

## PROTOTIPŲ MECHANINIO APDIRBIMO PRAMONINIŲ ROBOTŲ TYRIMAI

Valdemar Smilgin<sup>1</sup>, Mantas Štrimaitis<sup>2</sup>, Mindaugas Jurevičius<sup>3</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>valdemar.smilgin@vgtu.lt; <sup>2</sup>mantas.strimaitis@vgtu.lt; <sup>3</sup>mindaugas.jurevicius@vgtu.lt

**Santrauka.** Atliekant prototipų mechaninį apdirbimą pramoniniu robotu, svarbi problema yra vibracijos poveikis apdirbamo paviršiaus kokybei. Dėl atskirų sujungto roboto dalių savojo dažnio rezonansas gali atsirasti dėl apdirbimo proceso vibracijų. Atliktas eksperimentas, kurio metu ištirtas roboto vibracinis aktyvumas frezuojant medieną, polipropileną ir ekstruzinį polistireną trijų ašių sistemoje. Kiekvienai medžiagai parinktos pjovimo pastūmos, atsižvelgiant į pjovimo proceso sukeliama vibracijų įtaką paviršiaus šiurkštumui.

**Reikšminiai žodžiai:** prototipų mechaninis apdirbimas, pramoninis robotas, apdirbimo optimizavimas, vibracinio aktyvumo tyrimai.

## Įvadas

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 (Medekšas 2003: 150–155).

Siekdamas išsilaikyti šiandienos 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).

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

Skirtingai nuo fiksuotos automatizacijos, esančios CNC įrenginiuose, daugiausiai pramoniniai robotai gali būti naudojami naujuose procesuose naujoms funkcijoms atlikti, todėl inžinieriams nereikia kurti visiškai naujų gamybos linijų (Damak *et al.* 2004).

Dabartiniai 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, kadangi pradedant pjauti metalą roboto sistema visiškai sutrinka.

Norint pasiekti reikiamą apdirbimo tikslumą, turi būti užtikrintas apdirbimo sistemos standumas. Dėl to serijinės struktūros sujungtas lankstus robotas turi mažesnę standumą negu klasikinės staklės. Pramoninio roboto standumas dažnai yra mažesnis negu 1 N/μm, o tradicinių staklių standumas dažnai yra didesnis negu 50 N/μm (Zhang *et al.* 2006).

Šio darbo tikslas optimizuoti prototipų mechaninį apdirbimą, naudojant pramoninį robotą „Motoman SSF-2000“ (1 pav.). Ištirti roboto vibracinį aktyvumą, frezuojant įvairių medžiagų ruošinius trijų ašių (X, Y, Z) sistemoje. Parinkti roboto įrankiui optimalią pjovimo pastumą frezuojant medieną, polipropileną ir ekstruzinį polistireną trijų ašių sistemoje.

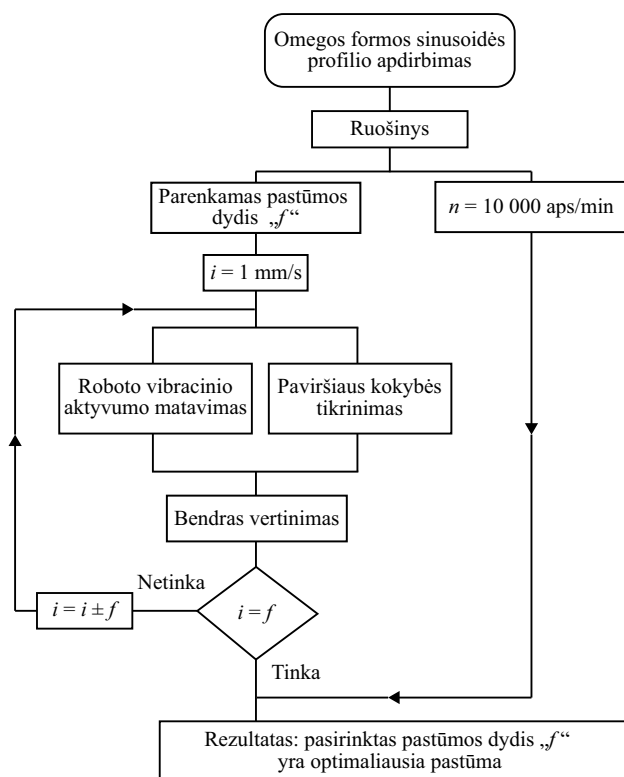


1 pav. Robotas „Motoman SSF-2000“

Fig. 1. Robot *Motoman SSF-2000*

## Tyrimo metodika

Siekiant optimizuoti prototipų mechaninio apdirbimo parametrus naudojant pramoninį robotą „Motoman SSF-2000“ atliktas eksperimentas. Eksperimento idėja – nustatyti roboto optimaliausią pastūmą frezuojant skirtingo kietumo medžiagas. Sudarytas optimaliausios pastūmos parinkimo algoritmas (2 pav.).



