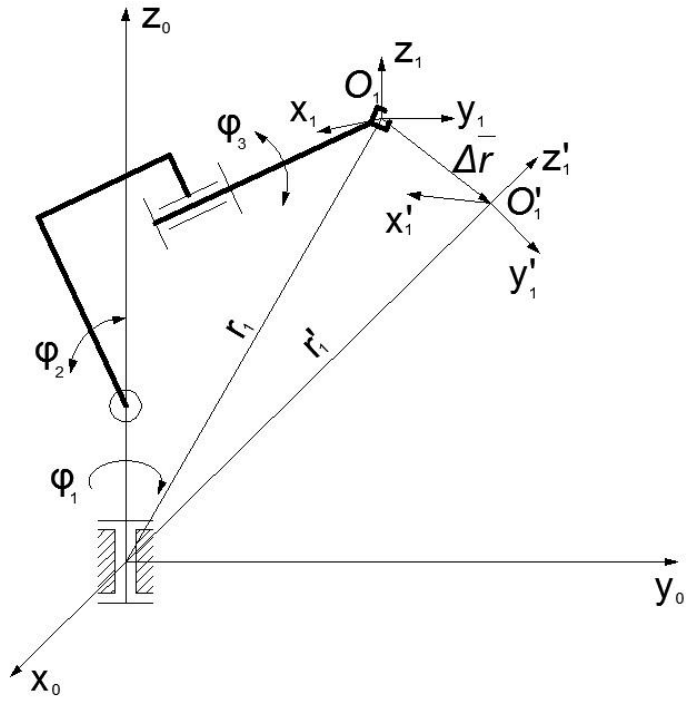
Atliekant technologinį procesą, pramoninių robotų griebtuvas kiekvienu laiko momentu turi užimti erdvėje tam tikrą padėtį, kurią nustato programinės atskirų manipulatoriaus grandžių apibendrintųjų koordinačių reikšmės. Apibendrintosios koordinatės – santykiniai roboto grandžių poslinkiai ir posūkiai, kurie vienareikšmiškai nustato griebtuvo padėtį erdvėje. Programinės reikšmės yra apskaičiuojamos ir fiksuojamos roboto darbo programoje. Darbo metu roboto pavaros neužtikrina tikslių apibendrintųjų koordinačių reikšmių. Dėl to atsiranda darbo įtaiso pozicionavimo paklaida, t. y. griebtuvo padėtis yra ne tokia, kokią lemia programoje apibendrintųjų koordinačių reikšmės. Šią paklaidą vadinsiu kinematinė manipulatoriaus paklaida. Ji gali būti tiesinė ir kampinė.

Tarkim, programinę griebtuvo padėtį erdvėje nustato su juo susieta koordinačių sistema $O_1x_1y_1z_1$ (15 pav.). Tikroji griebtuvo padėtis nustatoma koordinačių sistema $O_1'x_1'y_1'z_1'$. Vektorius Δr nusako tiesinę manipulatoriaus paklaidą. Apibendrintosios brėžinyje parodyto manipulatoriaus koordinatės q_i bus grandžių posūkio kampai $q_1 = \varphi_1; q_2 = \varphi_2; q_3 = \varphi_3$.

Tiesinę manipulatoriaus griebtuvo padėties paklaidą galima laikyti mažu dydžiu, todėl ji apskaičiuojama pagal kelių kintamųjų funkcijos diferencialo formulę. Kadangi $r = r(q_i)$ yra apibendrintųjų koordinačių q_i funkcija, tai :

$$\Delta r = \sum_{i=1}^n \frac{\partial r_i}{\partial q_i} \Delta q_i, \quad (1.2)$$

Čia Δq_i - apibendrintosios koordinatės q_i paklaida.



15 pav. Manipulatoriaus kinematinės paklaidos nustatymo schema

Naudojantis Dekarto koordinačių sistema, griebtuvo koordinatės galima išreikšti apibendrintosiomis koordinatėmis:

$$x_g = f(\varphi_1, \varphi_2), \quad (1.3)$$

$$y_g = f(\varphi_1, \varphi_2), \quad (1.4)$$

$$z_g = f(\varphi_2). \quad (1.5)$$

Tada nuo apibendrintųjų koordinačių paklaidų priklausančios pozicionavimo paklaidos nejudamos koordinačių sistemos ašių kryptimis apskaičiuojamos taip:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{\partial x_g}{\partial \varphi_1} \Delta \varphi_1 + \frac{\partial x_g}{\partial \varphi_2} \Delta \varphi_2; \\ \Delta y = \frac{\partial y_g}{\partial \varphi_1} \Delta \varphi_1 + \frac{\partial y_g}{\partial \varphi_2} \Delta \varphi_2; \\ \Delta z = \frac{\partial z_g}{\partial \varphi_2} \Delta \varphi_2. \end{cases} \quad (1.6)$$

Tiesinės paklaidos modulis

$$\Delta q = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}. \quad (1.7)$$

Kampine manipulatoriaus paklaida vadinamas kampas, kuriuo reikia pasukti griebtuvą, kad koordinačių sistemos $O_1'x_1'y_1'z_1'$ ašys būtų lygiagrečios su sistemos $O_1x_1y_1z_1$ ašimis.

Kiekviena roboto grandis turi automatinę pavarą, kuri užtikrina tam tikrą pozicionavimo tikslumą. Slenkamosios grandies tikslumas apskaičiuojamas taip:

$$\Delta S_i = K_m S_i / D_i, \quad (1.8)$$

Čia S_i – i -sios grandies poslinkis; D_i – padėties jutiklių dikreto skaičius, tenkantis poslinkiui S_i ; K_m – matavimo sistemos kokybės koeficientas ($K_m = 1,5 \dots 2,0$).

Pozicionavimo procese dalyvauja tiesiaieigio ir kampinio poslinkių grandys. Suminė roboto pozicionavimo paklaida

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta S_i + \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i \leq [\Delta]; \quad (1.9)$$

Čia ΔS_i – tiesiaieigio judesio grandžių paklaidos dedamoji; $\Delta \varphi_i$ – posūkio grandžių paklaidos dedamoji.

Dydžiai ΔS_i ir $\Delta \varphi_i$ apskaičiuojami atsižvelgiant į manipuliavimo objektui redukuotų roboto tiesinių ir kampinių paklaidų ryšį:

$$\Delta S_i = \frac{K_{\Delta} S_i \cos \beta_{li}}{D_i}; \quad (1.10)$$

$$\Delta \varphi_i = \frac{K_{\Delta} 2\pi \varphi_i l_i \cos \beta_{ki}}{(D_i \cdot 360^\circ)}; \quad (1.11)$$

Čia K_{Δ} – atsargos koeficientas, lygus 1,2...1,3; β_{li} – kampas tarp i -os grandies poslinkio krypties ir nurodytos leistinos pozicionavimo paklaidos krypties; φ_i – kampinis grandies poslinkis; l_i – atstumas nuo sukimosi ašies iki manipuliavimo objekto; β_{ki} – kampas tarp judesio trajektorijos liestinės ir nustatymo krypties. Dydžiai β_{li} , β_{ki} , β_i nustatomi iš griebtuvo ir roboto grandžių tarpusavio padėties pozicionavimo metu geometrinių priklausomybių.

Leistinoji roboto pozicionavimo paklaida

$$[\Delta] = \frac{\Delta_0}{K_{\Delta}}; \quad (1.12)$$

Čia Δ_0 – leistinoji bazavimo paklaida, nustatoma remiantis manipuliavimo objekto pastatymo tikslumo reikalavimais.

2. TIRIAMOJI PROBLEMA, TYRIMO OBJEKTAS, TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

2.1 Tiriamoji problema

Atliekant prototipų mechaninį apdirbimą pramoniniu robotu svarbi problema yra vibracijos poveikis apdirbamo paviršiaus kokybei. Dėl atskirų sujungto roboto dalių savojo dažnio, virpesių rezonansai gali atsirasti dėl apdirbimo proceso sukeltų vibracijų.

Siekiant pasiekti reikiamą apdirbimo tikslumą, turi būti užtikrintas technologinės sistemos standumas. Dėl to serijinės struktūros sujungtas šarnyrinis robotas turi mažesnę standumą negu klasikinės staklės. Pramoninio roboto standumas dažnai yra mažesnis negu $1\text{N}/\mu\text{m}$, kai tradicinių staklių dažnai standumas yra didesnis negu $50\text{N}/\mu\text{m}$ (Pan, Zhang, Zhu, & Wang, 2006).

Šiandien mokslininkų tyrimai rodo, kad pramoniniai robotai tinkami frezavimo operacijoms, kurios yra atliekamos iš tokių minkštų medžiagų, kaip polistirenas, ABS, polipropilenas ir t. t. Apdirbant tokias medžiagas, parinkus atitinkamus režimus, roboto standumo visiškai užtenka atitinkamam tikslumui pasiekti. Naudojant metalą kaip ruošinį, pasaulyje atlikti tyrimai rodo, kad pramoninio roboto standumas yra nepakankamas. Pradedant pjauti metalą roboto sistema visiškai sutrinka.

Prototipų mechaninio apdirbimo pramoniniu robotu technologija yra gana jauna šiuolaikinių technologijų srityje. Literatūros analizė rodo, kad, mokslininkų parašytuose straipsniuose nėra nurodyta, kokie yra optimaliausi parinkti pjovimo režimai apdirbant įvairias medžiagas robotu, kad pasiekti atitinkamą paviršiaus kokybę.

2.2 Tyrimo objektas

Tiriamasis objektas yra šešių laisvės laipsnių pramoninis robotas „Motoman SSF-2000“ (16 pav.). Manipulatorius „Motoman SSF-2000“ yra pagamintas Japonijoje. Šio modelio manipuliatorių galima tvirtinti tiek vertikaliai aukštyn, tiek vertikaliai žemyn nukreipta Z ašimi.

Motoman produktai ir paslaugos yra plačiai paplitę Europoje, kur parduota ir aptarnaujama daugiau nei 15'000 vienetų produktų. Nuo pat įsikūrimo, 1976 metų, Motoman nuolat tobulėjo ir plėtėsi, kaip robotų gamintojas ir aptarnautojas. Dar prieš 1996 m., jie pristatė vienos kontrolės sistemos sprendimą robotams, kuris iki šiolei padėjo kompanijai išsiveržti į robotų industrijos aukštumas ir užimti aukštą vietą robotų industrijos rinkoje (Yaskawa Electric Corporation, 2010).

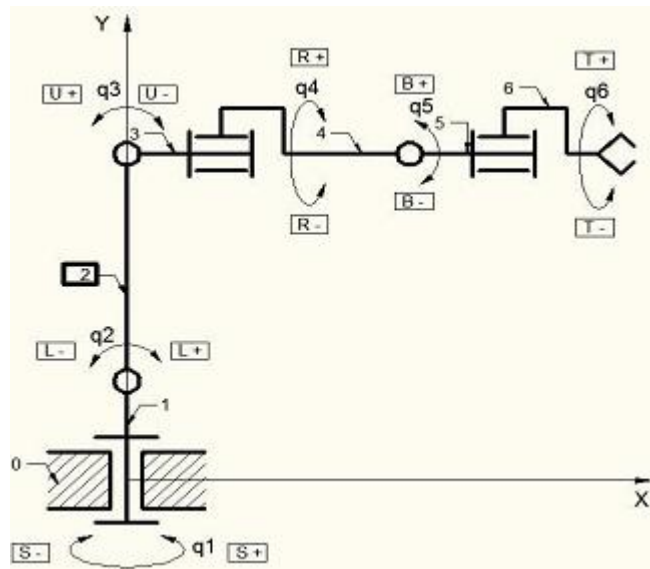


16 pav. Robotas „Motoman SSF2000“

Šių robotų pozicionavimo tikslumas siekia nuo $\pm 0,02$ mm iki $\pm 0,5$ mm. Nagrinėjamo roboto „Motoman SSF-2000“ tikslumas yra $\pm 0,08$ mm. Kiti parametrai:

- laisvės laipsnių skaičius: 6;
- maksimali apkrova: 6 kg;
- maksimalus roboto pasiekiamumas: 1378 mm;
- svoris: 130 kg;

„Motoman SSF-2000“ robotas turi 6-ias ašis: S, L, U, R, B ir T. Kartu sujungtos ašys sudaro ašių seriją. Roboto ranka turi labai daug panašumų į žmogaus ranką. Ji gali būti padalyta į dvi dalis pagal žmogaus ranką, t. y. rankos dalis ir plaštakos dalis. S, L ir U ašys kontroliuoja rankos dalį ir generuoja stambius judesius. Plaštakos dalis yra kontroliuojama R, B ir T ašimis ir yra naudojama tiksliais įrankio centrinio taško judesiams valdyti. Roboto kinematinė schema pavaizduota 17 pav.



17 pav. Roboto kinematinė schema

Transformacija tarp galinių taškų ant ašies yra priklausoma nuo sukimosi kampų ir linijinio pasislinkimo dydžio. Jungiantys kampai yra:

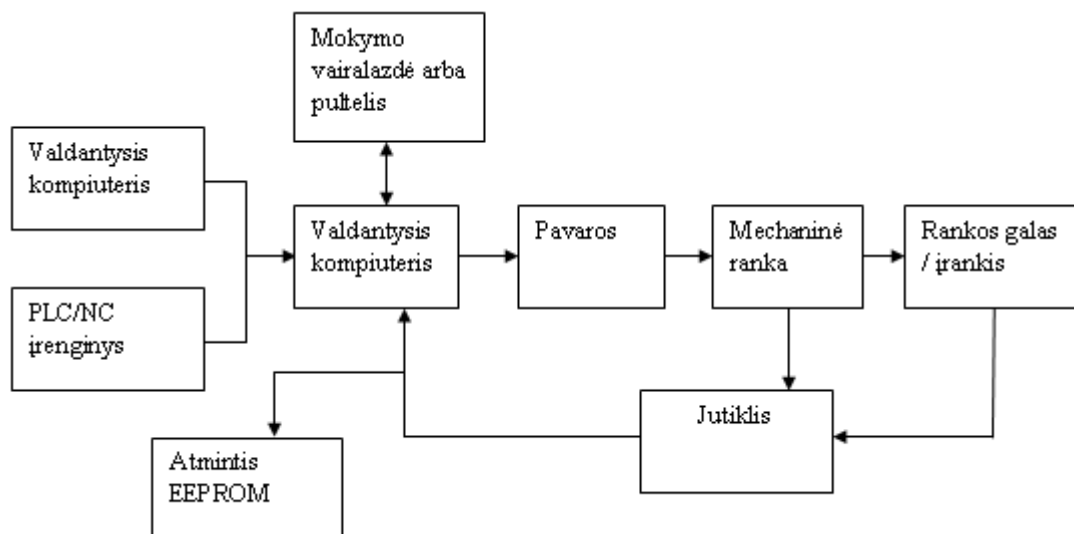
$$q = [q_S, q_L, q_U, q_R, q_B, q_T]^T \quad (2.1)$$

2.2.1 Roboto struktūra

Pagrindiniai robotų struktūros elementai:

- Mechaninė struktūra (pagrindas, kinematinės grandys ir sujungimai tarp jų). Pagrindinis reikalavimas mechaninei struktūrai yra jos standumas ir kinematinė grandžių masių toks paskirstymas, kad keičiantis apkrovai būtų pasiekiamas reikiamas judesio arba pozicionavimo tikslumas.
- Pavaros – varikliai, pneumatiniai ar hidrauliniai cilindrai, perduodantys judesio energiją sujungimams. Čia gali būti naudojami įvairūs reduktoriai arba perdavimo mechanizmai, stabdžiai ir kt.
- Valdantysis kompiuteris – šis kompiuteris yra tarpininkas tarp vartotojo ir roboto, valdo mechaninės struktūros sujungimų judesius.
- Rankos galas su griebtuvu arba įrankiu. Griebtuvus arba įrankio laikymo mechanizmus, reikalingus konkrečiam objektui manipuliuoti, dažniausiai projektuoja pats vartotojas.
- Mokymo vairalazdė. Vienas iš populiariausių robotų programavimo įtaisų. Tai nedidelis įtaisas, įtvirtintas roboto griebtuve. Vartotojas, paėmęs į ranką šią vairalazdę, vedžioja

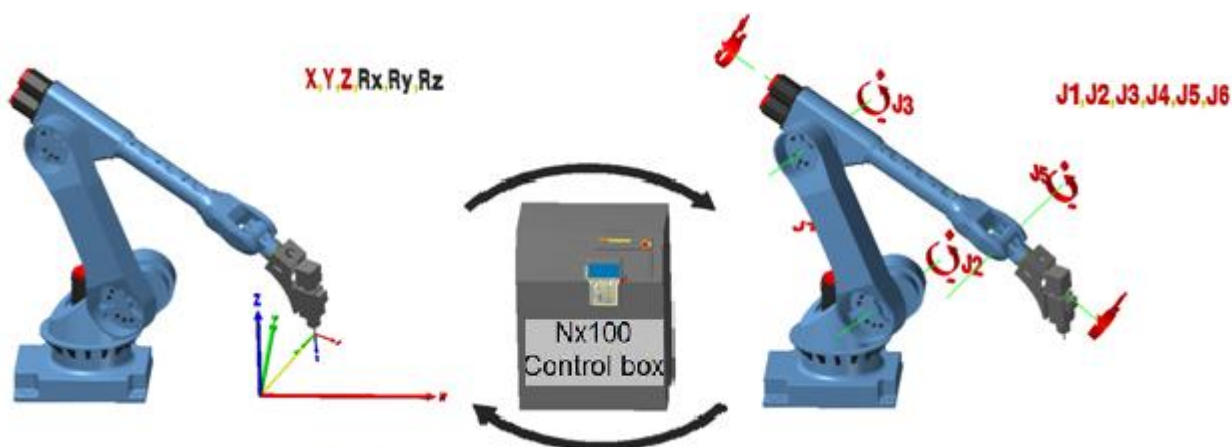
roboto ranką reikiama trajektorija į reikiamas padėtis. Paprastai yra galimybė atsiminti nurodytus erdvės taškus arba net visą trajektoriją. Gudresnės mokymo vairalazdės atlieka ir daugiau funkcijų (dalis jų programuojamos).



18 pav. Roboto struktūra

2.2.2 Roboto valdymas

Robotui „Motoman NX100“ valdyti yra naudojama INFORM II programinė įranga. Ši operacinė sistema yra įdiegta į NX100 valdymo bloką. NX100 kontrolės sistema robotą valdo siųsdama impulsus servovarikliams. NX100 gali kontroliuoti iki 36 ašių, t. y. keturis robotus ir dar papildomas ašis. Programos pajėgumai yra 60 000 veiksmų, 10 000 instrukcijų, 40 įėjimo ir 40 išėjimo signalų (gali būti pratęsta iki 1024/1024). Kontrolės sistemos kompiuterio architektūra sudaro galimybę „bendrauti“ su kitomis sistemomis per „bendravimo“ bloką.



19 pav. Sistemos turinys

Roboto greitis gali būti apibrėžiamas kaip jungčių greitis arba kaip įrankio centrinio taško (İCT) greitis. Jungčių greitis yra nustatomas 0–100 % ir skaitomas didžiausiu leidžiamu

greičiu visiems servovarikliams programos metu. Nustatytas įrankio greičio intervalas 0–9,000 cm/min. 9,000 cm/min yra didžiausias leidžiamas ICT greitis.

