

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Artis KROMANIS

**MAŠĪNU DETAĻU VIRSMU MIKROĢEOMETRIJAS TĒLPISKO
PARAMETRU TEHNOĻOGISKAIS NODROŠINĀJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

Nozare: Mašīnzinātne

Apakšnozare: Mašīnbūves tehnoloģija

Rīga 2011

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Transporta un mašīnzinību fakultāte
Mašīnbūves tehnoloģijas institūts

Artis KROMANIS

Doktora studiju programmas „Aparātu inženierija” doktorants

**MAŠĪNU DETAĻU VIRSMU MIKROĢEOMETRIJAS TĒLPISKO
PARAMETRU TEHNOĻOĢISKAIS NODROŠINĀJUMS**

Nozare: mašīnzinātne. Apakšnozare: mašīnbūves tehnoloģija

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., profesors
J.KRIZBERGS

Rīga 2011

UDK 621.9.08

Kromanis A. Mašīnu detaļu virsmu
mikroģeometrijas telpisko parametru
tehnoloģiskais nodrošinājums. Promocijas darba
kopsavilkums. – R.:RTU, 2011.-33 lpp.

Iespiests saskaņā ar MTI institūta 2011. gada
21. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 4/11

Šis darbs ir izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU
doktora studijas īstenošanai”

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g. 13. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6, 405. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.sc.ing. Vitautas Bučinskas (Vytautas Bučinskas)
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

Profesors, Dr.sc.ing. Gunārs Vērdiņš
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Dr.sc.ing. Irina Boiko
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu (vai cita) doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Artis Kromanis(Paraksts)

Datums: 25.10.2011

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 3 pielikumus, 88 attēlus, 30 tabulas, kopā 147 lappuses. Literatūras sarakstā ir 124 nosaukumi.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis un uzdevumi	5
Pētījuma metodes	5
Zinātniskā novitāte	6
Aizstāvēšanai izvirzītie pētījuma rezultāti	6
Praktiskais pielietojums	6
Autors šajā darbā aizstāv:	6
Darba aprobācija	7
Publikācijas	7
Promocijas darba apjoms un struktūras apraksts	8
PROMOCIJAS DARBA SATURS	9
Darbā izmantotie apzīmējumi un saīsinājumi	9
1. nodaļa LITERATŪRAS APSKATS	9
1.1. Virsmas raupjuma tehnoloģiskais nodrošinājums frēzēšanā	9
1.2. Virsmas raupjuma tehnoloģiskais nodrošinājums virpošanā	11
1.3. Sagataves apstrādes adaptīva vadība	12
2. nodaļa 3D VIRSMAS RAUPJUMS	13
2.1. 3D virsmas raupjuma parametri	13
2.2. 3D virsmas raupjuma mērīšana	13
3. nodaļa 3D VIRSMAS RAUPJUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE, IZMANTOJOT REGRESIJAS ANALĪZI	14
3.1. Metodikas izstrāde frēzēšanā	14
3.2. Eksperimentāla prognozēšanas modeļa izstrāde frēzēšanā	15
3.3. Prognozēšanas metodikas izstrāde virpošanā	16
3.4. Eksperimentāla prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā	17
4.1. Faziloģika, faziloģikas jēdziens, tā vēsture un attīstība	19
4.2. Faziloģikas ekspertu sistēma	19
4.3. Faziloģikas ekspertu sistēmas darbības posmi	20
4.3.1. Fazifikācija	20
4.3.2. Fazi likumu definēšana	20
4.3.3. Defazifikācija	21
4.4. Faziloģikas prognozēšanas metodikas izstrāde, izmantojot FuzzyTECH vidi	22
4.5. Eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa izstrāde frēzēšanā	22
4.5.1. Datu fazifikācija un to piederības funkciju definēšana	22
4.5.2. Fazi likumu datu bāzes izveide	24
4.5.3. Datu defazifikācija un prognozēšanas modeļa ieguve	24
4.6. Eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā	25
4.7. Fazi kontrollera vadības programma	27
5. nodaļa REGRESIJAS UN FAZILOĢIKAS 3D VIRSMAS RAUPJUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKU SALĪDZINOŠĀ ANALĪZE	27
6. nodaļa IEKĀRTA UN PAŅĒMIENS APSTRĀDES ADAPTĪVAI VADĪBAI	28
SECINĀJUMI UN PIELIETOJUMS	31
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	32