2 pav. Optimalios pastūmos parinkimo algoritmas

Fig. 2. An algorithm for choosing optimal feed

Tyrimas atliktas šiais etapais:

1. Naudojant „SolidWorks 2011“ paketą, sudaromas „Omega“ formos sinusoidės profilio 3D erdvinis modelis.
2. Automatiniam apdirbimo programavimui (CAM) pasirenkamas „PowerMill“ programinis paketas. Jo esminis privalumas yra kompiuterinio programavimo greitis. Galimybė jį tiesiogiai įkelti 3D erdvinį modelį ir iš jo gauti informaciją apie detalės parametrus pagal asociatyvią sąsają su pradiniu modeliu, siekiant nustatyti pakeitimus, racionalizuoja gamybą. Pakartotinai naudojant modifikuotą 3D erdvinį modelį, įrankių judėjimo trajektorijos automatiškai koreguojamos pagal nustatytus skirtumus ir sumažėja kompiuterinio programavimo laikas.

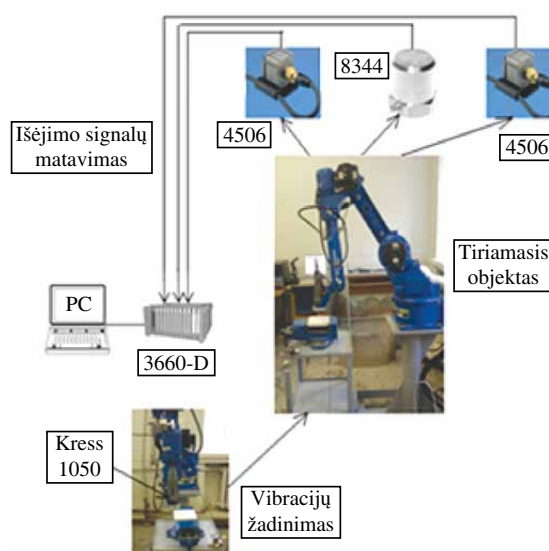
3. CAM paketu sugeneruoti „NC“ kodai į robotui suprantamą kalbą paverčiami naudojant „IRBCAM“ programinį paketą. Jis skirtas tik dirbti su pačiu robotu. Jį naudojant galima keisti įvairius roboto parametrus: pozicionavimo padėtį, roboto ašių trajektoriją, apdirbimo kryptį ir tikslumą, taip pat galima peržiūrėti roboto darbo simuliaciją (3D apdirbimas ir programiniai paketai 2004).
4. Frezuoti pasirenkamos skirtingo kietumo medžiagos: ekstruzinis polistirenas (minkštas), sausa mediena (kieta), polipropilenas (kietas).
5. Kalibruojamas roboto įrankis.
6. Frezuojant „Omega“ formos sinusoidės profilį, matuojamas tiriamos sistemos vibracinis aktyvumas trijų ašių (X, Y, Z) sistemoje.
7. Matuojamas sinusoidės profilio paviršiaus šiurkštumas, naudojant dvigubą mikroskopą „MIC-11“.

## Ekspirimentinė įranga

Virpesių parametrus matuoti buvo naudojamos Danijos firmos „Brüel & Kjær“ virpesių matavimo priemonės: kilnojamoji matavimo duomenų apdorojimo įranga „3660-D“; kompiuteris DELL; seisminis akcelerometras 8344; 2 trijų ašių akcelerometrai 4506.

„Omega“ formos sinusoidės profilis frezuotas naudojant „Kress 1050“ frezavimo galvutę su kietmetaline 4 plunksnų 8 mm skersmens freza. Tyrimo blokinė schema parodyta 3 pav.

Akcelerometrai buvo tvirtinami prie suklinės galvutės, roboto plaštakos ir ant sistemos stovo.