2.2.3 NX100 valdymo bloko režimai

Robotas gali būti įsivaizduojamas, kaip uždara dėžė, kuri yra manipuluojama kontrolės dėže NX100. Robotas turi tris režimus: TEACH, PLAY ir REMOTE. TEACH režimu galima įrašyti, modifikuoti ir ištrinti programas.

Kai valdymas nustatytas TEACH režime, robotas yra programuojamas NX100 valdikliu. PLAY režimas yra naudojamas paleisti suprogramuotai programai. REMOTE režimas yra monitoriaus režimas, kuris naudojamas kartu su simuliacijos programa, vadinama *MotoSim*. Yra galimybė paleisti programą nuo išorinio atminties kaupiklio per kitą operacinę sistemą, arba galima pasinaudoti *NxAddon* programos funkcijomis. Įkrauta programa gali būti paleidžiama kaip jau anksčiau sukurta programa.

2.2.4 Roboto „Motoman NX100“ valdiklis ir valdymas

Roboto „Motoman“ nešiojamajame NX100 valdikyje yra įdiegta Windows® CE programa su spalvotu, jutikliniu ekranu, didelio greičio procesoriumi ir atmintimi (60,000 žingsnių, 10,000 instrukcijų). Valdiklyje įmontuoti *Ethernet* ir roboto PC architektūra. NX100 yra apsaugotas slaptažodžiu su keturiais lygiais ir gali aptarnauti iki 100 vartotojų. Programa lengvai susitvarko su kompleksinėmis užduotimis su galimybe kontroliuoti iki keturių robotų (iki 36 ašių), ir I/O prietaisus kiekvieną atskirai programuojant. NX100 valdymo pultas pavaizduotas 20 pav.



20 pav. Roboto „Motoman SSF2000“ valdymo bloko NX100 nešiojamas valdymo pultas

NX100 buvo perprogramuotas nuo roboto valdymo į sustiprintos sistemos lygį – ląstelių / robotų valdymą. Technologinis atnaujinimas suteikė produkto mažesnę kainą sistemos lygyje, taip

pat sumažinant ir sistemos sudėtingumą ir padidinant jos patikimumą (Yaskawa Electric Corporation, 2010).

Avarinio sustojimo mygtukas yra pažymėtas raudona spalva ir yra valdymo pulto viršutiniame dešiniajame kampe.

2.3 Tyrimo tikslas

- Optimizuoti prototipų mechaninį apdirbimą panaudojant pramoninį robotą „Motoman SSF-2000“.
- Ištirti roboto riešo vibroaktyvumą, frezuojant įvairių medžiagų ruošinius trijų ašių sistemoje.
- Parinkti roboto įrankiui optimaliausią pjovimo pastūmą skirtingai medžiagai atsižvelgiant į pjovimo proceso sukeltų vibracijų įtaką paviršiaus šiurkštumui.

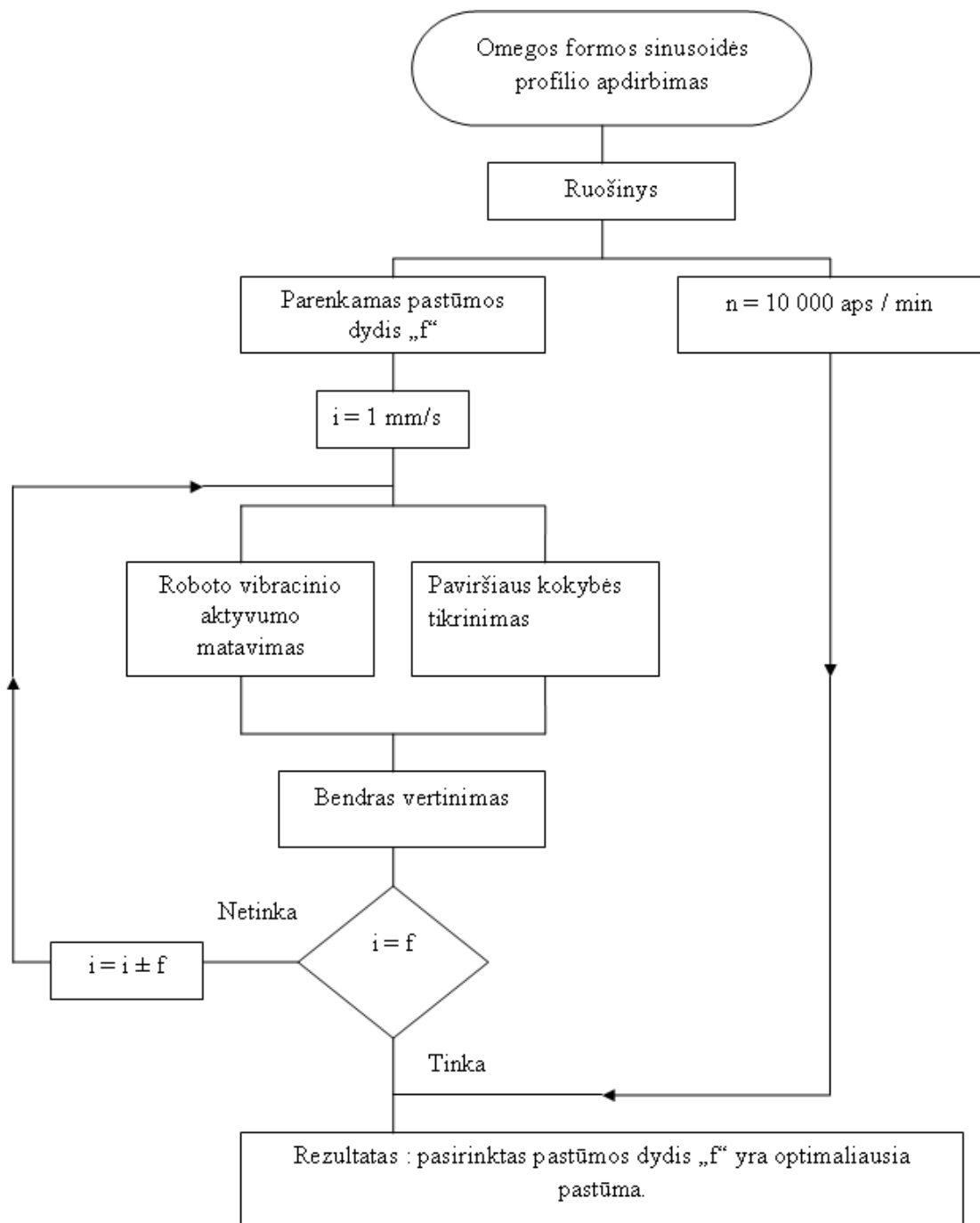
2.4 Tyrimo uždaviniai

- Susipažinti su robotizuotu 3D modeliavimu ir apdirbimu.
- Su programavimo pultu išmokti valdyti robotą.
- „Motoman SSF-2000“ pritaikyti 3D prototipų frezavimui: parinkti ruošinį, jį įtvirtinti roboto darbo zonoje; sukalibruoti apdirbimo įrankį.
- Su „PoverMill“ ir „IRBCAM“ programiniais paketais sukurti 3D omegos formos sinusoidės profilio modelio frezavimo programas; jas perkelti į robotą.
- Nustačius reikalingus parametrus, atlikti mechaninį apdirbimą naudojant robotą.
- Išmatuoti roboto vibracinį aktyvumą frezuojant įvairių medžiagų ruošinius trijų ašių sistemoje.
- Išmatuoti paviršiaus šiurkštumą kiekvienam apdirbtam bandiniui.
- Parinkti roboto įrankiui optimaliausias pjovimo pastūmas frezuojant skirtingas medžiagas trijų ašių sistemoje.
- Pateikti rezultatus ir suformuluoti išvadas.

3. TIRIAMOJI DALIS

3.1 Tyrimo metodika

Siekiant optimizuoti prototipų mechaninio apdirbimo parametrus panaudojant pramoninį robotą „Motoman SSF-2000“ atliekamas eksperimentas. Eksperimento idėja nustatyti roboto optimaliausią pastumą frezuojant skirtingo kietumo medžiagas. Sudarytas optimaliausios pastūros parinkimo algoritmas (21 pav.)



21 pav. Optimaliausios pastūros parinkimo algoritmas

Tyrimas atliekamas sekančiais etapais:

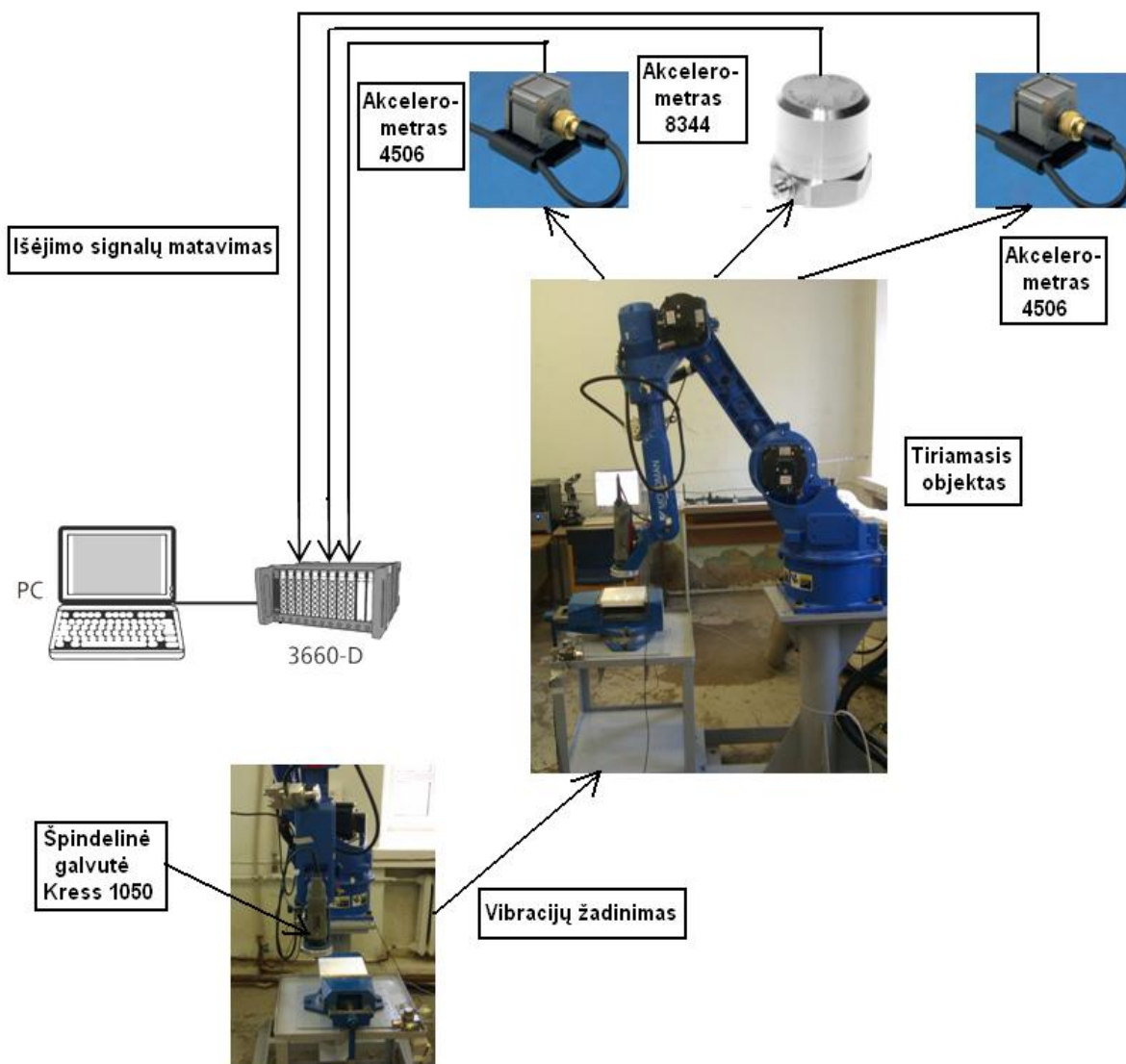
1. Panaudojant „SolidWork 2011“ paketą, sudaromas omegos formos sinusoidės profilio 3D erdvinis modelis.
2. Automatiniam apdirbimo programavimui pasirinktas „PowerMill“ programinis paketas. Jo esminis privalumas yra kompiuterinio programavimo greitis. Galimybė į jį tiesiogiai įvesti 3D erdvinį modelį ir iš jo gauti informaciją apie detalės parametrus, turint asociatyvią sąsają su pradiniu modeliu ir siekiant nustatyti pakeitimus, racionalizuoja gamybą. Pakartotinai įvedant modifikuotą 3D erdvinį modelį, įrankių judėjimo trajektorijos automatiškai koreguojamos pagal nustatytus skirtumus sumažinant kompiuterinio programavimo laiką.
3. CAM paketu sugeneruoti „NC“ kodai į robotui suprantamą kalbą paverčiami panaudojant „IRBCAM“ programinį paketą. Jis skirtas tik darbui su pačiu robotu. Jį naudojant galima keisti įvairius roboto parametrus: pozicionavimo padėtį, roboto ašių trajektoriją, apdirbimo kryptį ir tikslumą, taip pat galima peržiūrėti roboto darbo simuliaciją.
4. Frezavimui pasirenkamos skirtingo kietumo medžiagos: ekstrudinis polistirenas (minkštas), sausa mediena (kieta), polipropilenas (kietas)
5. Kalibruojamas roboto įrankis.
6. Frezuojant omegos formos sinusoidės profilį matuojamas tiriamos sistemos vibracinis aktyvumas trijų ašių (X, Y, Z) sistemoje.
7. Matuojamas sinusoidės profilio paviršiaus šiurkštumas naudojant dvigubą mikroskopą mod. „MHC-11“.

3.2 Eksperimentinė įranga

Virpesių parametrų matavimui naudojamos Danijos firmos "Brüel & Kjær" virpesių matavimo priemonės:

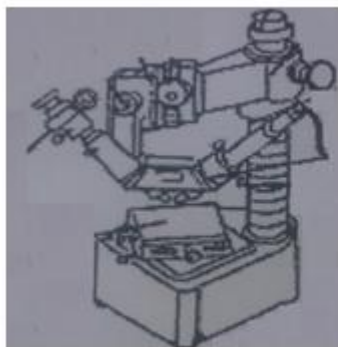
- kilnojama matavimo duomenų apdorojimo įranga mod. „3660-D“;
- kompiuteris DEEL;
- Seisminis akceleras mod. 8344;
- Du trijų ašių akceleras mod. 4506.

Omegos formos sinusoidės profilis frezuojamas naudojant „Kress 1050“ frezavimo galvutę. Tai 1050 vatų galingumo elektros variklis, kurio greitis reguliuojamas nuo 10 000 iki 29 000 sūkių per minutę, pritaikintas prie roboto riešo.

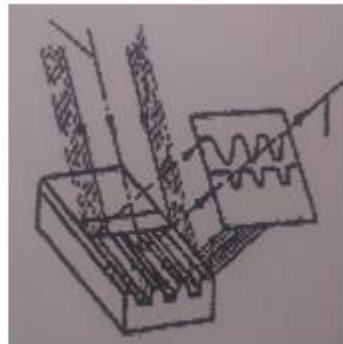


22 pav. Tyrimo stendo blokinė schema

Paviršiaus šiurkštumui matuoti panaudotas dvigubas mikroskopas „МИС-11“. Juo galima matuoti mikronelygumų aukštį R_z nuo 80,0 iki 0,8 μm . Prietaisas veikia šviesos pjūvio principu. Jo esmė tokia: Lygiagretusis spindulių pluoštas pro siaurą plyšį 45° kampą apšviečia tiriamąjį paviršių. Nuo paviršiaus nelygumų atspindėjusi šviesos juostelė išsikreivina, o išsikreivinimo aukštis yra proporcingas mikronelygumų aukščiui.



a) mikroskopo bendras vaizdas

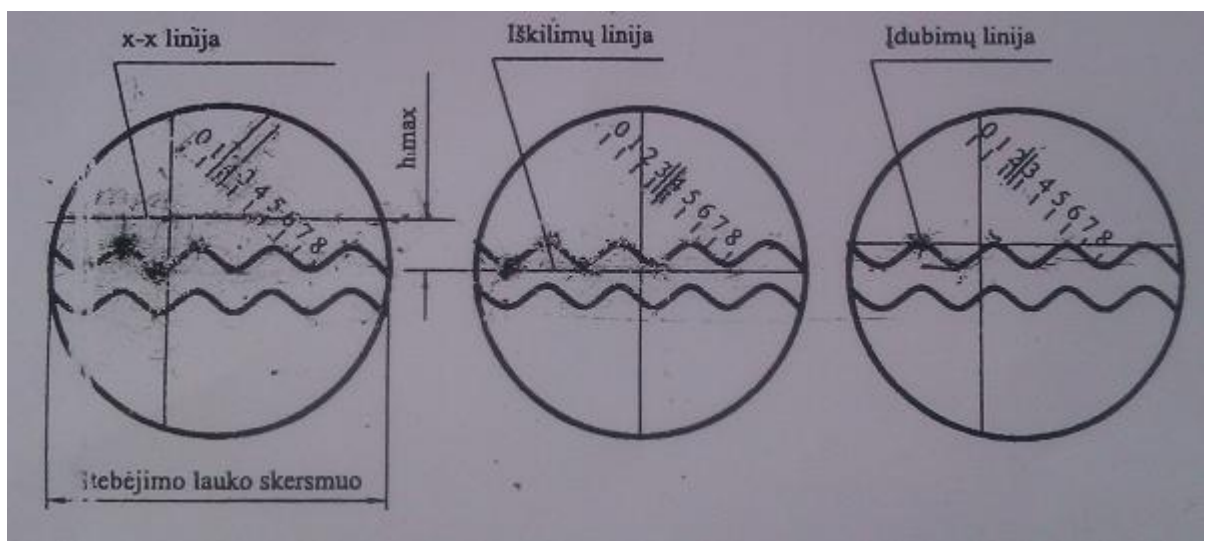


b) šviesos pjūvio schema



c) optinė schema

23 pav. Dvigubas mikroskopas „МИС-11“



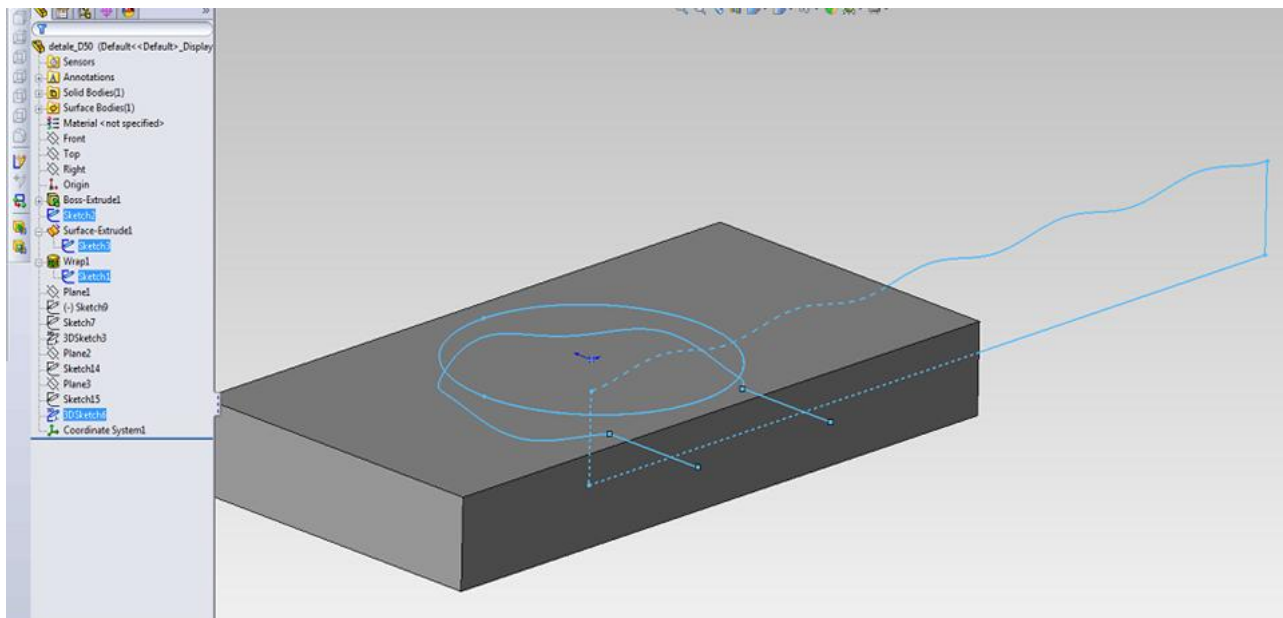
24 pav. Vaizdas mikroskopo okuliare matavimo metu: Iškilimų linija - $h_{\max}$, Įdubimų linija - $h_{\min}$