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Mūsdienās ražotajām detaļām tiek izvirzīti arvien jauni kvalitātes standarti. Viens no šādiem kvalitātes standartiem ir apstrādātās detaļas virsmas raupjums. Lielā mērā detaļas tālāko ekspluatācijas gaitu nosaka tās virsmas raupjums. Ražojot detaļas, ražotājam ir stingri jāpieturas pie uzdotajām virsmas raupjuma parametru vērtībām. Nepieciešams izstrādāt metodiku, kas atvieglotu virsmas raupjuma kontroli ražošanā un dotu iespēju prognozēt virsmas raupjuma veidošanos atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem.

Promocijas darbā virsmas raksturošanai tiek izmantoti 3D virsmas raupjuma parametri. 3D parametru priekšrocība ir spēja daudz pilnvērtīgāk raksturot apstrādātās virsmas raupjumu, nekā 2D virsmas raupjuma parametru gadījumā, jo reālos apstākļos detaļa strādā telpā – trīsdimensiju vidē. Rezultātā ir iespējams izstrādāt precīzākus matemātiskos modeļus, kas definē virsmas raupjumu atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem.

Doto pētījumu aktualitāti nosaka nepieciešamība izstrādāt precīzāku 3D virsmas raupjuma prognozēšanas metodiku un izveidot apstrādes adaptīvās vadības sistēmu, kas balstīta uz šādu 3D virsmas raupjuma prognozēšanas metodiku.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt mašīnu detaļu virsmu mikroģeometrijas telpisko parametru tehnoloģisko nodrošinājumu, kas ietver 3D virsmas raupjuma prognozēšanas metodikas izveidošanu, izmantojot regresijas analīzi un faziloģiku, un detaļas virsmas apstrādes adaptīvās vadības sistēmas izstrādi.

Mērķa sasniegšanai ir izvirzīti sekojoši uzdevumi:

1. Esošā tehnoloģiskā nodrošinājuma teorētiskā analīze un situācijas izpēte;
2. 3D virsmas raupjuma parametru izpēte;
3. Eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izveide frēzēšanā un virpošanā, izmantojot regresijas analīzi;
4. Faziloģikas pielietošanas iespēju novērtēšana prognozēšanas metodiku izveidē;
5. Eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izveide, izmantojot faziloģiku;
6. Regresijas un faziloģikas prognozēšanas modeļu salīdzinošā analīze;
7. Detaļas virsmas apstrādes adaptīvās vadības sistēmas koncepta izveide;
8. Eksperimentālās apstrādes adaptīvās vadības sistēmas simulācija.

Pētījuma metodes

Lai sasniegtu izvirzītos mērķus un realizētu dotos uzdevumus, promocijas darba izstrādes procesā pielietotas šādas pētījumu metodes: matemātiskā statistika (regresijas analīze), salīdzinošās, analītiskās un grafiskās metodes, kā arī faziloģika. Lai realizētu eksperimentālo daļu, tika izmantoti frēzēšanas un virpošanas darbagaldi, profilometrs *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50*. Regresijas analīzes izpildei tika izmantota statistiskās analīzes programma *MiniTab*. Faziloģikas uzdevumu risināšanai un rezultātu grafiskai attēlošanai tika izmantota datorprogramma *FuzzyTECH*. Pētījumu rezultātu uzskatāmības nodrošināšanai tiek izmantotas tabulas, diagrammas un attēli.

Zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir šāda:

1. Virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi tiek izveidoti, izmantojot 3D virsmas raupjuma parametrus;
2. Ieviesta faziloģikas teorija virsmu mikroģeometrijas telpisko parametru tehnoloģiskajā nodrošinājumā.
3. Izveidota metodika 3D virsmas raupjuma prognozēšanas faziloģikas modeļu iegūšanai;
4. Izveidota gan teorētiskai modelēšanai, gan praktiskiem pielietojumiem noderīga apstrādes adaptīvās vadības sistēma, izmantojot faziloģiku.