3 pav. Tyrimo stendo blokinė schema

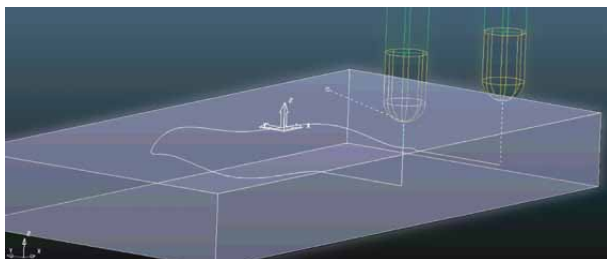
Fig. 3. Block diagram of the research bench

Paviršiaus šiurkštumui matuoti naudotas dvigubas mikroskopas „MIC-11“. Juo galima matuoti mikronelygumų aukštį Rz nuo 80,0 iki 0,8  $\mu\text{m}$ . Prietaisas veikia šviesos pjūvio principu. Jo esmė tokia: lygiagretusis spindulių pluoštas pro siaurą plyšį 45° kampu apšviečia tiriamąjį paviršių; nuo paviršiaus nelygumų atsispindėjusi šviesos juostelė išsikreivina, o išsikreivavimo aukštis yra proporcingas mikronelygumų aukščiui.

### Tyrimo procesas

Naudojant „SolidWorks“ paketą sudarytas „Omega“ formos sinusoidės profilis, kurį reikės frezuoti.

3D „Omega“ formos sinusoidės profilio erdvinis modelis iš „SolidWorks“ programos perkeliamas į „PowerMill“ paketą, kuriuo sugeneruoti „NC“ kodai „Omega“ formos sinusoidės profiliui apdirbti. Sinusoidės profilio įrankio apdirbimo trajektorija pateikta 4 pav.



4 pav. „Omega“ formos sinusoidės profilio įrankio apdirbimo trajektorijos sudarymas

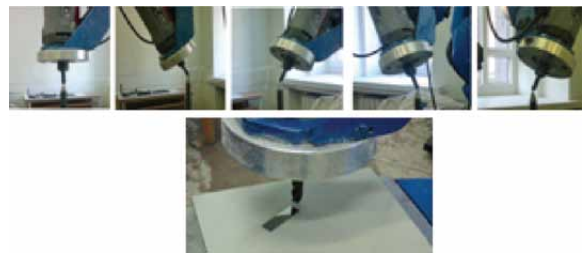
Fig. 4. Creating a path for machining *Omega* shaped tool having a sinusoidal profile

Pagal sudarytą profilį, naudojant „PowerMill“ paketą, sugeneruoti „NC“ kodai. Sugeneravus „NC“ kodus, apdirbimo programa perkeliama į „IRBCAM“ programą ir „NC“ kodai paverčiami robotui „Motoman SSF2000“ suprantama „Inform III“ kalba.

Norint patikrinti, ar programa sudaryta teisingai, buvo naudota simuliacija. Simuliacijos metu įsitikinta, kad programa yra sudaryta teisingai ir nėra nepasiekiamų vietų.

Tolesniame etape robotas „Motoman SSF-2000“ paruošiamas apdirbti, t. y. sukalibruojamas įrankis (5 pav.). Siekiant apdirbimo metu užtikrinti roboto tikslus tiesiaiegius ir sukamuosius judesius, roboto įrankis kalibruojamas nuo atskaitinio taško iš keturių pozicijų 30° kampu. Taip pat nustatyta įrankio padėtis ruošinio atžvilgiu. Informacija apie įrankio padėtį automatiškai užregistruota roboto valdymo bloke.

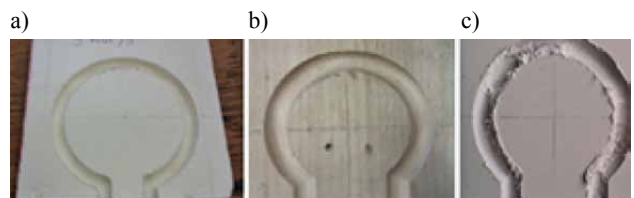
Paskutiniame etape, naudojant „Total Comander“ programą, „Inform III“ kodai perkelti į „NX 100“ roboto valdymo bloką.