1 lentelė. Objektyvo charakteristika

Paviršiaus mikronelygumų aukštis $R_z, \mu\text{m}$	Objektyvo židinio nuotolis, mm	Objektyvo didinimas x	Stebėjimo lauko skersmuo, mm	Koeficientas E
80	$F = 25,02$	$5,9^x$	1,8	0,170

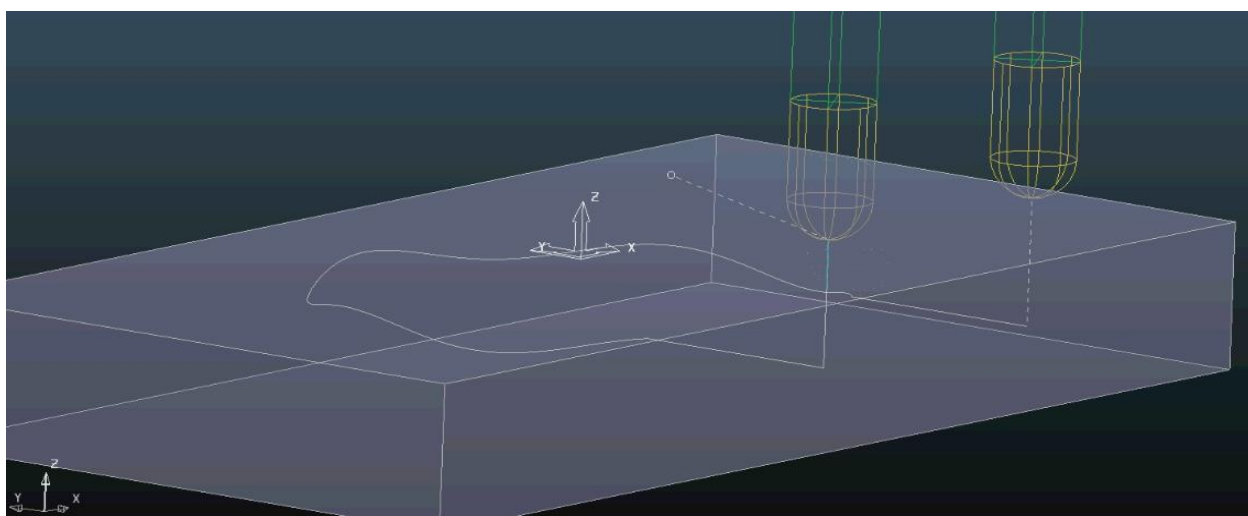
3.3 Tyrimo proceso aprašymas

Pasinaudojus „SolidWorks“ paketu, sudarytas omegos formos sinusoidės profilis, kurį reikės frezuoti (25 pav.).

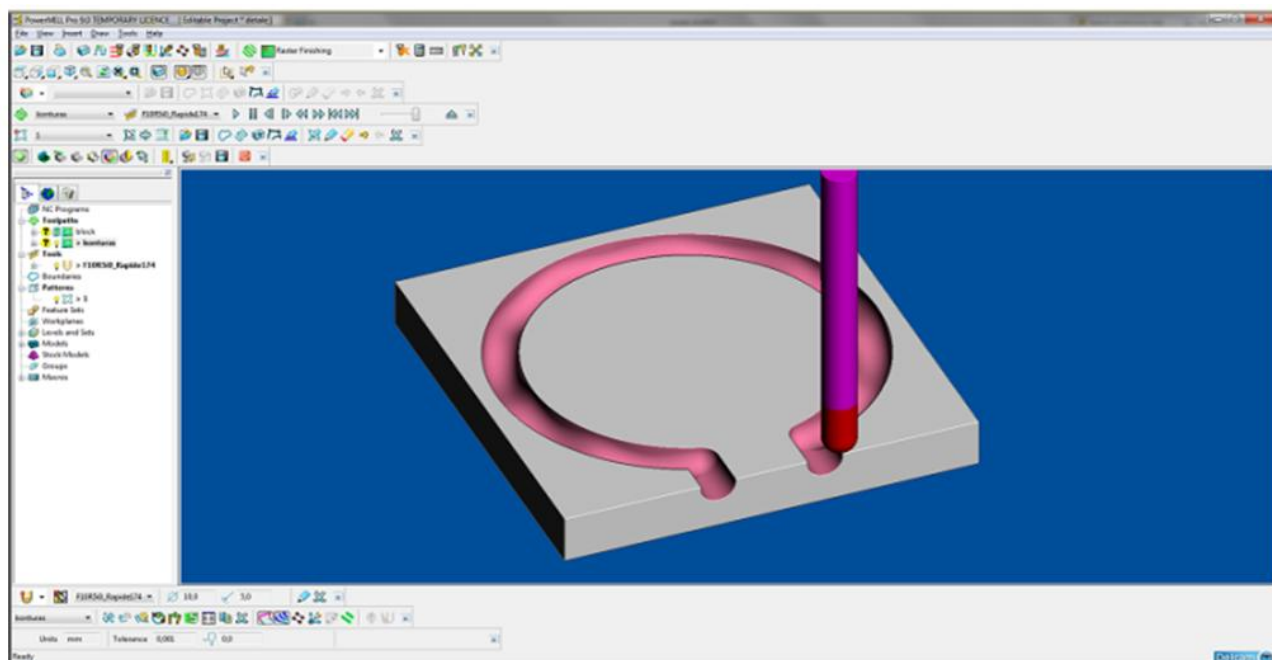


25 pav. Omegos formos sinusoidės profilis sudarytas „SolidWorks“ programoje

3D omegos formos sinusoidės profilio erdvinis modelis iš „SolidWorks“ programos perkeliamas į „PowerMill“ paketą, kurio pagalba sudaryta „NC“ kodų programa omegos formos sinusoidės profiliui apdirbti. Omegos formos sinusoidės profilio įrankio apdirbimo trajektorijos sudarymas pateiktas 26 pav.



26 pav. Omegos formos sinusoidės profilio įrankio apdirbimo trajektorijos sudarymas



27 pav. Apdirbtas omegos formos sinusoidės profilis „PowerMill“ sistemoje

Pagal sudarytą profilį naudojant „PowerMill“ paketą, sugeneruoti „NC“ kodai. Sugeneravus „NC“ kodus apdirbimo programa perkeliama į „IRBCAM“ programą ir „NC“ kodai paverčiami į robotui „Motoman SSF2000“ suprantamą „Inform III“ kalbą (28 pav).

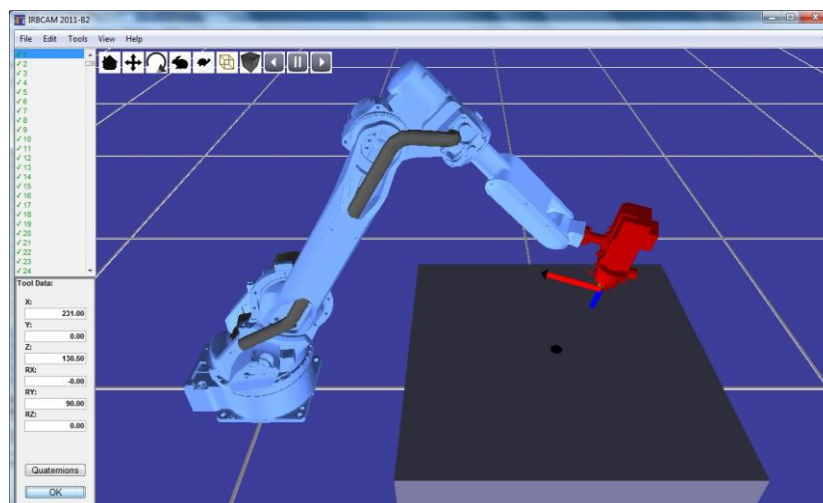


```
%
G90
T1008040
S1500M3
G0X0Y-10.Z10.M8
X-15.451Y-40.
Z5.
G1Z-3.018F500.
Y-19.654F1000.
X-15.659Y-19.488Z-3.029
X-15.836Y-19.344Z-3.041
.....
.....
.....
.....
X15.841Y-19.342Z-3.042
X15.643Y-19.501Z-3.028
X15.451Y-19.654Z-3.018
Y-40.
G0Z10.
M9
M2
```

```
/JOB
//NAME D50-0001
//POS
//NPOS 224,0,0,0,0,0
//USER 1
//TOOL 7
//POSTYPE USER
//RECTAN
//RCONF 1,0,0,0,1,0,0,0
C0000=0.000,-10.000,10.000,0.000,-180.000,180.000
C0001=-15.450,-40.000,10.000,0.000,-180.000,180.000
C0002=-15.450,-40.000,5.000,0.000,-180.000,180.000
.....
.....
C0222=15.450,-40.000,-3.020,0.000,-180.000,180.000
C0223=15.450,-40.000,10.000,0.000,-180.000,180.000
//INST
//DATE 2012/04/11 16:57
//ATTR SC,RW,RJ
//FRAME USER 1
//GROUP1 RB1
NOP
CLEAR STACK
MOVJ C0000 VJ=5
MOVL C0001 V=10.00
.....
.....
MOVL C0222 V=1.00
MOVL C0223 V=10.00
END
```

28 pav. „NC“ kodų pavertimas į „Inform III“ kalbą programos fragmentas

Norint patikrinti, ar programa sudaryta teisingai, naudojama simuliacija (29 pav). Simuliacijos metu įsitikiname, kad programa yra teisingai sudaryta ir nėra nepasiekiamų vietų. Roboto įrankio darbo trajektorija yra teisinga.



29 pav. Simuliacija IRBCAM programoje

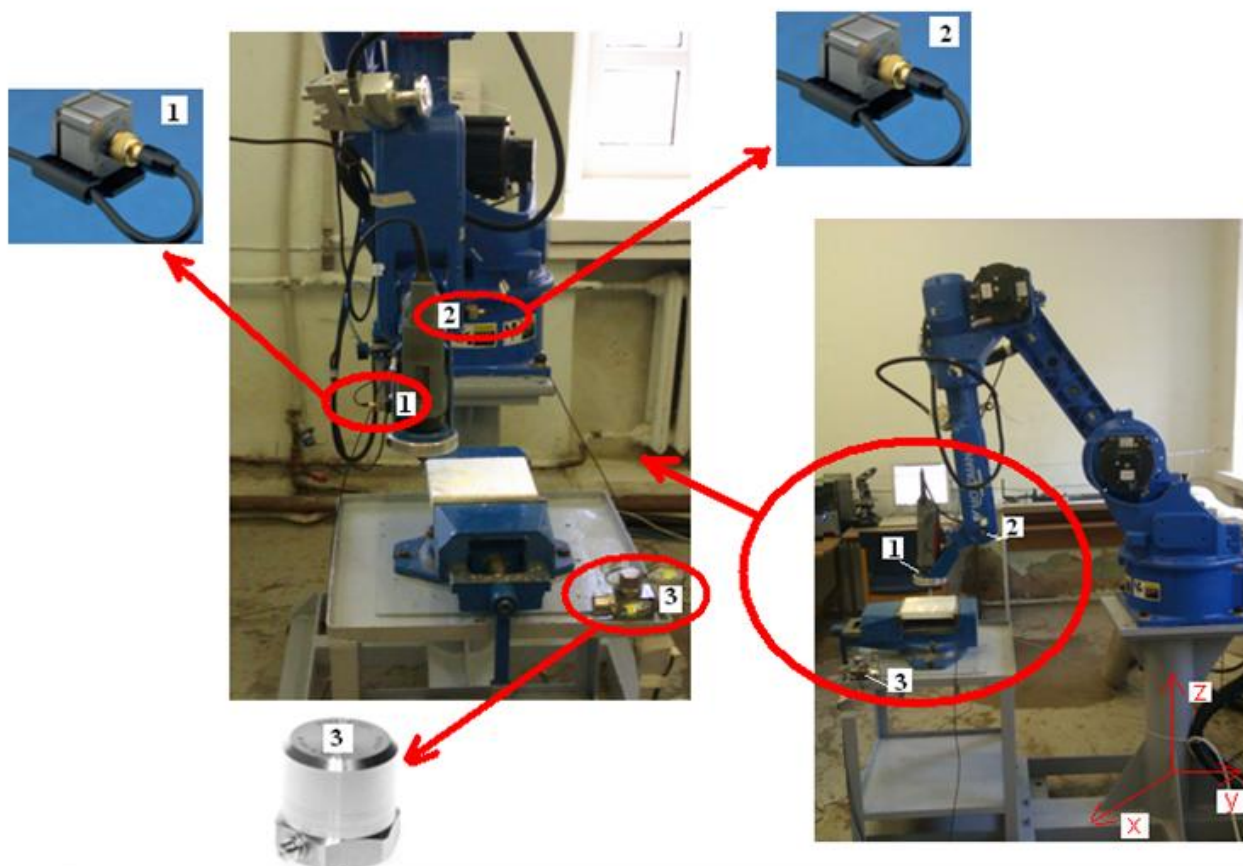
Sekančiame etape, robotas „Motoman SSF-2000“ paruošiamas apdirbimui, t.y. sukalibruojamas įrankis (30 pav.). Kad užtikrinti apdirbimo metu roboto tikslūs tiesinius ir sukamuosius judesius, roboto įrankis kalibruojamas nuo atskaitinio taško iš keturių pozicijų 30° kampu. Taip pat nustatome įrankio padėtis ruošinio atžvilgiu. Informacija apie įrankio padėtį automatiškai užregistruojama roboto valdymo bloke.



30 pav. Roboto įrankio kalibravimas

Sukalibravus įrankį, virpesių parametrų matavimui prie tiriamos sistemos tvirtinami akcelerometrai (31 pav.).

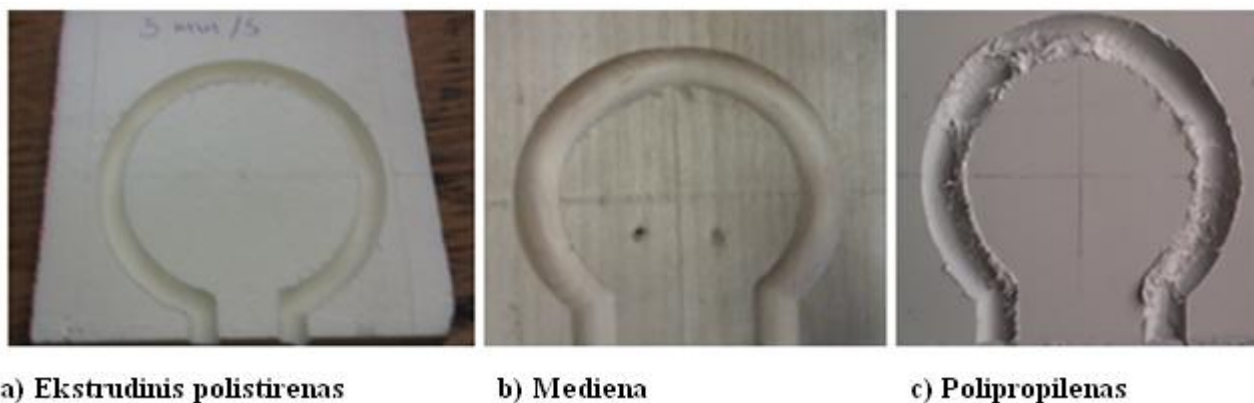
Akcelerometrai tvirtinami prie špindelinės galvutės (1 taškas), roboto riešo (2 taškas) ir ant sistemos stovo (3 taškas).



31 pav. Virpesių parametrų matavimo priemonių tvirtinimo taškai

Paskutiniame etape, pasinaudojus „Total Comander“ programa, „Inform III“ kodai perkeliama į „NX 100“ roboto valdymo bloką.

Programavimo pultu nustačius reikiamus parametrus atliekamas mechaninis apdirbimas ir gaunamas užduotas profilis apdirbant skirtingas medžiagas (32 pav.). Prototipai apdirbami esant įvairioms pastūmoms (3 mm/s, 5mm/s, 10 mm/s) ir vienodu sukimosi greičiu (10 000 aps/min).



32 pav. Apdirbti iš skirtingų medžiagų omegos formos sinusoidės profiliai

Gauti virpesių matavimo signalai apdorojami kompiuteriu, panaudojant programinius paketus Origin 8 ir Pulse. Apskaičiuojami signalų spektrai, skirstiniai ir statistiniai parametrai:

Aritmetinis vidurkis:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

Standartinis nuokrypis:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

Sklaida:

$$X_{sklaida} = X_{\max} - X_{\min}, \quad (4.3)$$

čia n – matavimo rezultatų skaičius, x_i – i -asis matavimo rezultatas.