Aizstāvēšanai izvirzītie pētījuma rezultāti

1. Ar regresijas un faziloģikas palīdzību iegūti 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi gala frēzēšanai un virpošanai.
2. Iegūtas sakarības starp 3D virsmas raupjuma parametriem un tehnoloģiskajiem parametriem.
3. Novērtēta regresijas analīzes un faziloģikas prognozēšanas metodiku prognozēšanas precizitāte.
4. Izveidota apstrādes adaptīvās vadības sistēma, izmantojot faziloģiku. Uz doto izstrādni iegūts LR patents Nr. 14015 „Iekārta un paņēmieni sagataves apstrādes adaptīvai vadībai”.

Iegūtie rezultāti ir jauns ieguldījums ražošanas tehnoloģiju nozarē, mašīnu detaļu virsmu mikroģeometrijas telpisko parametru tehnoloģiskajā nodrošinājumā.

Praktiskais pielietojums

Promocijas darbā izveidotā metodika ir izmantojama virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izstrādē. Eksperimentos iegūtie dati ir izmantojami, lai tehnologi iestatītu nepieciešamos tehnoloģiskos parametrus atbilstoši vēlamajam virsmas raupjumam bez laika un darba ietilpīgās mēģinājuma apstrādes.

Izveidotā virsmas raupjuma faziloģikas prognozēšanas metodika ļauj bez ilgstošiem eksperimentiem prognozēt 3D virsmas raupjumu atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem. Faziloģikas prognozēšanas metodika nodrošina precīzāku 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izveidi nekā regresijas analīze.

Izstrādātā adaptīvās vadības sistēma, kuras pamatā ir faziloģikas ekspertu sistēma, parāda apstrādes adaptīvās vadības ieviešanas iespēju ciparvadības darba galdos. Šādas sistēmas ieviešana dod iespēju automatizēt tehnoloģisko parametru vadību darba laikā, paaugstinot darba efektivitāti.

Autors šajā darbā aizstāv:

- 1) Izstrādāto metodi 3D virsmas raupjuma prognozēšanai atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem, ieviešot faziloģiku;
- 2) Metodes praktisko pielietojumu:
 - a) 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi frēzēšanā un virpošanā;
 - b) modeļu novērtējums;
- 3) Apstrādes adaptīvās vadības sistēmas izveidi, izmantojot faziloģiku.

Darba aprobācija

Par promocijas darba galvenajiem atzinumiem un rezultātiem sniegti ziņojumi sekojošās konferencēs un semināros:

- 6th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering, Tallina, 2008.gada 24.-26.aprīlis.
- The 2nd Manufacturing Engineering Society International Conference CISIF'07 – MESIC'07, Madrid, 2007.gada 9.-11.jūlijs.
- RTU 47. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, 2006.gada 12.-14.oktobris.
- 10th International Research/Expert Conference „Trends in the Development of machinery and Associated Technology”, Barcelona-Lloret de Mar, 2006.gada 11.-15.septembris.
- 5th International DAAAM Baltic Conference „Industrial Engineering – adding innovation capacity of labour force and entrepreneurs”, Tallinn, 2006.gada 20.-22.aprīlis.
- Latvijas mehānikas inženieru seminārs. Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2006. gada 16. maijs.

Publikācijas

Par veikto pētījumu izstrādi un rezultātiem ir publicēti septiņi zinātniskie raksti un viens patents:

1. Kromanis A., Krizbergs J. Prediction of surface roughness in end-milling using fuzzy logic and its comparison to regression analysis. Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium, Vienna, Austria, 2009, pp. 803 – 804.
2. Kromanis A., Krizbergs J. Frēzēšanas virsmas raupjuma prognozēšana ar faziloģikas palīdzību, salīdzinot ar regresijas analīzi. RTU zinātniskie raksti. Mašīnzinātne un transports. – 6. Sērija – 31. sējums – Rīga: Izdevniecība: RTU, 2009. – 75.-78. lpp.
3. Kromanis A., Krizbergs J. 3D surface roughness prediction technique in end-milling using regression analysis. 6th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering –DAAAM Conference Proceedings, Tallinn, 2008, pp. 257. – 261.
4. Kromanis A., Krizbergs J. Application of 3D surface roughness prediction technique in milling. The 2nd Manufacturing Engineering Society International Conference CISIF'07 – MESIC'07, Madrid, 2007.
5. Kromanis A., Krizbergs J. Development of 3D surface roughness prediction technique in fine turning. 10th International Research/Expert Conference „Trends in the Development of machinery and Associated Technology” TMT 2006 Conference Proceedings, Barcelona-Lloret de Mar, 2006, pp. 109. – 112.
6. Kromanis A., Krizbergs J. Methods for prediction of the surface roughness 3D parameters according to technological parameters. 5th International DAAAM Baltic Conference „Industrial Engineering – adding innovation capacity of labour force and entrepreneurs” DAAAM Conference Proceedings, Tallinn, 2006, pp. 145. – 149.
7. Rudzītis J., Torims T., Kromanis A. Three dimensional roughness effects on rough surface contact. 9th International Research/Expert Conference. „Trends in the development of Machinery and Associated technology”. TMT 2005, Antalya, Turkey, 26-30 September, 2005, pp. 57. – 60.

Izgdrojumi:

1. Kromanis A., Krizbergs J. Iekārta un paņēmiens sagataves apstrādes adaptīvai vadībai. Latvijas republikas patents Nr. 14015. Patenta īpašnieks – Rīgas Tehniskā universitāte, Patenti un Preču zīmes – 20.01.2010, 33. lpp.

Promocijas darba apjoms un struktūras apraksts

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 3 pielikumus, 96 attēlus, 36 tabulas, kopā 143 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 124 nosaukumi.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Darbā izmantotie apzīmējumi un saīsinājumi

Darbā izmantoti sekojoši apzīmējumi un saīsinājumi:

a_e – radiālais griešanas dziļums;

a_p – aksiālais griešanas dziļums;

d – griešanas dziļums;

D – frēzes diametrs;

f – padeve;

f_t – padeve uz frēzes apgriezieni;

f_z – padeve uz zobu;

FCL – *Fuzzy Control Language* – Fazi vadības valoda;

MMR – *Material Removal Rate* – Materiāla nogriešanas intensitāte;

n – rotācijas frekvence;

r – griežņa virsotnes rādiuss;

R – frēzes rādiuss;

R_a – virsmas profila vidējā aritmētiskā novirze;

R_q – virsmas profila vidējā kvadrātiskā novirze;

R_{max} – virsmas profila maksimālais augstums;

R_{zt} – teorētiskais virsmas profila augstums;

t – slīpēšanas dziļums;

S_a – virsmas vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes;

S_q – virsmas vidējā kvadrātiskā novirze no vidusplaknes;

S_{rad} – radiālā padeve;

u – izejas mainīgā vērtība;

U – fazifikācijas rezultāts;

z – frēzes zobu skaits;

φ – galvenā griezējasmens leņķis;

φ_1 – palīg-griezējasmens leņķis;

γ – skaidleņķis.

1. nodaļa LITERATŪRAS APSKATS

Šajā nodaļā analizēts zināmais tehnikas līmenis, kas saistīts ar virsmas mikroģeometrisko parametru prognozēšanu atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Promocijas darbā uzsvars likts uz diviem metālapstrādes veidiem: frēzēšanu un virpošanu, bet iegūtos darba rezultātus var izmantot arī citos apstrādes procesos.