5 pav. Roboto įrankio kalibravimas

Fig. 5. The calibration of the robot-tool

Programavimo 3 pultu nustačius reikiamus parametrus atliekamas mechaninis apdirbimas ir gaunamas numatytas profilis apdirbant skirtingas medžiagas (6 pav.). Prototipai apdirbti esant įvairioms pastūmoms (3 mm/s, 5 mm/s, 10 mm/s) ir vienodam sukimosi greičiui (10 000 aps./min).

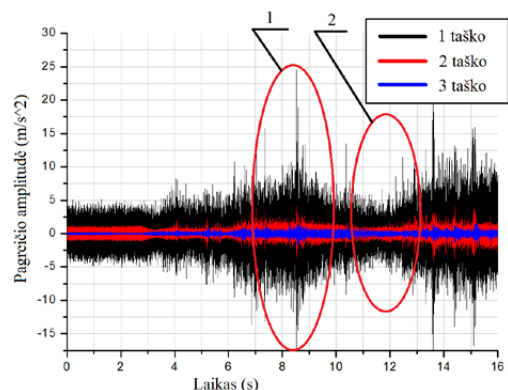


6 pav. Apdirbti „Omega“ formos sinusoidės profiliai: a – ekstruzinis polistirenas, b – mediena; c – polipropilenas

Fig. 6. Machined profiles of *Omega* shaped sinusoid: a – extruded polystyrene, b – wood, c – polypropylene

Gauti virpesių matavimo signalai apdoroti kompiuteriu, naudojant programinius paketus „Origin 8“ ir „Pulse“.

Atsižvelgiant į roboto sukiamus virpesius, pjaunant įvairias medžiagas ir esant įvairioms pastūmoms, tiriamos sistemos sukiami virpesiai skirtinguose taškuose buvo matuojami dviejose vietose (laiko intervalas 16 s). Pradėjus roboto įrankiui frezuoti „Omega“ profilio sinusoidę, buvo nustatomi tiriamosios sistemos virpesiai (7 pav.): sinusoidės įdubimas (1 intervalas) ir iškilimas (2 intervalas).



7 pav. Analizuoti roboto sukiamų vibracijų intervalai

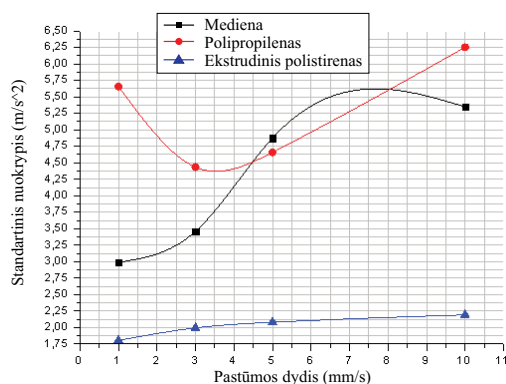
Fig. 7. Analysed intervals of robot-induced vibrations

Vertinant akcelerometrų rodmenis pagal vertikalią kryptį, didžiausi virpesiai nustatomi prie sūklinės galvutės.

Todėl buvo lyginama vertikalų virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmių prie sūklinės galvutės priklausomybė nuo pastūmos dydžio esant sinusoidės įdubimui ir iškilimui, frezuojant skirtingas medžiagas.

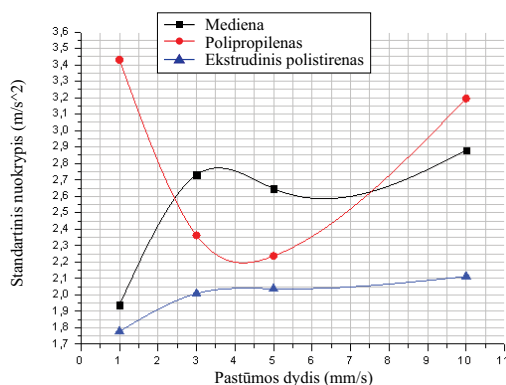
Apdirbant iš skirtingų medžiagų sudarytą sinusoidės profilį, vertikalų virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio priklausomybės nuo pastūmos dydžio pavaizduotos 8 ir 9 pav.

Iš eksperimento duomenų matyti, kad apdirbant profilį iš medienos ir ekstruzinio polistireno, vertikalų virpesių pagreičio amplitudės standartinis nuokrypis sinusoidės įdubime (1 intervalas) didėjo didinant pastūmos dydį. Frezuojant iš polipropileno mažiausia vertikalų virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmė yra esant 3 mm/s pastūmai, o didžiausia – esant 10 mm/s pastūmai.