Išmatuojamas ir apskaičiuojamas kiekvieno bandinio paviršiaus šiurkštumas naudojant dvigubą mikroskopą:

Profilio mikronelygumų aukštis pagal 5 taškus:

$$R_z = \frac{E}{2} \cdot \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 h_{i\max} - \sum_{i=1}^5 h_{i\min} \right) \quad (4.4)$$

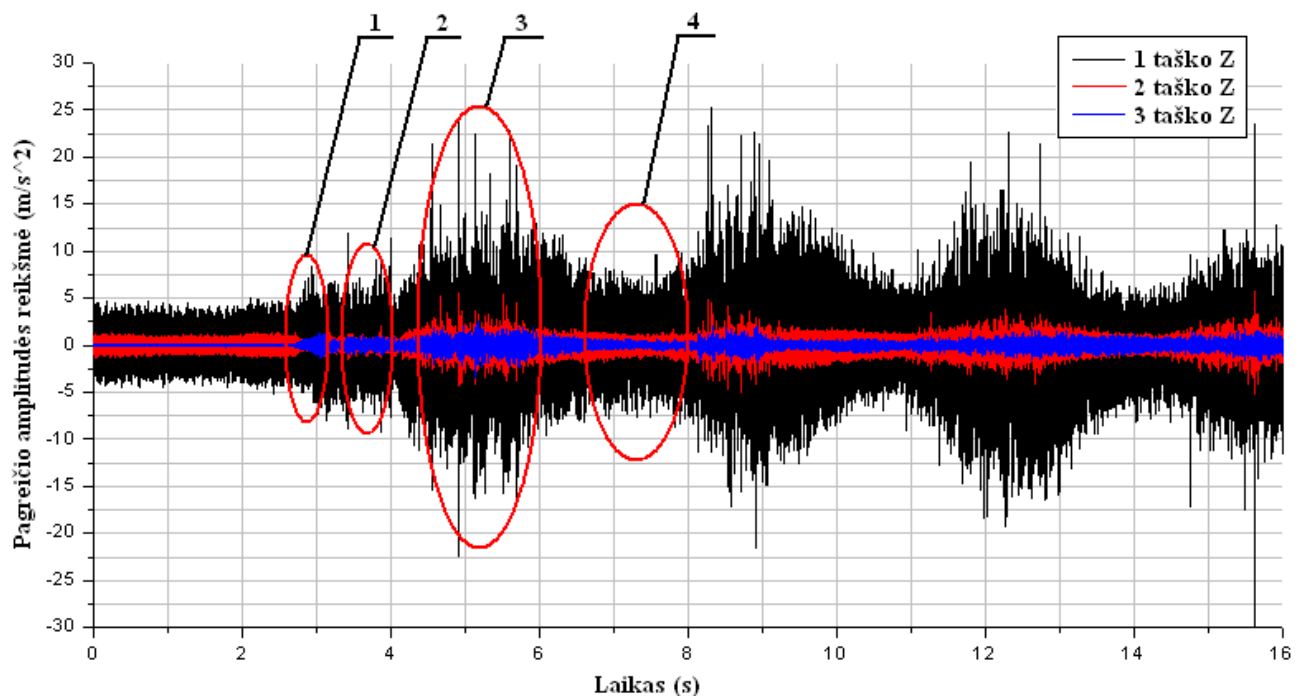
Čia $h_{i\max}$ – įdubimų aukštis, $h_{i\min}$ – iškilimų aukštis.

Remiantis roboto riešo vibraciniu aktyvumo ir bandinių paviršiaus šiurkštumo rezultatais parenkamos optimaliausios pastūmos esant sukimosi greičiui 10 000 aps/min.

4. EKSPERIMENTINIŲ MATAVIMO DUOMENŲ ANALIZĖ

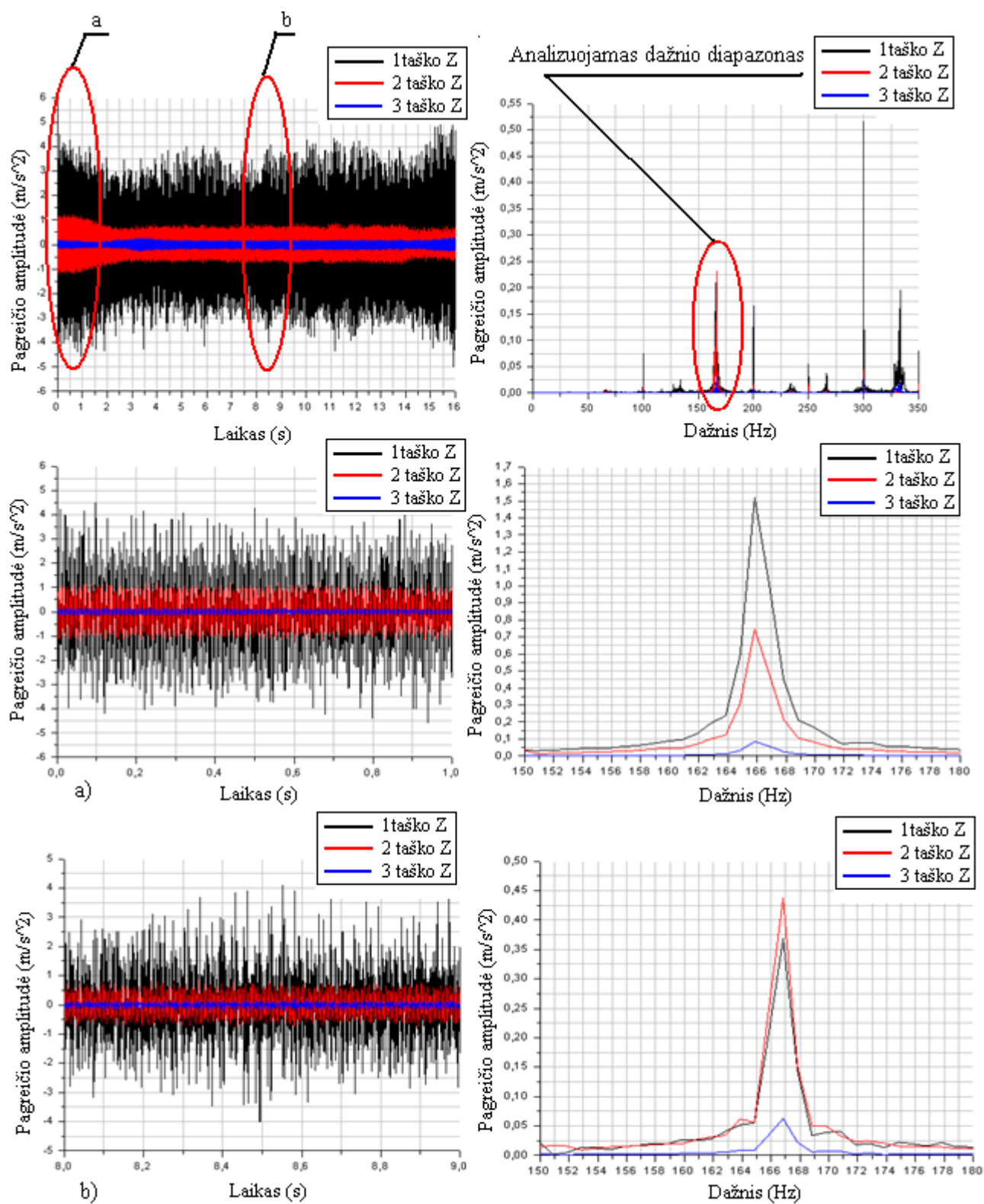
4.1 Virpesių parametrų matavimo duomenų analizė

Atsižvelgiant į roboto sukeltus virpesius pjaunant įvairias medžiagas esant įvairioms pastūmoms, tiriamos sistemos sukelti virpesiai skirtinguose taškuose matuojami keturiuose vietose (matuojamas laiko intervalas 16 s). Pirmiausia matuojamas vibracijų lygis, kai roboto įrankis įeina į medžiagą (1 intervalas). Po to matuojami virpesiai, kada roboto įrankis frezuoja tiesiai (2 intervalas). Pradėjus roboto įrankiui frezuoti omegos profilio sinusoidę, matuojami tiriamos sistemos virpesiai frezuojant omegos profilio sinusoidės įdubimą (3 intervalas) ir iškilimą (4 intervalas).

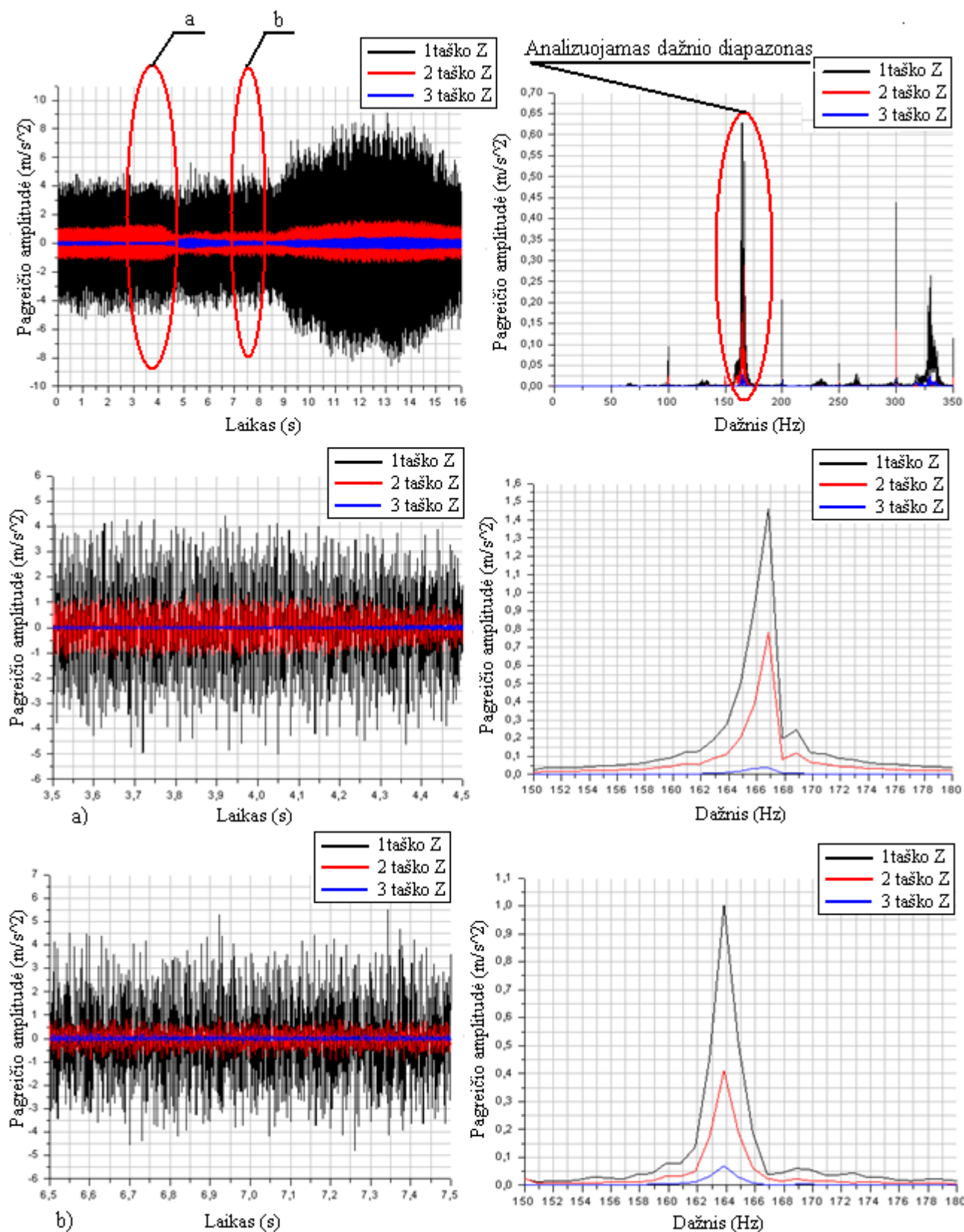


33 pav. Analizuojami roboto sukeltųjų vibracijų intervalai

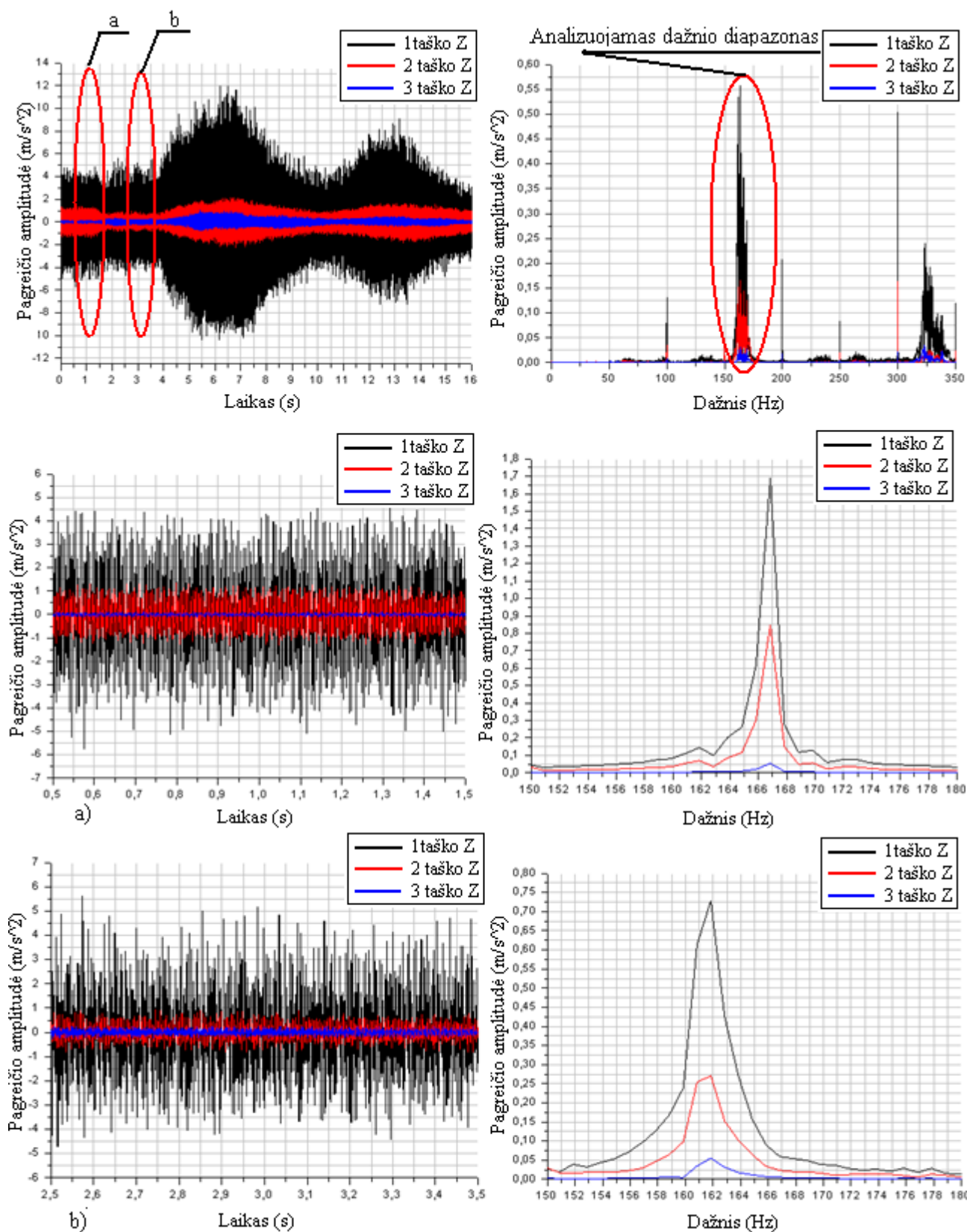
Roboto įrankiui įeinant į medieną (1 intervalas) ir pradedant frezuoti tiesiai (2 intervalas) su tam tikra užduota pastūma (1 mm/s; 3 mm/s; 5 mm/s; 10 mm/s), vertinant 3–jų taškų rodmenis, pagreičio amplitudės reikšmės pagal vertikalią kryptį „Z“, pavaizduotos grafikuose (34–37 pav.). Atitinkamai, roboto įrankiui įeinant ir pradedant frezuoti tiesiai polipropileną ir ekstrudinį polistireną, pagreičio amplitudės reikšmės pagal vertikalią kryptį „Z“, pavaizduotos 2–ame priede.



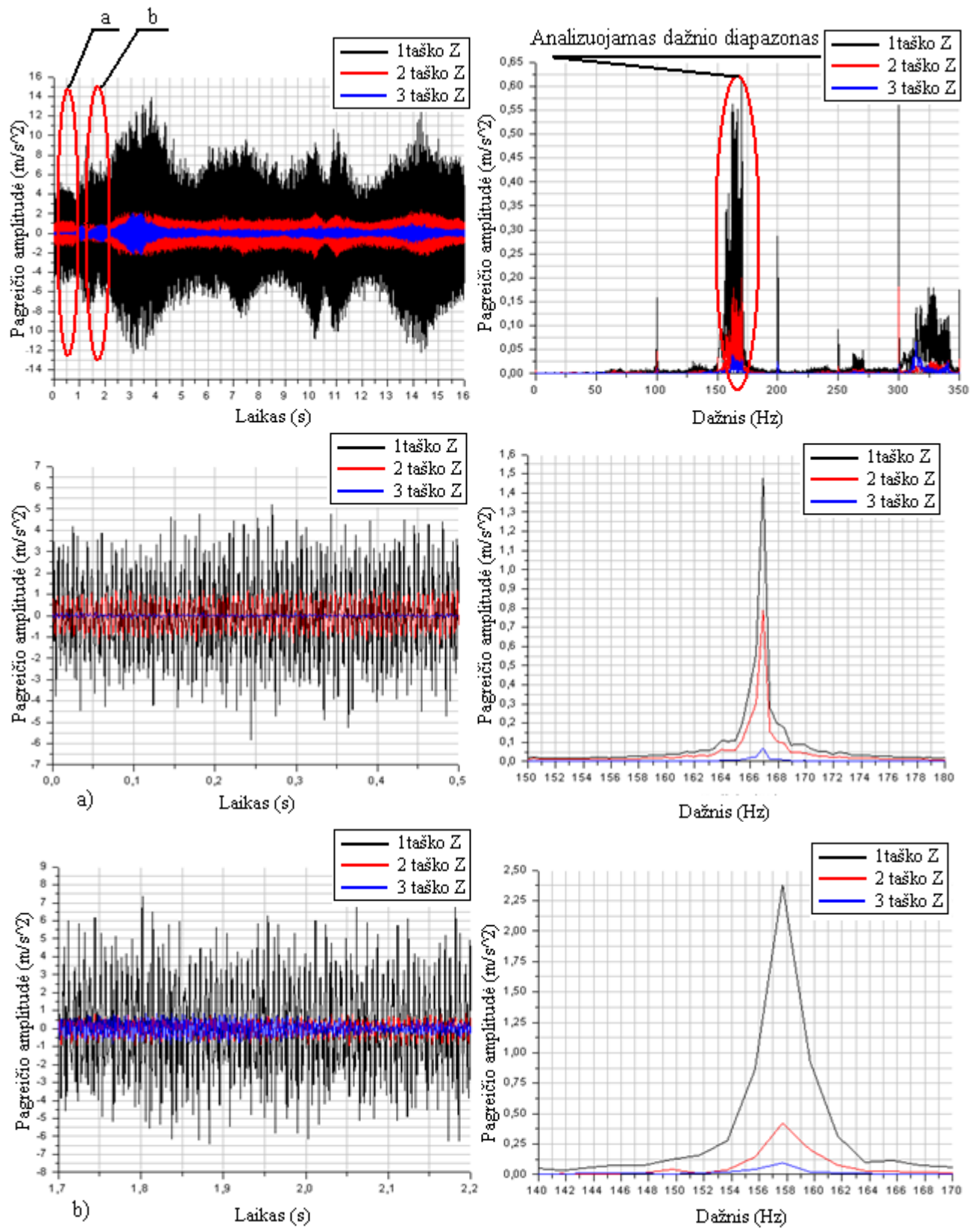
34 pav. Roboto įrankiui įeinant į medieną ir pradedant frezuoti tiesiai su 1 mm/s pastūma: a) – 1 intervalas; b) – 2 intervalas



35 pav. Roboto įrankiui įeinant į medieną ir pradėdant frezuoti tiesiai su 3 mm/s pastūma: a) – 1 intervalas;
b) – 2 intervalas



36 pav. Roboto įrankiui įeinant į medieną ir pradedant frezuoti tiesiai su 5 mm/s pastūma: a) – 1 intervalas; b) – 2 intervalas



37 pav. Roboto įrankiui įeinant į medieną ir pradedant frezuoti tiesiai su 10 mm/s pastūma: a) – 1 intervalas; b) – 2 intervalas

Analizuojant 150–180 Hz dažnių diapazoną (35–37 pav.) galima matyti, kad tiriamai sistemai būdingas savasis dažnis, kuriam esant sistema turi reikšmingas amplitudes kurios įtakoja frezuojamo profilio paviršiaus šiurkštumą . Frezos apsisukimų skaičių padalijus iš 60 sekundžių, apskaičiuojamas sistemos savasis dažnis: $10\,000/60 = 166,66$ Hz.