Mūsdienās slīpēšanu, kas ir relatīvi dārgs apstrādes veids, cenšas aizstāt ar smalko virpošanu (rotācijas detaļām) vai smalko frēzēšanu (rotācijas instruments). Veicot smalkās apstrādes operācijas, sevišķi liela nozīme ir apstrādājamās detaļas virsmas raupjumam un attiecīgajiem tehnoloģiskajiem parametriem, kas iestatīti darba galdā, lai nodrošinātu vēlamo virsmas raupjumu. Praksē, lai atrastu vēlamo virsmas raupjumu, tiek veiktas vairākas eksperimentālas apstrādes, kas palielina izmaksas un patērē laiku. Lai novērstu šo trūkumu tiek izstrādātas virsmas raupjuma prognozēšanas metodikas, izmantojot dažādas tehnikas. Šajā nodaļā analizēti jau esoši risinājumi, kas paredzēti virsmas raupjuma prognozēšanai.

1.1. Virsmas raupjuma tehnoloģiskais nodrošinājums frēzēšanā

Pirmie pētījumi saistībā ar virsmas raupjumu tehnoloģisko nodrošinājumu frēzēšanā tika veikti, lietojot tīri ģeometriskas sakarības – griežņa ģeometriju un tā pārvietojumu pa

apstrādājamo virsmu. Teorētiskais virsmas raupjums var tikt raksturots ar sekojošu vienādojumu [11]:

$$Ra = \frac{f_t^2}{32(R \pm f_t n_t / \pi)}, \quad (1.1)$$

kur Ra – virsmas profila vidējā aritmētiskā novirze (μm);

n_t – frēzes zobu skaits uz griežņa;

R – frēzes rādiuss (mm);

f_t – padeve uz frēzes apgriezīenu („+” attiecas uz frēzēšanu pret padevi un „-” uz frēzēšanu padeves virzienā).

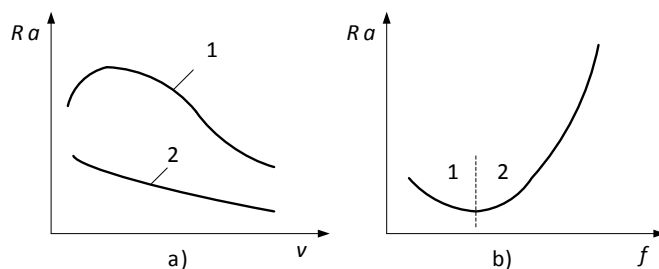
Papildus ir zināmi šādi tipiskākie vienādojumi, kas raksturo virsmas profila raupjumu (Ra , R_{zt}) atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem (f , R) [1]:

$$R_{zt} = \frac{f_z^2}{8R} \quad \text{vai} \quad (1.2)$$

$$Ra = \frac{0,0321 f_z^2}{R}, \quad (1.3)$$

kur f_z – frēzes padeve uz zobu (mm).

Dotajos vienādojumos netiek ņemti vērā tādi faktori, kā sistēmas vibrācijas un uzķepuma veidošanās, norādot tikai ģeometriskas sakarības. Praksē ir izstrādātas zināmas tipveida sakarības starp virsmas profila raupjumu un tehnoloģiskajiem parametriem (1.1. att.), kas rodas dažādu faktoru ietekmē, piemēram, uzķepuma rašanās, siltuma plūsmas maiņa griešanas zonā, instrumenta nodilums, vibrācijas, griezējasmens nodilums u.c. [18].

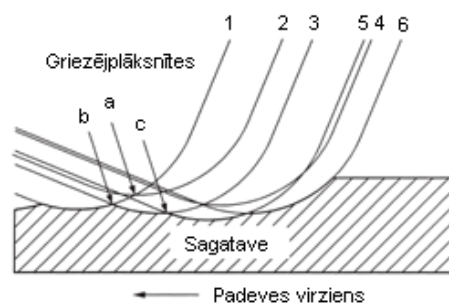


1.1. att. Tipveida sakarības a) $Ra = f(v)$ un b) $Ra = f(f)$:

- 1 – materiāliem, uz kuriem veidojas uzķepums;
- 2 – materiāliem, uz kuriem neveidojas uzķepums

1.2. attēlā redzams teorētiskais virsmas raupjuma veidošanās modelis, kad virsma tiek apstrādāta ar gala vai pieres frēzi, kam ir sešas griezējplāksnītes [1]. Šis modelis darbojas tikai tad, ja tiek pieņemts, ka pēc apstrādes virsmas profila raupjums būs relatīvi liels. Turklāt eksperimenta rezultātā secināts, ka raupjumu pārsvarā veido griezējplāksnīšu novirze aksiālā virzienā. Šāds modelis nedarbojas gadījumos, kad nepieciešams prognozēt virsmas raupjuma veidošanos relatīvi gludām virsmām.