**8 pav.** Vertikalų virpesių pagrindinės amplitudės standartinio nuokrypio priklausomybė nuo pastūmos dydžio esant sinusoidės įdubimui

**Fig. 8.** The dependence of standard deviations from the acceleration amplitude of vertical vibrations on feed rate under wave recess



**9 pav.** Vertikalų virpesių pagrindinės amplitudės standartinio nuokrypio priklausomybė nuo pastūmos dydžio esant sinusoidės iškilimui

**Fig. 9.** The dependence of standard deviations from the acceleration amplitude of vertical vibrations on feed rate under wave rise

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, esant 1 ir 10 mm/s pastūmai, pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmė skiriasi trečdaliu. Esant 3 ir 5 mm/s pastūmoms, pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės skiriasi nereikšmingai.

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

Išmatuotas ir apskaičiuotas kiekvieno bandinio paviršiaus šiurkštumas sinusoidės įdubime ir iškilime naudojant dvigubą mikroskopą.

Profilio mikronelygumų aukštis pagal 5 taškus:

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

čia  $E$  – mikroskopo objektyvo koeficientas ( $E = 0,170$ ).

Paviršiaus šiurkštumo rezultatai pateikti 1–3 lentelėse.

**1 lentelė.** Medienos bandinių paviršiaus šiurkštumas

**Table 1.** The roughness of the surface of wood samples

Bandinys, Nr.	Sinusoidės įdubime $R_z$ , $\mu\text{m}$	Sinusoidės iškilime $R_z$ , $\mu\text{m}$
Mediena		
1. 1 mm/s pastūma	11,44	10,87
2. 3 mm/s pastūma	16,41	15,94
2. 5 mm/s pastūma	20,52	19,03
4. 10 mm/s pastūma	22,35	21,54

**2 lentelė.** Polipropileno bandinių paviršiaus šiurkštumas

**Table 2.** The roughness of the surface of polypropylene samples

Bandinys, Nr.	Sinusoidės įdubime $R_z$ , $\mu\text{m}$	Sinusoidės iškilime $R_z$ , $\mu\text{m}$
Polipropilenas		
1. 1 mm/s pastūma	26,01	25,23
2. 3 mm/s pastūma	13,07	12,31
2. 5 mm/s pastūma	14,36	13,97
4. 10 mm/s pastūma	21,29	20,42

**3 lentelė.** Ekstruzinio polistireno bandinių paviršiaus šiurkštumas

**Table 3.** The roughness of the surface of extrudic polystyrene samples

Bandinys, Nr.	Sinusoidės įdubime $R_z$ , $\mu\text{m}$	Sinusoidės iškilime $R_z$ , $\mu\text{m}$
Ekst. polistirenas		
1. 1 mm/s pastūma	38,45	37,38
2. 3 mm/s pastūma	44,32	42,04
2. 5 mm/s pastūma	52,74	50,11
4. 10 mm/s pastūma	59,01	57,93

Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime pavaizduota (10–12 pav.).

Iš 10 ir 12 pav. matyti, kad apdirbant profilį iš medienos ir ekstruzinio polistireno, sinusoidės įdubime ir iškilime paviršiaus šiurkštumas didėjo proporcingai didinant pastūmos dydį.

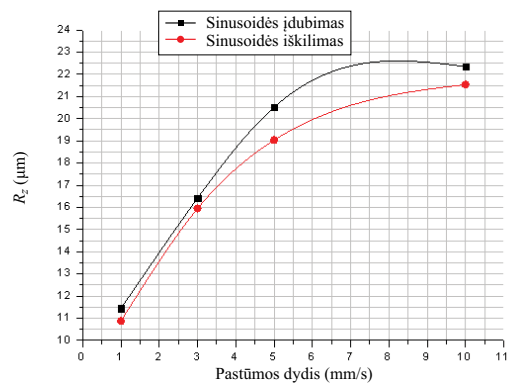
Frezuojant polipropilena (11 pav.) esant 3 mm/s pastūmai, paviršiaus šiurkštumas buvo dvigubai mažesnis, nei frezuojant esant 1 mm/s pastūmai. Didinant pastūmą iki 5 mm/s, paviršiaus šiurkštumas padidėjo 10 %. Esant 10 mm/s pastūmai, paviršiaus šiurkštumas buvo 40 % didesnis, nei esant 3 mm/s pastūmai.