Eksperimento metu, analogiškai tiriami sistemos sukeliama virpesiai, roboto įrankiui įeinant ir pradedant frezuoti tiesiai su tam tikra užduota pastūma polipropileną, ekstrudini polistireną. Reikšmingos pagreičio amplitudės, kurios įtakoja frezuojamo profilio paviršiaus šiurkštumą su tam tikra užduota pastūma pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Reikšmingos pagreičio amplitudės, kurios įtakoja frezuojamo profilio paviršiaus šiurkštumą 1–2 intervaluose

Medžiagos	Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	1 intervalas		2 intervalas	
			Pagreič. amplit. reikšmė (m/s^2)	Dažnis (Hz)	Pagreič. amplit. reikšmė (m/s^2)	Dažnis (Hz)
Mediena	1	1	1,52	165,85	0,44	166,83
		2	0,75		0,37	
		3	0,089		0,064	
	3	1	1,47	166,83	1,00	163,87
		2	0,78		0,41	
		3	0,042		0,075	
	5	1	1,68	166,78	0,73	161,83
		2	0,84		0,27	
		3	0,053		0,054	
	10	1	1,44	167,68	2,38	157,68
		2	0,65		0,43	
		3	0,042		0,098	
Polipropilenas	1	1	2,21	165,91	5,26	165,98
		2	0,57		0,98	
		3	0,074		0,065	
	3	1	1,99	166,83	1,14	161,76
		2	0,99		0,45	
		3	0,074		0,074	
	5	1	1,80	166,83	1,09	163,81
		2	0,84		0,28	
		3	0,054		0,059	
	10	1	1,49	165,64	1,86	153,72
		2	0,67		0,30	
		3	0,051		0,103	
Ekstrudinis polistirenas	1	1	1,59	166,41	1,44	166,90
		2	0,85		0,83	
		3	0,088		0,078	
	3	1	2,02	166,41	1,89	166,90
		2	1,03		0,84	
		3	0,087		0,12	
	5	1	2,02	166,90	1,31	165,98
		2	0,91		0,55	
		3	0,081		0,054	
	10	1	1,54	166,90	1,09	165,49
		2	0,77		0,52	
		3	0,078		0,054	

Vertinant 3–jų taškų rodmenis (1 lentelėje) pagal vertikalią kryptį „Z“, didžiausios dažninės pagreičio amplitudinės reikšmės įtakojančios paviršiaus šiurkštumą yra prie špindelinės galvutės (1 taškas).

Frezuojant profilį iš medienos, tiriamos sistemos 1–ame intervale (kai roboto įrankis įeina į medžiagą) mažiausias dažnis yra 165,85 Hz apdirbant 1 mm/s pastūma; didžiausias 167,68 Hz – 10mm/s. 2–ame intervale (roboto įrankis frezuoja tiesiai) mažiausias dažnis yra 157,68 Hz frezuojant 10 mm/s pastūma, o didžiausias 166,83 Hz – 1 mm/s.

Apdirbant profilį iš polipropileno, 1–ame intervale mažiausias dažnis yra frezuojant 1 ir 10 mm/s pastūma, atitinkamai 165,91 ir 165,64 Hz; apdirbant 3 ir 5 mm/s pastūma tiriamos sistemos dažnis yra 166,83 Hz. 2–ame intervale mažiausias dažnis yra 153,72 Hz frezuojant 10 mm/s pastūma, o didžiausias 163,81 Hz – 5 mm/s.

Frezuojant profilį iš ekstrudinio polistireno 1 ir 3 mm/s pastūma, 1–ame intervale tiriamos sistemos dažnis yra 166,41 Hz; frezuojant 5 ir 10 mm/s pastūma dažnis yra 166,90 Hz. 2–ame intervale mažiausias dažnis yra frezuojant 10 mm/s pastūma; didžiausias – 166,90 Hz frezuojant 1 ir 3 mm/s pastūma.

Apskaičiuoti statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui įeinant ir pradedant frezuoti tiesiai skirtingą medžiagą, pateikti 3–8 lentelėse.

3 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui įeinant į medieną su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	7,92E-04	1,86475	-4,59148	4,5084	9,09988
	2	5,81E-04	0,7222	-1,21861	1,22041	2,43902
	3	-9,47E-06	0,08551	-0,17194	0,17967	0,35161
3	1	0,0016	2,02339	-4,98508	4,4386	9,42368
	2	-0,0053	0,68473	-1,26798	1,36216	2,63014
	3	-1,65E-04	0,05482	-0,15238	0,17378	0,32615
5	1	-4,41E-04	2,21824	-5,74244	4,83563	10,5780
	2	-0,00564	0,67527	-1,36949	1,36088	2,73037
	3	-2,33E-05	0,05272	-0,12457	0,12521	0,24978
10	1	0,00694	2,26408	-5,84648	5,22235	11,0688
	2	0,00239	0,71079	-1,33462	1,26355	2,59817
	3	7,74E-05	0,0583	-0,15278	0,18576	0,33854

4 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui pradedant frezuoti tiesiai medieną su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	6,07E-05	1,42957	-4,01634	4,10289	8,11923
	2	2,04E-04	0,40789	-0,7568	0,83712	1,59392
	3	-1,05E-04	0,0832	-0,23328	0,18256	0,41584
3	1	1,51E-04	1,95619	-4,80478	5,51587	10,3206
	2	-0,00472	0,40086	-0,9288	0,94147	1,87027
	3	-2,33E-04	0,08095	-0,22051	0,25593	0,47644
5	1	-9,82E-04	2,00517	-4,70936	5,62445	10,3338
	2	-0,00248	0,379	-0,82923	0,92685	1,75608
	3	9,75E-05	0,12146	-0,27843	0,26797	0,5464
10	1	7,00E-04	2,93193	-6,42585	7,4089	13,8347
	2	-0,00162	0,44228	-0,97381	0,87257	1,84638
	3	1,56E-04	0,43284	-0,91135	0,89843	1,80977

5 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui įeinant į polipropileną su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	-0,00359	3,95127	-11,9827	10,9197	22,9024
	2	0,0018	0,78769	-1,54054	2,10009	3,64063
	3	-1,14E-04	0,17058	-0,54316	0,50403	1,04719
3	1	-0,00266	2,12795	-5,24947	4,85174	10,1012
	2	-0,00255	0,75398	-1,26653	1,35991	2,62644
	3	1,05E-04	0,06342	-0,14489	0,12012	0,26501
5	1	9,24E-04	2,18725	-5,07046	5,09422	10,1646
	2	-0,00218	0,66814	-1,16785	1,23221	2,40006
	3	-1,78E-04	0,05806	-0,20951	0,23561	0,44512
10	1	0,00949	2,29548	-5,18857	5,1783	10,3668
	2	0,01244	0,7447	-1,28536	1,3791	2,66446
	3	2,38E-04	0,05906	-0,14438	0,13485	0,27923

6 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui pradedant frezuoti tiesiai polipropileną su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	-3,85E-04	4,40026	-9,04857	11,1004	20,1489
	2	2,70E-04	0,78435	-1,59196	1,86777	3,45973
	3	1,06E-06	0,11574	-0,43985	0,32935	0,7692
3	1	-0,00126	2,3365	-7,29126	6,96393	14,2551
	2	0,00467	0,4659	-1,25073	1,4355	2,68623
	3	-9,75E-06	0,18001	-0,55429	0,61501	1,1693
5	1	-0,00399	2,63422	-7,60342	7,44918	15,0526
	2	0,0011	0,51911	-2,29701	2,20923	4,50624
	3	-2,28E-04	0,23489	-0,8416	0,90673	1,74833
10	1	0,00228	3,31508	-8,88094	11,9052	20,7861
	2	0,0018	0,52692	-1,48188	1,42503	2,90691
	3	-6,25E-04	0,47989	-1,37566	1,38368	2,75934

7 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui įeinant į ekstrudinį polistireną su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	-0,00251	1,87896	-4,61058	4,42476	9,03534
	2	-0,00348	0,80834	-1,36313	1,438	2,80113
	3	1,30E-04	0,08977	-0,17096	0,16825	0,33921
3	1	0,00336	1,92243	-4,65253	4,57294	9,22547
	2	9,72E-05	0,75937	-1,41287	1,36711	2,77998
	3	-6,02E-05	0,06962	-0,16542	0,15087	0,31629
5	1	0,00141	2,10703	-5,03101	4,93176	9,96277
	2	-0,00281	0,73941	-1,4291	1,35226	2,78136
	3	-1,28E-04	0,07962	-0,17979	0,19032	0,37011
10	1	7,73E-04	2,04109	-4,75836	4,65864	9,417
	2	-6,72E-04	0,74951	-1,38516	1,37943	2,76459
	3	-9,16E-05	0,07773	-0,19376	0,18487	0,37863

8 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį roboto įrankiui pradedant frezuoti tiesiai ekstrudinį polistireną su tam tikra užduota pastūma

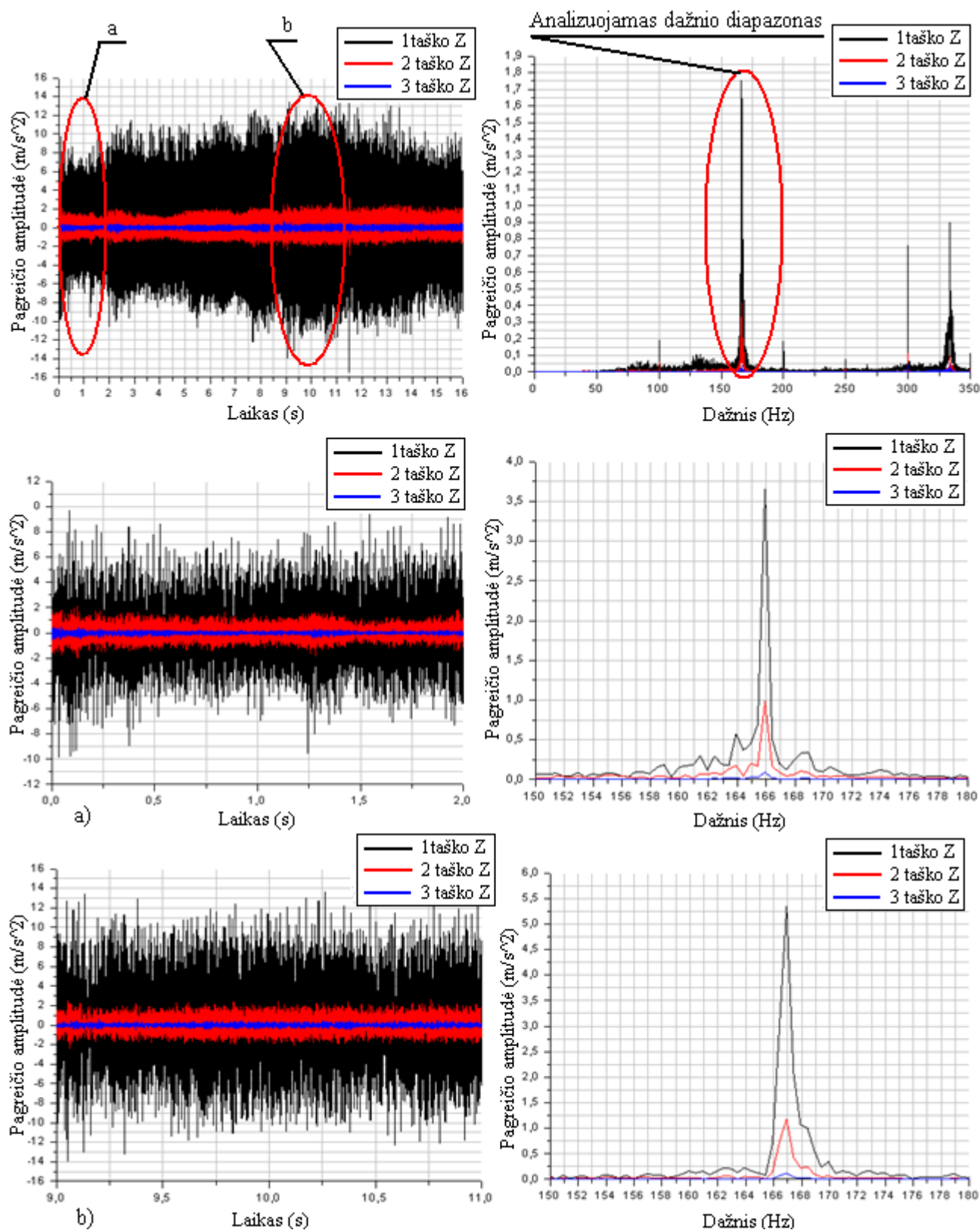
Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	-7,37E-04	1,71035	-4,5414	4,23187	8,77327
	2	0,00187	0,75785	-1,22075	1,24889	2,46964
	3	-4,85E-06	0,06712	-0,12825	0,1306	0,25885
3	1	-0,0129	1,86805	-4,73036	4,611	9,34136
	2	0,00169	0,67294	-1,19554	1,22366	2,4192
	3	-8,09E-05	0,09739	-0,1971	0,18491	0,38201
5	1	-0,00152	1,94489	-4,75697	4,51644	9,27341
	2	-1,22E-04	0,59697	-1,1339	1,1602	2,2941
	3	9,20E-05	0,0602	-0,14885	0,14707	0,29592
10	1	-2,42E-04	1,89243	-4,86325	4,31255	9,1758
	2	5,49E-04	0,64504	-1,20086	1,13054	2,3314
	3	-3,00E-05	0,06061	-0,14984	0,14173	0,29157

Iš atliktų eksperimentų matosi, kad didžiausias vibracijas tiriamoji sistema sukelia pradedant roboto įrankiui frezuoti omegos profilio sinusoidę. Atsižvelgiant į tai, kad beveik visą apdirbamą omegos profilį sudaro sinusoidė, tiriamos sistemos sukeltos vibracijos sinusoidės įdubime (3 intervalas) ir iškilime (4 intervalas).



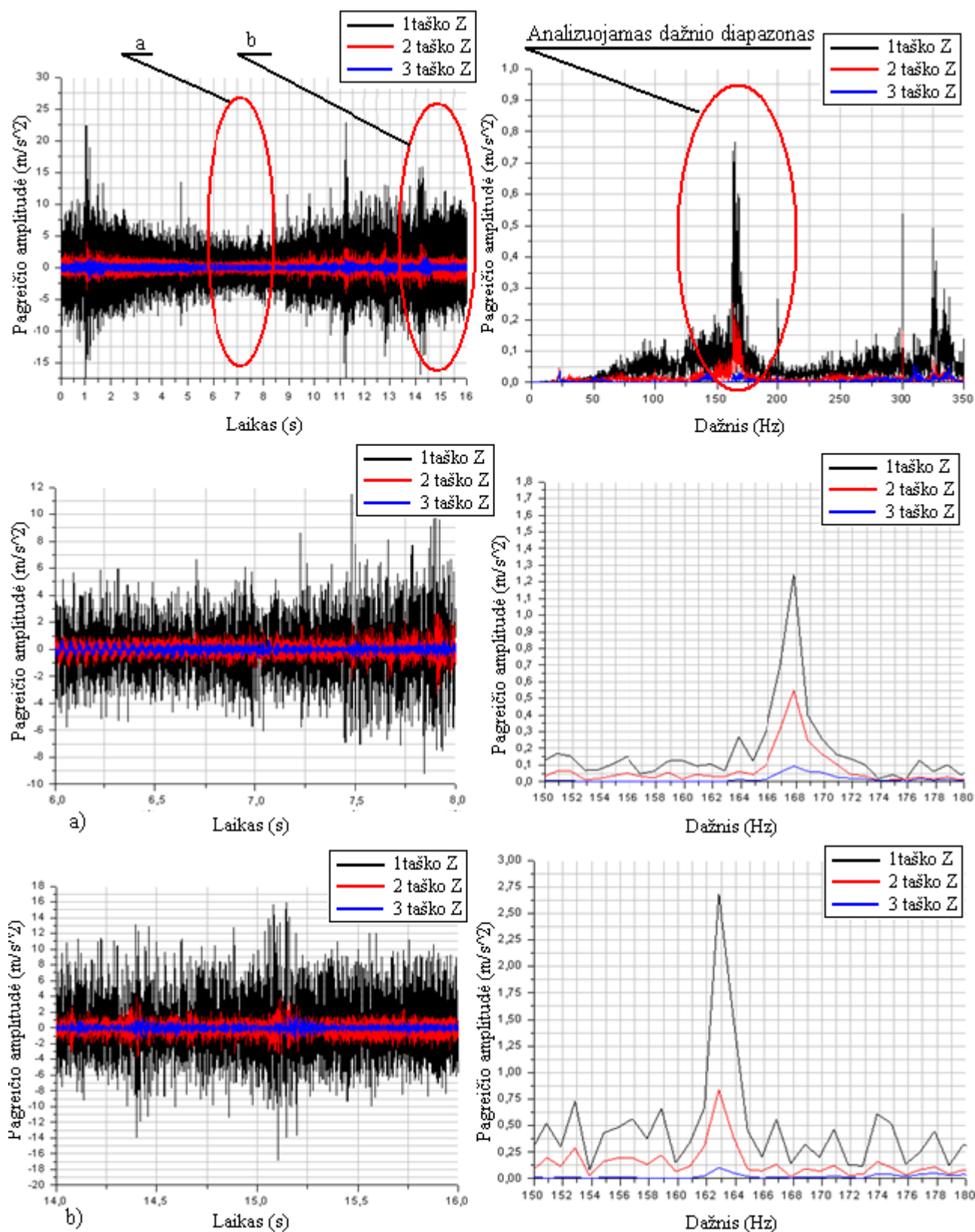
38 pav. Sinusoidės profilis: 1- sinusoidės įdubimas, 2 – sinusoidės iškilimas

Roboto įrankiui pradėdant frezuoti omegos profilio sinusoidę (3–4 intervalas) iš polipropileno su 1 mm/s; 3 mm/s; 5 mm/s; 10 mm/s pastūma, vertinant 3-jų taškų rodmenis, pagreičio amplitudės reikšmės pagal vertikalią kryptį „Z“, pavaizduotos grafikuose (39–42 pav.).