### Išvados

1. Mechaninio apdirbimo metu, didėjant vertikalų virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmei, didėja apdirbamos medžiagos paviršiaus šiurkštumas.
2. Apdirbant medieną, kai yra skirtingos pastūmos, tiriamos sistemos mažiausia vertikalų virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmė ir mažiausias paviršiaus šiurkštumas pasiekiamas esant 1 mm/s pastūmai.
3. Norint pasiekti mažiausią paviršiaus šiurkštumą frezuojant polipropilena, optimaliausia pastūma yra 3 mm/s.
4. Apdirbant ekstruzinį polistireną skirtingomis pastūmomis, vertikalų virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės ir paviršiaus šiurkštumas didėjo proporcingai pastūmos dydžiui.
5. Mažiausios vertikalų virpesių pagreičio amplitudės standartinio nuokrypio reikšmės nustatytos apdirbant ekstruzinį polistireną.

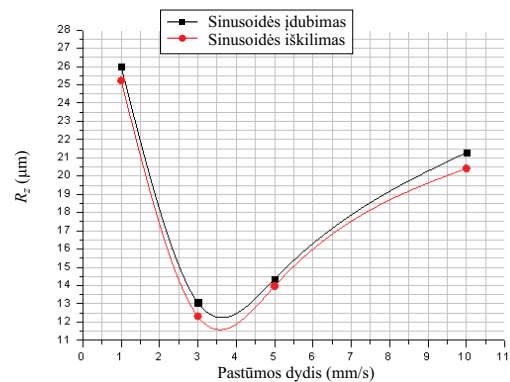
### Literatūra

- Chrysolouris, G. 2006. *Manufacturing systems – theory and practice*. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Springer-Verlag. 74 p.
- Damak, M.; Grosbois, J.; De Smet, P. 2004. Vision robot based absolute accuracy measurement-calibration and uncertainty evaluation, in *The 35th International Symposium on Robotics*. Paris: Nord Villepinte, 1–37.
- Medekšas, H. 2003. *Gaminių kokybė ir patikimumas*. Kaunas: Technologija.
- Zhang, H., et al. 2006. Chatter analysis of robotic machining process, *Journal of Materials Processing Technology* 173: 301–309. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.033>
- 3D apdirbimas ir programiniai paketai. 2004 [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.irbcam.com/>.



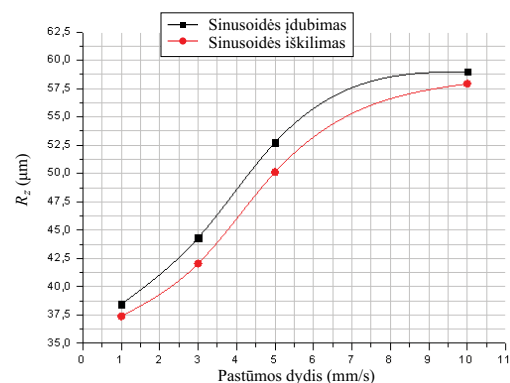
10 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime apdirbant medieną

Fig. 10. The dependence of surface roughness on feed rate under wave recession and rise in the process of wood machining



11 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime apdirbant polipropilena

Fig. 11. The dependence of surface roughness on feed rate under wave recession and rise in the process of polypropylene machining



12 pav. Paviršiaus šiurkštumo priklausomybė nuo pastūmos dydžio sinusoidės įdubime ir iškilime apdirbant ekstruzinį polistireną

Fig. 12. The dependence of surface roughness on feed rate under wave recession and rise in the process of polystyrene machining

## **RESEARCH ON MACHINING PROTOTYPES USING AN INDUSTRIAL ROBOT**

**V. Smilgin, M. Štrimaitis, M. Jurevičius**

### **Abstract**

The influence of vibrations on the quality of the processed surface is an important problem applying an industrial robot for machining prototypes. The intrinsic frequency of individual pieces of the robot may cause resonance due to vibration that appear in the machining process. The conducted experiment has investigated the activity of vibration along the process of milling wood, polypropylene and extruded polystyrene in the three-axe system. According to the influence of induced vibrations in the cutting process and considering surface roughness, feed rates for cutting taking into account every material have been chosen.

**Keywords:** prototype machining, industrial robot, machining optimization, research on vibrational activity.