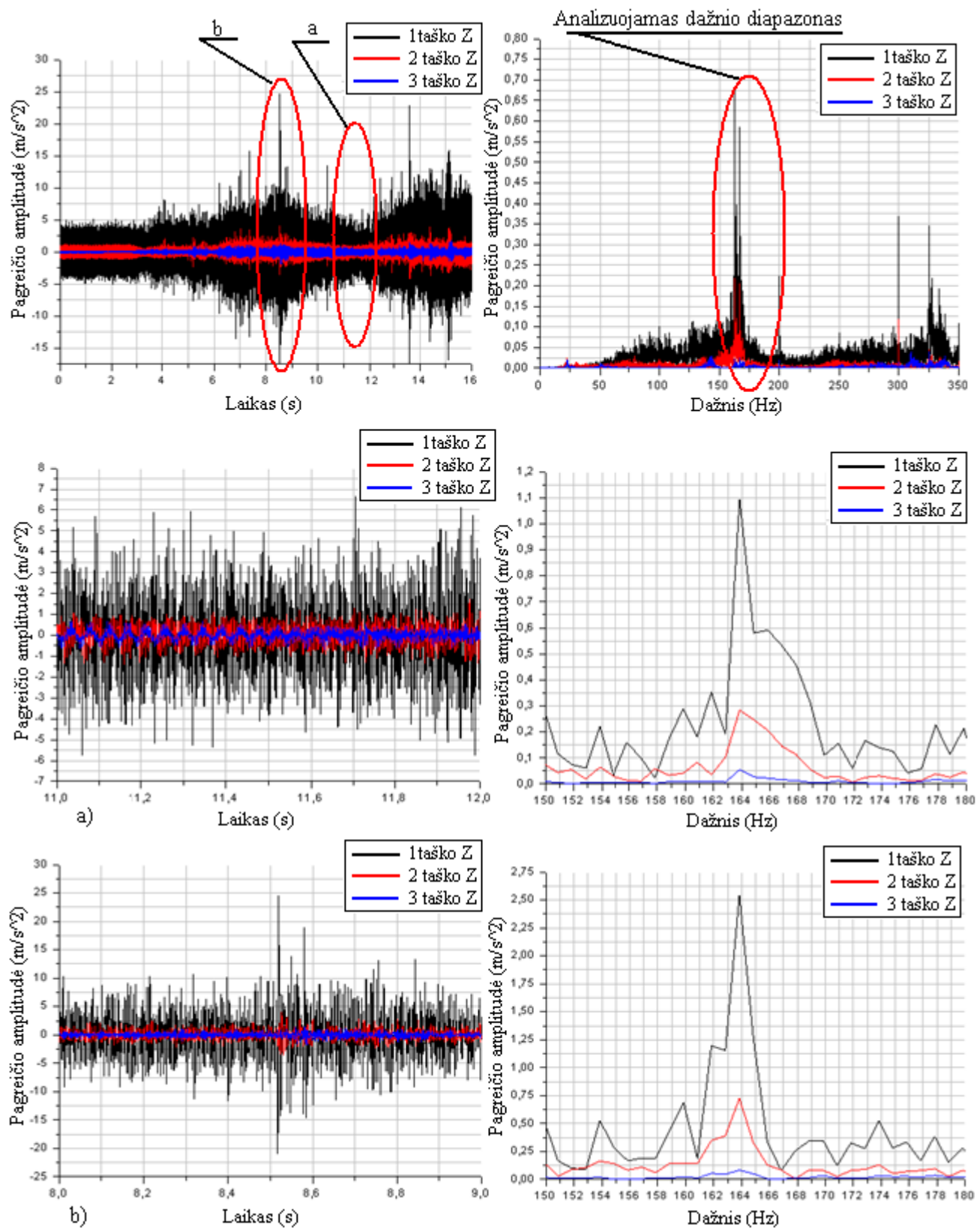
39 pav. Roboto įrankiui pradėdant frezuoti omegos profilio sinusoidę iš polipropileno su 1 mm/s pastūma:

a) – 4 intervalas; b) – 3 intervalas



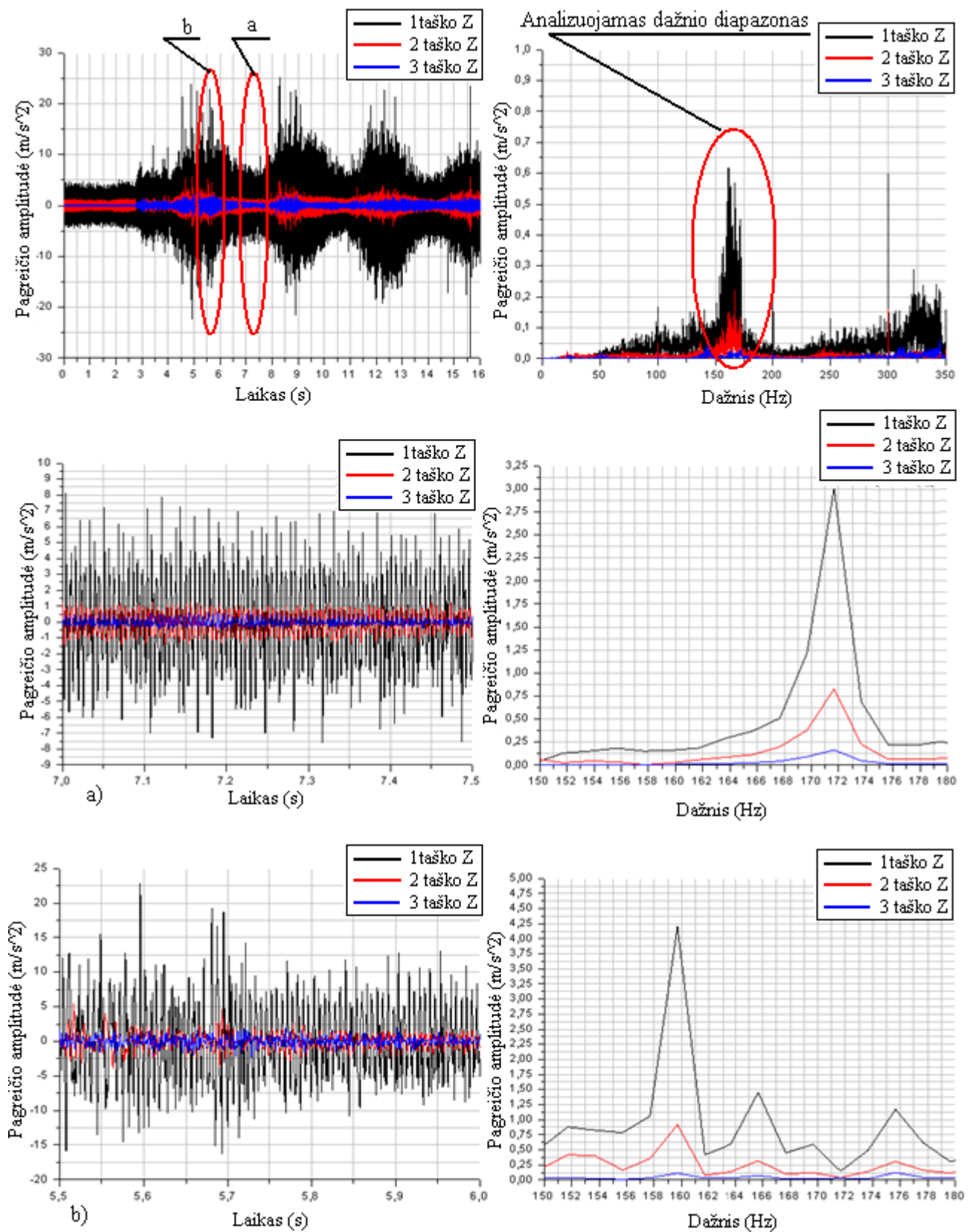
40 pav. Roboto įrankiui pradėdant frezuoti omegos profilio sinusoidę iš polipropileno su 3 mm/s pastūma:

a) – 4 intervalas; b) – 3 intervalas



41 pav. Roboto įrankiui pradėdant frezuoti omegos profilio sinusoidę iš polipropileno su 5 mm/s pastūma:

a) – 4 intervalas; b) – 3 intervalas



42 pav. Roboto įrankiui pradėdant frezuoti omegos profilio sinusoidę iš polipropileno su 10 mm/s pastūma:

a) – 4 intervalas; b) – 3 intervalas

Roboto įrankiui pradant frezuoti omegos profilio sinusoidę iš medienos ir ekstrudinio polistireno su tam tikra užduota pastūma, pagreičio amplitudės reikšmės pagal vertikalią kryptį „Z“, pavaizduotos 3-ame priede.

Reikšmingos pagreičio amplitudės frezuojant sinusoidės profilį, kurios įtakoja frezuojamo profilio paviršiaus šiurkštumą su pastūma, pateiktos 9 lentelėje.

9 lentelė. Reikšmingos pagreičio amplitudės, kurios įtakoja frezuojamo profilio paviršiaus šiurkštumą 3–4 intervaluose

Medžiagos	Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	3 intervalas		4 intervalas	
			Pagreič. amplit. reikšmė (m/s^2)	Dažnis (Hz)	Pagreič. amplit. reikšmė (m/s^2)	Dažnis (Hz)
Mediena	1	1	2,39	166,90	0,91	166,97
		2	0,84		0,59	
		3	0,109		0,091	
	3	1	2,33	163,95	1,36	166,97
		2	0,66		0,50	
		3	0,108		0,077	
	5	1	4,69	161,83	1,45	168,80
		2	1,24		0,61	
		3	0,23		0,132	
	10	1	4,98	157,68	2,56	169,64
		2	1,22		0,94	
		3	0,19		0,176	
Polipropilenas	1	1	3,65	165,92	5,36	166,90
		2	1,08		1,19	
		3	0,119		0,122	
	3	1	2,68	162,89	1,24	167,82
		2	0,84		0,56	
		3	0,109		0,099	
	5	1	2,55	163,78	1,09	163,92
		2	0,73		0,29	
		3	0,091		0,059	
	10	1	4,21	159,73	2,99	171,69
		2	0,92		0,83	
		3	0,134		0,169	
Ekstrudinis polistirenas	1	1	1,74	166,41	1,42	166,90
		2	0,82		0,70	
		3	0,093		0,088	
	3	1	1,55	166,41	1,59	166,83
		2	0,67		0,69	
		3	0,063		0,068	
	5	1	1,55	165,85	1,44	166,83
		2	0,68		0,56	
		3	0,056		0,052	
	10	1	1,76	165,63	1,95	167,67
		2	0,84		0,74	
		3	0,072		0,074	

Frezuojant sinusoidės profilį iš skirtingų medžiagų 3-ame intervale, didinant pastūmos dydį mažėjo tiriamos sistemos dažnis. Didžiausias sistemos dažnis yra frezuojant 1 mm/s pastūma,

frezuojant iš medienos 166,90 Hz; polipropileno – 165,92 Hz; ekstrudinio polistireno – 166,41 Hz. Mažiausias sistemos dažnis yra frezuojant 10 mm/s pastūma, frezuojant iš medienos 157,68 Hz; polipropileno – 159,73 Hz; ekstrudinio polistireno – 165,63 Hz.

4-ame intervale, didinant pastūmos dydį, didėjo tiriamos sistemos dažnis. Didžiausias dažnis frezuojant 10 mm/s pastūma, frezuojant iš medienos 169,64 Hz; polipropileno – 171,69 Hz; ekstrudinio polistireno – 167,67 Hz. Mažiausias dažnis frezuojant 1 mm/s pastūma, frezuojant iš medienos 166,97 Hz; polipropileno ir ekstrudinio polistireno – 166,90 Hz;

Apskaičiuoti statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui įrankiui pradendant frezuoti sinusoidės profilį iš skirtingų medžiagų, pateikti 10–15 lentelėse.

10 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant medieną omegos sinusoidės įdubime su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	-0,00311	2,98915	-8,35654	8,74787	17,1044
	2	-0,0012	0,75549	-1,27591	1,55362	2,82953
	3	-4,31E-05	0,20272	-0,46758	0,51663	0,98421
3	1	9,37E-04	3,45906	-8,27861	9,01181	17,2904
	2	0,00243	0,78381	-1,44968	1,68276	3,13244
	3	-5,42E-05	0,19166	-0,42455	0,43683	0,86138
5	1	6,57E-04	4,87502	-10,4215	12,0146	22,4361
	2	-0,00101	1,06126	-2,2432	2,16124	4,40444
	3	6,85E-05	0,37239	-0,68894	0,97185	1,66079
10	1	-0,01912	5,34877	-12,3386	13,1241	25,4627
	2	-0,00473	1,14316	-2,26505	2,12424	4,38929
	3	-0,00295	1,10318	-2,24531	2,09896	4,34427

11 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant medieną omegos sinusoidės iškilime su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	8,03E-04	1,93804	-6,2698	6,03052	12,3003
	2	-8,19E-04	0,54013	-0,95511	1,16544	2,12055
	3	7,37E-05	0,14344	-0,34066	0,39432	0,73499
3	1	-0,00162	2,73058	-7,62859	8,17107	15,7996
	2	-0,0012	0,68778	-1,2961	1,54678	2,84288
	3	-2,12E-04	0,17553	-0,42427	0,42088	0,84515
5	1	6,64E-04	2,64725	-5,06269	4,885	9,94769
	2	-0,00128	0,51332	-1,14939	1,07841	2,2278
	3	-4,93E-05	0,13646	-0,35742	0,34963	0,70705
10	1	0,00994	2,87935	-7,30322	7,68286	14,9860
	2	-0,00552	0,83553	-1,61084	1,44834	3,05918
	3	-1,25E-04	0,25192	-0,48578	0,63851	1,12429

12 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant polipropileną omegos sinusoidės įdubime su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	0,00367	5,65792	-13,9353	13,6155	27,5508
	2	-2,30E-04	1,13771	-2,41983	2,60266	5,02249
	3	-8,84E-05	0,18363	-0,4947	0,5745	1,0692
3	1	0,00313	4,43377	-13,9561	13,1035	27,0596
	2	-0,00173	1,04615	-3,8075	4,01021	7,81771
	3	5,89E-04	0,38117	-1,42182	1,34358	2,7654
5	1	-0,00701	4,659	-20,9573	24,6048	45,5621
	2	7,66E-04	1,00079	-3,56924	4,10155	7,67079
	3	1,27E-04	0,46233	-1,95429	1,46264	3,41693
10	1	-0,00761	6,25371	-16,209	22,8727	39,0817
	2	-0,00181	1,30771	-3,89104	5,38542	9,27646
	3	0,00334	0,77312	-2,3454	1,99584	4,34124

13 lentelė. . Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant polipropileną omegos sinusoidės iškilime su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	-0,00137	3,43141	-9,84826	9,72518	19,5734
	2	1,01E-04	0,80969	-1,95116	2,13172	4,08288
	3	-9,88E-05	0,13318	-0,55407	0,43589	0,98996
3	1	-8,52E-06	2,36165	-6,92916	11,4726	18,4017
	2	-0,00243	0,59366	-2,21008	1,91408	4,12416
	3	7,01E-05	0,22893	-0,75038	0,67074	1,42112
5	1	0,0017	2,23609	-5,77039	6,67138	12,4417
	2	-0,00221	0,5661	-1,41158	1,72926	3,14084
	3	-0,00178	0,25494	-0,70224	0,69764	1,39988
10	1	-0,01646	3,19576	-7,61498	8,13079	15,7457
	2	-0,00948	0,75161	-1,44598	1,26738	2,71336
	3	5,46E-04	0,23825	-0,48248	0,69062	1,1731

14 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant ekstrudinį polistireną omegos sinusoidės įdubime su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	6,11E-04	1,8037	-4,48211	4,31563	8,79774
	2	1,35E-04	0,62679	-1,09304	1,12103	2,21407
	3	3,68E-05	0,07656	-0,1529	0,15331	0,3062
3	1	0,00191	1,99468	-4,7611	4,85997	9,62107
	2	0,00194	0,59201	-1,0955	1,06808	2,16358
	3	-2,05E-06	0,06589	-0,18789	0,18049	0,36837
5	1	-0,00279	2,08028	-4,90804	4,53631	9,44435
	2	-0,00129	0,59183	-1,1265	1,11264	2,23914
	3	1,46E-04	0,05771	-0,15074	0,13956	0,2903
10	1	0,00206	2,19248	-4,61572	4,04659	8,66231
	2	0,00122	0,62747	-1,17552	1,05079	2,22631
	3	-3,13E-05	0,06589	-0,17026	0,14072	0,31098

15 lentelė. Statistiniai pagreičio amplitudės parametrai pagal vertikalią kryptį robotui frezuojant ekstrudinį polistireną omegos sinusoidės iškilime su tam tikra užduota pastūma

Pastūmos dydis, mm/s	Matavimo taško Nr.	Aritmetinio vidurkio reikšmė $\bar{x}$, μm	Standartinis nuokrypis, S_x	Minimali reikšmė, $x_{\min}$	Maksimali reikšmė, $x_{\max}$	Sklaida, $x_{\max}$
1	1	-1,46E-03	1,77641	-4,91227	4,42471	9,33698
	2	-2,95E-04	0,62708	-1,02046	1,11009	2,13055
	3	5,90E-05	0,07434	-0,13761	0,15354	0,29115
3	1	-3,20E-04	2,00788	-4,81256	4,838	9,65056
	2	-3,35E-04	0,62591	-1,1557	1,12491	2,28061
	3	2,46E-05	0,06118	-0,1434	0,13294	0,27634
5	1	0,00205	2,03655	-4,81567	4,86544	9,68111
	2	-0,00162	0,56471	-1,12315	1,03108	2,15423
	3	-2,43E-04	0,05563	-0,13881	0,12141	0,26022
10	1	0,00313	2,11206	-4,84981	4,86676	9,71657
	2	-0,00532	0,57631	-1,09277	1,141	2,23377
	3	-2,23E-04	0,0591	-0,1339	0,12908	0,26298

4.2 Paviršiaus šiurkštumo matavimo duomenų analizė

16 Medienos bandinių šiurkštumo matavimų reikšmės

Bandinis, Nr	Sinusoidės įdubime	Sinusoidės iškilime
Mediena	Rz, μm	Rz, μm
1. Su 1 mm/s pastūma	11,44	10,87
2. Su 3 mm/s pastūma	16,41	15,94
2. Su 5 mm/s pastūma	20,52	19,03
4. Su 10 mm/s pastūma	22,35	21,54

17 lentelė. Polipropileno bandinių šiurkštumo matavimų reikšmės

Bandinis, Nr	Sinusoidės įdubime	Sinusoidės iškilime
Polipropilenas	Rz, μm	Rz, μm
1. Su 1 mm/s pastūma	26,01	25,23
2. Su 3 mm/s pastūma	13,07	12,31
2. Su 5 mm/s pastūma	14,36	13,97
4. Su 10 mm/s pastūma	21,29	20,42

18 lentelė. Ekstrudinio polistireno bandinių šiurkštumo matavimų reikšmės

Bandinis, Nr	Sinusoidės įdubime	Sinusoidės iškilime
Ekstrudinis polistirenas	Rz, μm	Rz, μm
1. Su 1 mm/s pastūma	38,45	37,38
2. Su 3 mm/s pastūma	44,32	42,04
2. Su 5 mm/s pastūma	52,74	50,11
4. Su 10 mm/s pastūma	59,01	57,93

Pagal gautus rezultatus (16–18 lentelėse), šiurkštumas sinusoidės įdubime ir iškilime skiriasi nežymiai.

Frezuojant sinusoidės profilį iš medienos su 1 mm/s; 3 mm/s; 5 mm/s; 10 mm/s pastūma, mažiausias šiurkštumas yra frezuojant 1 mm/s pastūma. Sinusoidės įdubime $R_z = 11,44 \mu\text{m}$, sinusoidės iškilime $R_z = 10,87 \mu\text{m}$. Didžiausias šiurkštumas yra frezuojant 10 mm/s pastūma, sinusoidės įdubime $R_z = 22,35 \mu\text{m}$; sinusoidės iškilime $R_z = 21,54 \mu\text{m}$.

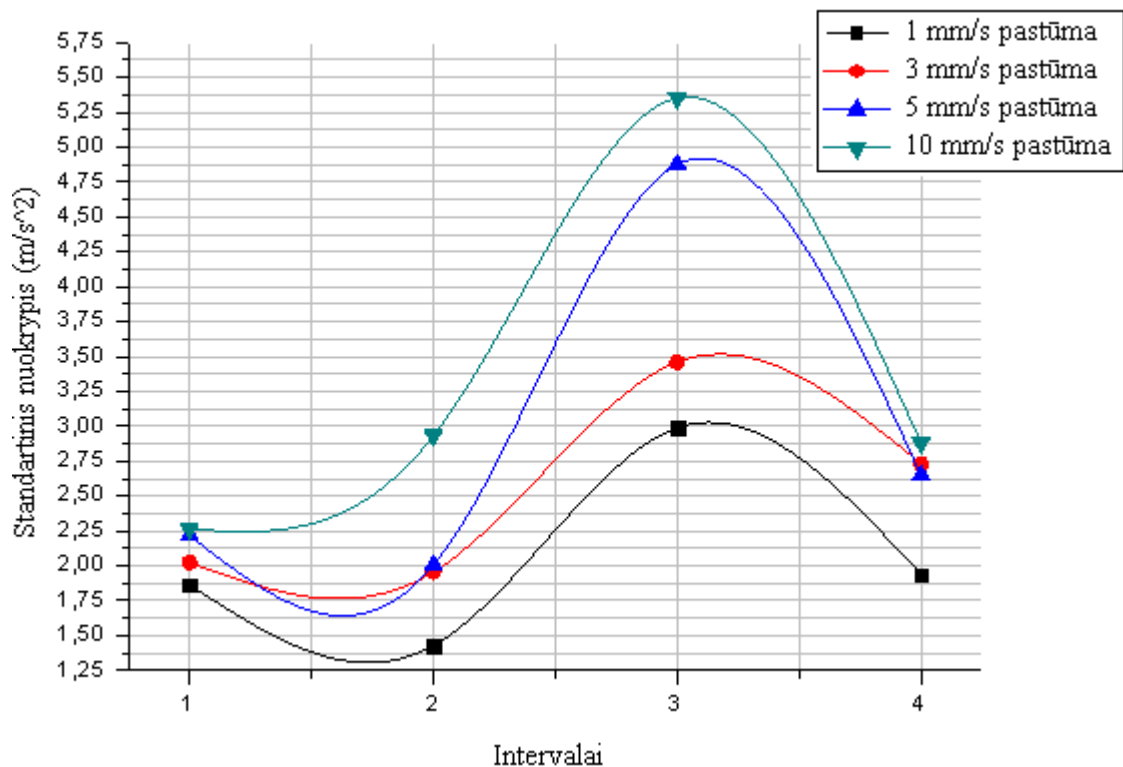
Apdirbant polipropilena, mažiausias šiurkštumas yra frezuojant 3 mm/s pastūma. Sinusoidės įdubime $R_z = 13,07 \mu\text{m}$, sinusoidės iškilime $R_z = 12,31 \mu\text{m}$. Didžiausias šiurkštumas yra frezuojant 1 mm/s pastūma, sinusoidės įdubime $R_z = 26,01 \mu\text{m}$; sinusoidės iškilime $R_z = 25,23 \mu\text{m}$.

Apdirbant sinusoidės profilį iš ekstrudinio polistireno, mažiausias šiurkštumas yra frezuojant 1 mm/s pastūma. Sinusoidės įdubime $R_z = 38,45 \mu\text{m}$, sinusoidės iškilime $R_z = 37,38 \mu\text{m}$. Didžiausias šiurkštumas yra frezuojant 10 mm/s pastūma, sinusoidės įdubime $R_z = 59,01 \mu\text{m}$; sinusoidės iškilime $R_z = 57,93 \mu\text{m}$.

4.3 Palyginamoji eksperimentinių matavimo rezultatų analizė

Palyginus 2 ir 9 lentelės duomenis, matyti, kad frezuojant medžiagas su tam tikra pastūma, pjovimo gyliui didėjant, tiriamos sistemos dažnis mažėjo, o dažninės pagreičio amplitudinės reikšmės įtakojančios paviršiaus šiurkštumą didėjo.

Vertinant 3-jų taškų rodmenis (3–8 ir 10–15 lentelėse) pagal vertikalią kryptį „Z“, didžiausi virpesiai yra prie špindelinės galvutės (1 taškas). Todėl lyginama pagreičio amplitudės reikšmių 1–ame taške priklausomybė nuo pastūmos dydžio kiekviename intervale frezuojant skirtingas medžiagas (43–45 pav.).

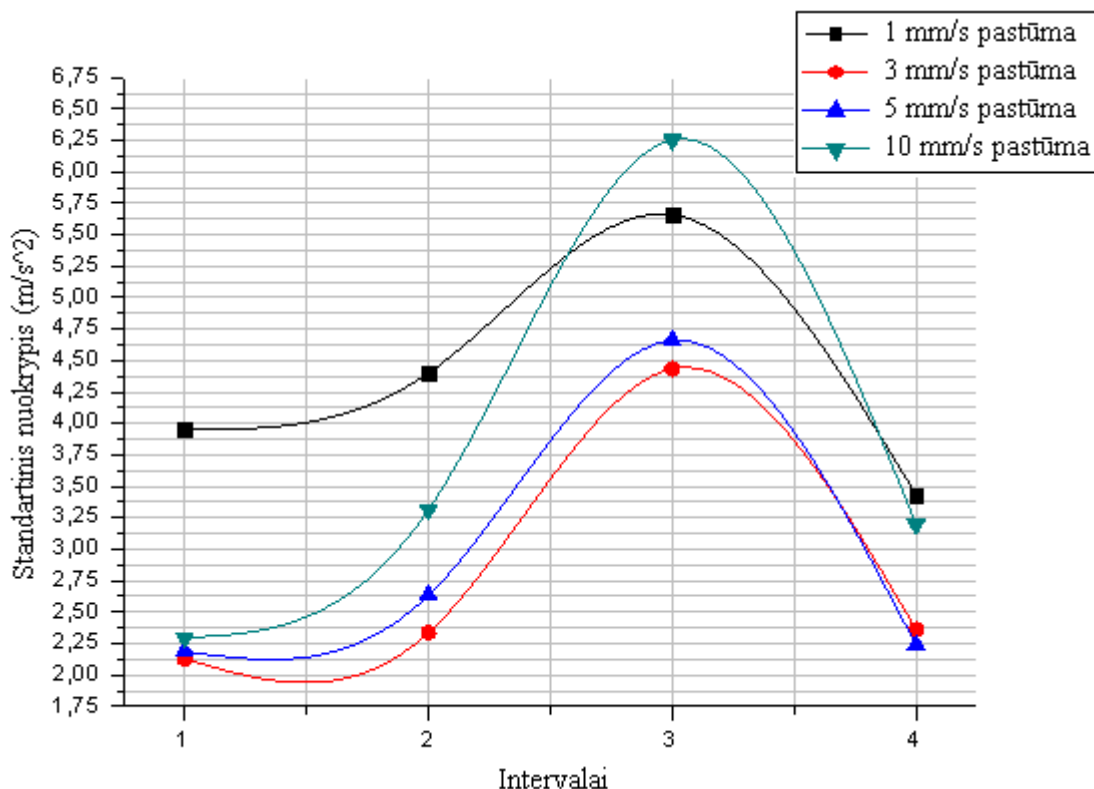


43 pav. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės apdirbant mediena skirtinguose intervaluose

Frezuojant omegos formos sinusoidės profilį iš medžio su 1, 3 ir 5 mm/s pastūma, matyti, kad tiriamos sistemos sukeltos vibracijos pirmame intervale (roboto įrankiui įeinant į medžiagą) yra 10–15 % didesnės nei 2–ame intervale (pradedant frezuoti tiesiai), 50–60 % mažesnės nei 3–ame intervale (sinusoidės įdubime) (43 pav.). 1–ame intervale ir 4–ame intervale (sinusoidės iškilime), sukeltos vibracijos skiriasi neženkliai.

Frezuojant su 10 mm/s pastūma 1–ame intervale, tiriamos sistemos sukeltos vibracijos buvo 25 % mažesnės nei 2–ame ir 4–ame intervaluose, 80% nei 3–ame intervale.

Vertinant pagreičio amplitudžių reikšmių standartinį nuokrypį, pastarasis didėjo didinant pastūmos dydį. Mažiausios reikšmės gautos frezuojant omegos formos sinusoidės profilį iš medžio su 1 mm/s pastūma.



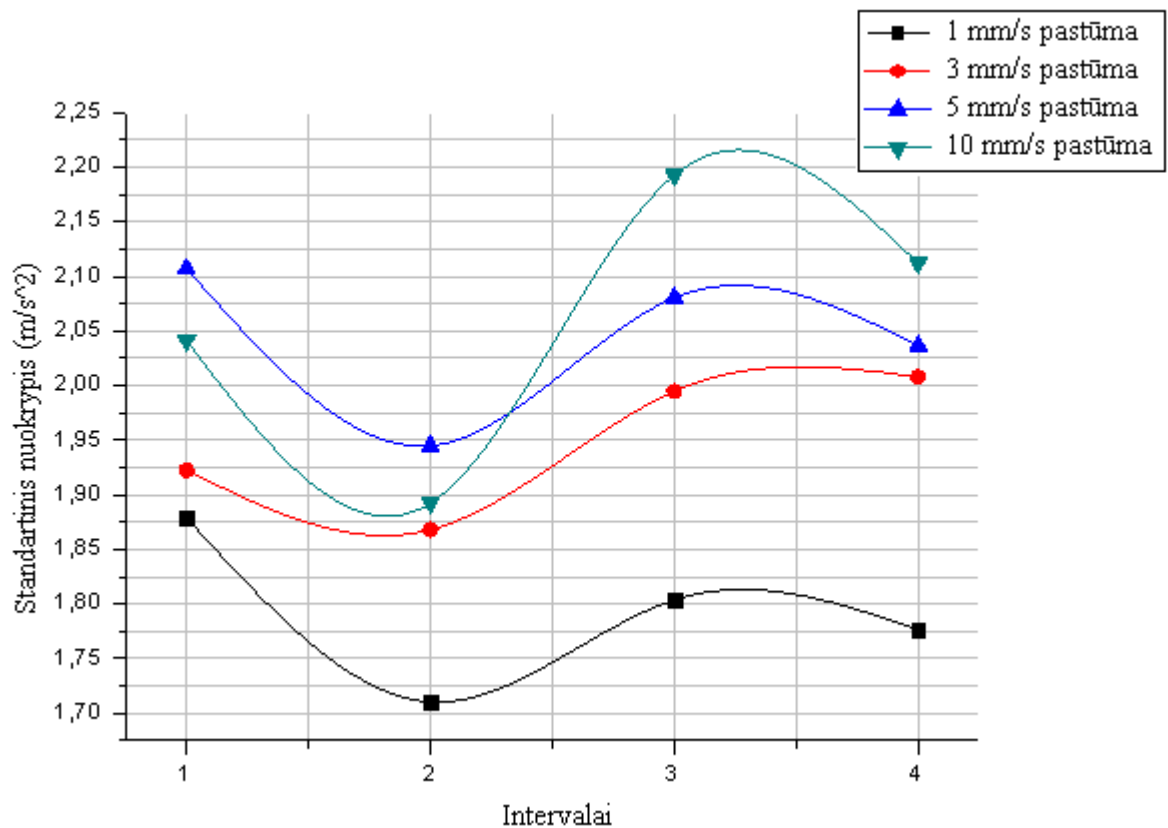
44 pav. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės apdirbant polipropileną skirtinguose intervaluose

Apdirbant omegos formos sinusoidės profilį iš polipropileno su nustatyta pastūma, pastebėta, kad tiriamos sistemos sukeltos vibracijos 1, 2, 4-ame intervaluose yra didžiausios frezuojant 1 mm/s pastūma, 3-ame intervale didžiausios vibracijos – 10 mm/s pastūma (44 pav.).

Frezuojant 1 mm/s pastūma 1-ame intervale tiriamos sistemos sukeltos vibracijos yra apie 50 % didesnės negu frezuojant su 3, 5, 10 mm/s pastūma. 2, 3 ir 4-ame intervaluose, lyginant apdirbimą 3, 5 mm/s pastūma yra 30–40 % didesnės. 3-ame intervale yra 15 % mažesnės nei apdirbant su 10 mm/s pastūma.

Analizuojant omegos formos sinusoidės profilio apdirbimo iš polipropileno vibracijas, kai pastūma 3, 5, 10 mm/s, matyti, kad pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės didėjo proporcingai didėjant pastūmos dydžiui (44 pav.).

Mažiausios pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės yra frezuojant omegos formos sinusoidės profilį iš polipropileno 3 mm/s pastūma; didžiausios 1 mm/s pastūma.



45 pav. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės apdirbant ekstrudinį polistireną skirtinguose intervaluose

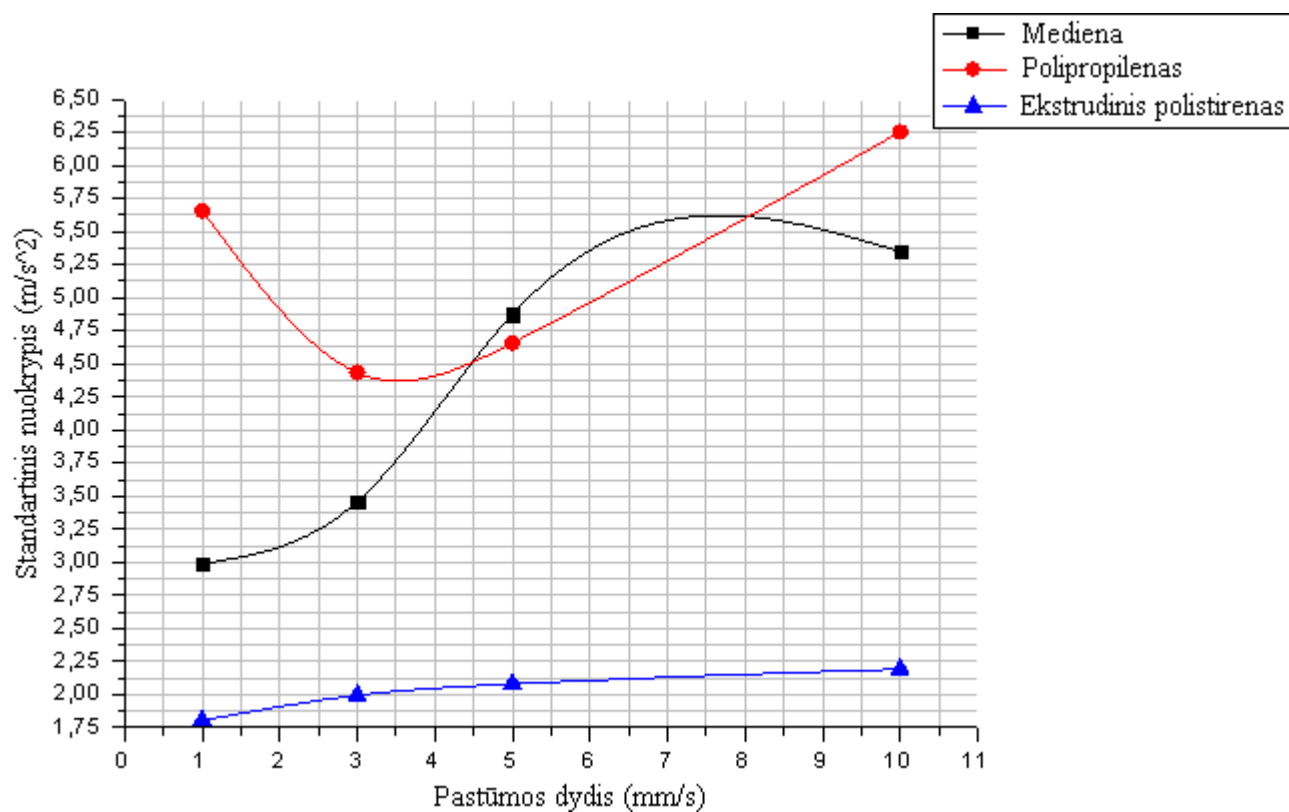
Frezuojant omegos formos sinusoidės profilį iš ekstrudinio polistireno su 1, 3, 5, 10 mm/s pastūma, matyti, kad tiriamos sistemos sukeltos vibracijos 1–ame intervale yra 10% didesnės nei 2–ame intervale (45 pav.).

Apdirbant 1, 3 ir 5 mm/s pastūma, 1–ame intervale sukeltos vibracijos yra 3–6 % didesnės negu 3 ir 4–ame intervaluose.

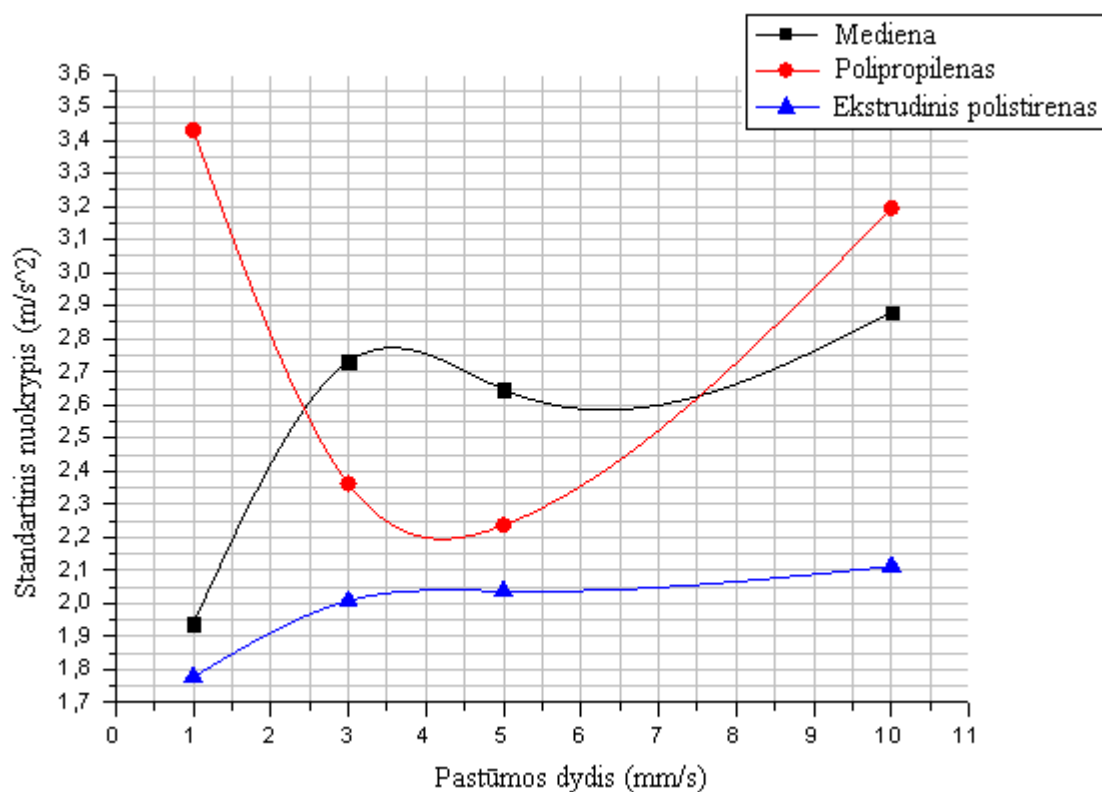
Frezuojant omegos formos sinusoidės profilį iš ekstrudinio polistireno 10 mm/s pastūma, 1–ame intervale tiriamos sistemos sukelti virpesiai yra 10 % mažesni nei 3–ame intervale ir 5 % nei 4–ame intervale.

Vertinant pagreičio amplitudės standartinį nuokrypį, jo reikšmės didėjo didinant pastūmą. Mažiausios reikšmės gautos frezuojant omegos formos sinusoidės profilį iš ekstrudinio polistireno 1 mm/s pastūma.

Apdirbant omegos formos sinusoidės profilį iš skirtingų medžiagų, vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio priklausomybė nuo pastūmos dydžio pavaizduota 46–47 pav.



46 pav. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime



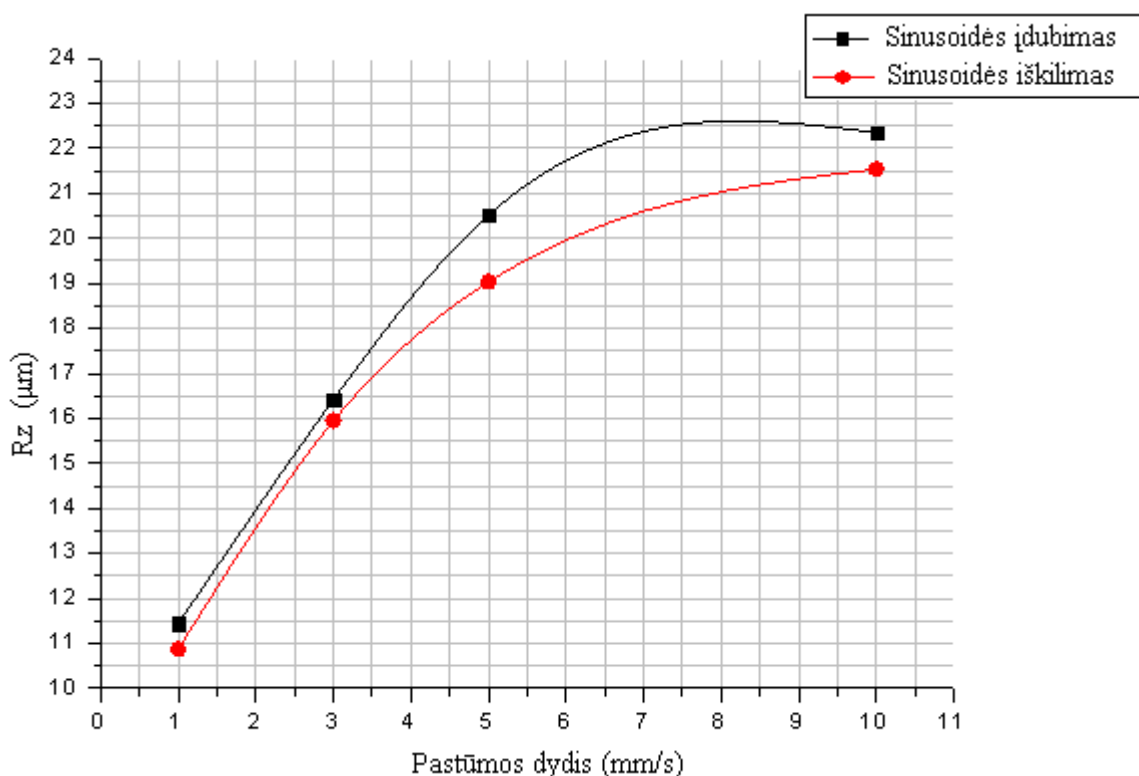
47 pav. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės iškilime

Pagal eksperimentinius duomenis, matyti, kad apdirbant profilį iš medienos ir ekstrudinio polistireno, vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinis nuokrypis sinusoidės įdubime (3 intervalas) didėjo didinant pastūmos dydį. Frezuojant iš polipropileno mažiausia vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmė yra esant 3 mm/s pastūmai, o didžiausia esant 10 mm/s pastūmai.

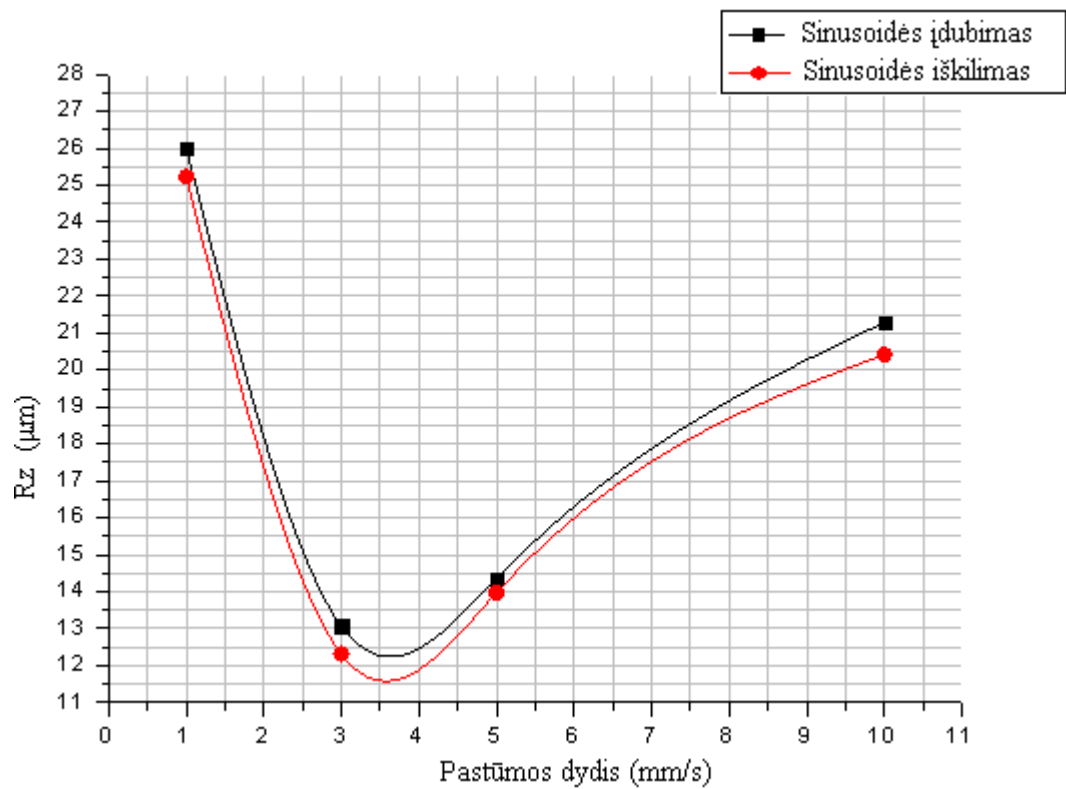
Frezuojant profilį iš medienos, tiriamos sistemos sukeliama virpesiai sinusoidės iškilime yra mažiausi esant 1 mm/s pastūmai, o didžiausi esant 10 mm/s pastūmai. Lyginant apdirbimą su 1 ir 10 mm/s pastūma, pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmė skiriasi trečdaliu. Esant 3 ir 5 mm/s pastūmoms, pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės skiriasi neženkliai.

Apdirbant profilį iš polipropileno tiriamos sistemos sukeliama virpesiai sinusoidės iškilime yra mažiausi esant 3 ir 5 mm/s pastūmai, o iš ekstrudinio polistireno – esant 1 mm/s pastūmai. Frezuojant ekstrudinį polistireną pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės sinusoidės iškilime didėjo didinant pastūmos dydį.

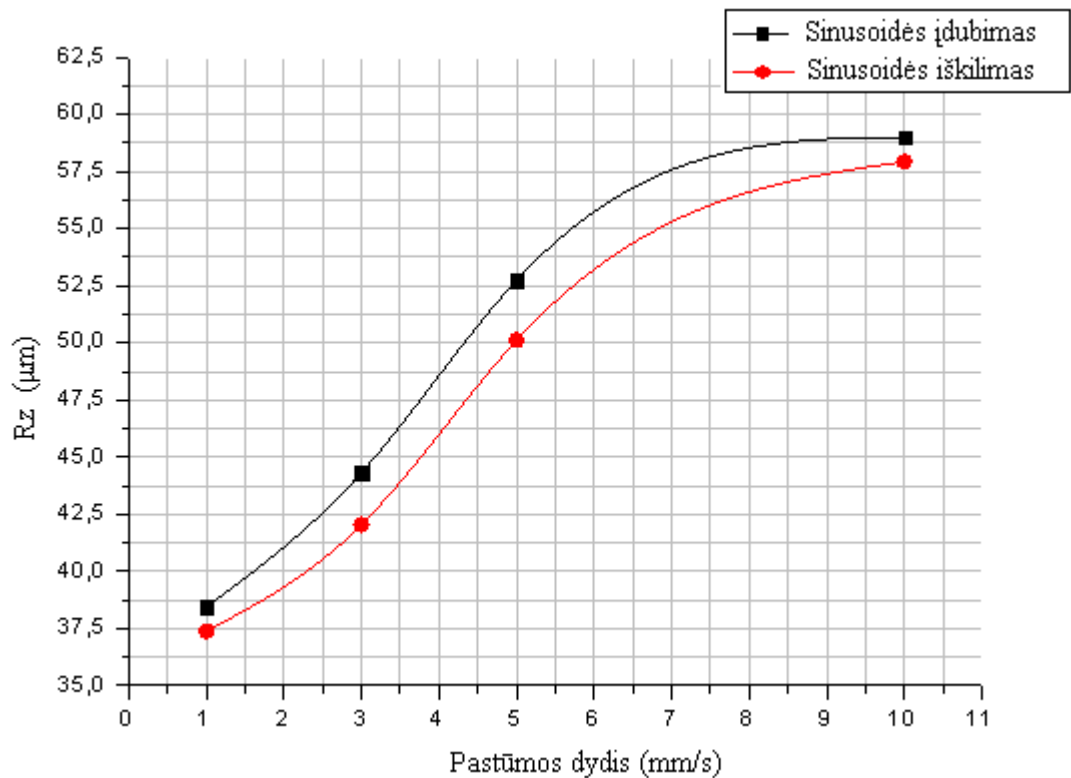
Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime pavaizduota (48 – 50 pav.)



48 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime apdirbant medieną



49 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime apdirbant polipropileną



50 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime apdirbant ekstrudinį polistireną

Iš 48 ir 50 pav., matyti, kad apdirbant profilį iš medienos ir ekstrudinio polistireno, sinusoidės įdubime ir iškilime paviršiaus šiurkštumas didėjo proporcingai didinant pastūmos dydį.

Frezuojant polipropileną (49 pav.) su 3 mm/s pastūma, paviršiaus šiurkštumas yra dvigubai mažesnis nei frezuojant su 1 mm/s pastūma. Didinant pastūmą iki 5 mm/s, paviršiaus šiurkštumas padidėjo 10 %. Esant 10 mm/s pastūmai, paviršiaus šiurkštumas yra 40 % didesnis nei esant 3 mm/s pastūmai.

IŠVADOS

1. Išanalizuoti roboto privalumai ir trūkumai lyginant su CNC staklėmis.
2. Aprašytas robotų technologijos poreikis prototipų gamyboje; išnagrinėti 3D modeliavimas ir mechaninis apdirbimas; atlikta roboto „Motoman SSF-2000“ konstrukcijos ir pagrindinių jo parametrų analizė. Išanalizuotas manipulatoriaus valdymas.
3. Didėjant pjovimo gyliui mechaninio apdirbimo metu roboto vibracijos aktyvumas ir apdirbamos medžiagos paviršiaus šiurkštumas didėja. Frezuojant omegos formos sinusoidės profilį iš skirtingų medžiagų 1, 3, 5, 10 mm/s pastūma, didžiausia vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmė gaunama frezuojant skirtingas medžiagas 10 mm/s pastūma sinusoidės profilio įdubime.
4. Apdirbant medieną esant skirtingoms pastūmoms sinusoidės profilio įdubime, mažiausia vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmė $2,99 \text{ m/s}^2$ ir mažiausias paviršiaus šiurkštumas yra $11,44 \text{ } \mu\text{m}$ frezuojant 1 mm/s pastūma. Apdirbant 3, 5, 10 mm/s pastūma, vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypis didėja atitinkamai 15, 30, 40 %. Paviršiaus šiurkštumas frezuojant 3 mm/s pastūma padidėja 30 %, 5 mm/s – 85 %, 10 mm/s – padidėjo beveik dvigubai.
5. Frezuojant omegos formos sinusoidės profilį iš polipropileno esant skirtingoms pastūmoms, optimaliausias pastūmos dydis norint pasiekti mažiausia paviršiaus šiurkštumą ir vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmę sinusoidės įdubime ir iškilime yra 3 mm/s pastūma. Apdirbant sinusoidės profilio įdubime 3 mm/s pastūma, vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmė yra $4,43 \text{ m/s}^2$, paviršiaus šiurkštumas $13,07 \text{ } \mu\text{m}$. Didžiausia vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmė $6,25 \text{ m/s}^2$ yra frezuojant 10 mm/s pastūma. Didžiausias paviršiaus šiurkštumas yra frezuojant 1 mm/s pastūma, nes frezuojant 10 000 aps/min polipropilenas pradeda lydytis, norint pasiekti mažesnę šiurkštumą, reikia mažinti sukimosi greitį.
6. Apdirbant omegos formos sinusoidės profilį iš ekstrudinio polistireno esant skirtingoms pastūmoms, mažiausia vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmė yra $1,8 \text{ m/s}^2$ ir paviršiaus šiurkštumas - $38,45 \text{ } \mu\text{m}$ sinusoidės įdubime, frezuojant 1 mm/s pastūma. Vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės ir paviršiaus šiurkštumas frezuojant 3, 5, 10 mm/s pastūma, didėjo proporcingai.
7. Vertinant vertikalių virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmes, apdirbant skirtingas medžiagas, mažiausios yra apdirbant ekstrudinį polistireną, bet paviršiaus šiurkštumas didžiausias. Tokiems gautiems rezultatams galėjo įtakoti pjovimo įrankio neatitikimas, per didelis sukimosi greitis ir medžiagos savybės.

LITERATŪRA

1. Aigner A., Brell-Cokcan S. 2009. *Surface Structures and Robot Milling. The Impact of Curvilinear Structured Architectural Scale Models on Architectural Design and Production*. Innovative Design & Construction Technologies – Building complex shapes and Beyond. 81 p.
2. Bakšys B., Federavičius A. 2004. *Robotų technika*. Kaunas: Technologija. 20–68 p.
3. Chen, Y., Song, Y. 2001. *The development of a layer based machining system*. Computer-Aided Design, Vol. 33, 331–342 p.
4. Chryssolouris, G. 2006. *Manufacturing systems – theory and practice*. 2nd edition. New York: Springer- Verlag. 74 p.
5. Close C. M.; Frederick D. K.; Newell J.C. 2001. *Modeling and Analysis of Dynamic Systems* [Dinaminių sistemų modeliavimas ir analizė]. New York: John Wiley & Sons, INC. 572 p.
6. Damak, M., Grosbois, J., De Smet, P. 2004. *Vision robot based absolute accuracy measurement-calibration and uncertainty evaluation*. The 35th International Symposium on Robotics. Paris: Nord Villepinte. 1-37 p.
7. Kyung-Jo P. *Flexible robot manipulator path design to reduce the endpoint residual vibration under torque constraints*. Chonman: Elsevier, 2004, 1–18 p.
8. Lewis F. L.; Dawson D. M.; Abdallah C. T. 2004. *Robot manipulator control*. Theory and practice. Secons edition [Roboto manipulatoriaus kontrolė. Teorija ir praktika. 2-oji laida]. New York: Marcel Dekker, Inc. 614 p.
9. Medekšas H. 2003. *Gaminių kokybė ir patikimumas*. Kaunas: Technologija. 150–155p.
10. Michalos, G. *et al.* 2010. Automotive assembly technologies review: Challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 81-91 p.
11. Patrick J.; Willoughby Hart, A.J.; Slocum, A. 2005. Experimental Determination of Kinematic Coupling Repeatability in Industrial and Laboratory Conditions, *Journal of Manufacturing Systems*. Cambridge: Elsevier. 1–14 p.
12. Poška, A.J. 2004. *Lanksčiosios gamybos sistemų automatizavimas*. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 25–32 p.
13. Shon, P., *et al.* 2009. *The importance of position and path repeatability on force at the knee during six-DOF joint motion*. *Medical Engineering & Physics* [Pozicionavimo ir trajektorijos kartojimo alkūnėje šešių-laisvės laipsnių sąnario judesio metu svarba. Medicinos inžinerija ir fizika]. Calgary: Elsevier. 1–5 p.

14. Zhang, H. *et al.* 2006. Chatter analysis of robotic machining process. *Journal of Materials Processing Technology*. 173, 301–309 p.
15. Industrial Robot Statistics. 2010, Sept 30. Retrieved July 20, 2011, from The International Federation of Robotics [žiūrėta 2011 m. vasario 3 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ifr.org/uploads/media/Charts_industrial_robots_2010.pdf>
16. Roboto „Motoman SSF-2000“ parametrai [žiūrėta 2011 m. vasario 3 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.motoman.lt/nc/products/robots-nx-xrc-and-dx/product-view/rt/ssf2000/>>.
17. Robotų pagrindiniai parametrai [žiūrėta 2011 m. balandžio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://vmc.ppf.ktu.lt/robotai/nuorodos/vidutiniai.htm>>.
18. CNC ir robotų-manipuliatorių privalumai. [žiūrėta 2011 m. kovo 10 d.]. Prieiga per internetą: <<http://alphajet.ru/index.php?categoryid=82>>.
19. International Robot Federation. 2010. [žiūrėta 2011 m. birželio 7 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.irfnet.org>>.
20. Yaskawa Electric Corporation. [žiūrėta 2011 m. rugsėjo 23 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.motoman.lt>>.
21. International Federation of Robotics. [žiūrėta 2011 m. lapkričio 2 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.ifr.org/>>.
22. 3D apdirbimas ir programiniai paketai. [žiūrėta 2012 m. sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.profibus.lt/main/>>.