Papildus ģeometriskajām sakarībām ir pētīta virsmas profila raupjuma prognozēšanas metode, izmantojot matemātiskās statistikas metodes. Viens no šādiem paņēmieniem ir regresijas analīze, kas ir ļoti populāra matemātiskās statistikas metode. Regresijas analīzes mērķis ir atklāt sakarības starp vairākiem mainīgajiem, šajā gadījumā prognozējot virsmas raupjumu (atkarīgo mainīgo) atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem (saistītajiem neatkarīgiem mainīgajiem). Kadrigama u.c. [8] darbā tiek pētīta



1.2. att. Virsmas profils, ko veido pieres frēze viena apgrieziena laikā

virsmas raupjuma parametru prognozēšana gala frēzēšanā, frēzējot alumīnija sakausējumu (AA6061-T6). Eksperimentālā apstrāde tika veikta noteiktā tehnoloģisko parametru diapazonā, kas parādīti 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Kadrigama eksperimenta dati, frēzējot AA6061-T6 [8]

Parametrs	1	2	3
Griešanas ātrums (m/min) x_1	100	140	180
Padeve (mm/apgr.) x_2	0,1	0,15	0,2
Aksiālais griešanas dziļums (mm) x_3	0,1	0,15	0,2
Radiālais griešanas dziļums (mm) x_4	2	3,5	5

Izpildot regresijas analīzi iegūts šāds pirmās kārtas lineārais vienādojums [34]:

$$Y = 0,5764 + 0,0049 x_1 + 3,5850 x_2 + 1,5383 x_3 - 0,016 x_4, \quad (1.4)$$

kur Y - virsmas profila raupjums (R_a – vidējais profila augstums);

x_1, x_2, x_3 un x_4 - attiecīgi griešanas ātrums, padeve, aksiālais un radiālais griešanas dziļums.

1.2. Virsmas raupjuma tehnoloģiskais nodrošinājums virpošanā

Virpošana ir viena no visizplatītākajām metālapstrādes operācijām. Virpas var aizņemt apmēram 50% no visa darbmašīnu parka [10]. Viens no visvienkāršākajiem veidiem, kā aprēķināt virsmas raupjumu atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem, ir izmantot ģeometriskās sakarības, kas rodas instrumentam mijiedarbojoties ar sagatavi. Virpošanā maksimālo virsmas profila augstumu R_{max} var noteikt izmantojot šādu sakarību [3]:

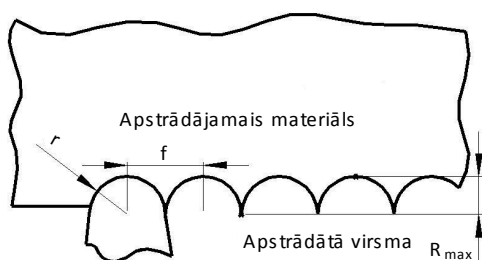
$$R_{max} = \frac{f^2}{8r}, \quad (1.5)$$

kur R_{max} – augstuma starpība starp virsmas profila raupjuma virsotni un ieplaku jeb maksimālais virsmas raupjuma augstums;

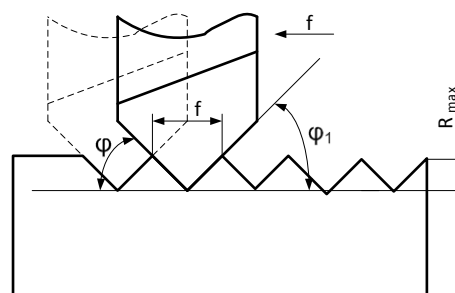
f – padeve (mm/apgr.);

r – griežņa virsotnes rādiuss (mm).

1.3. attēlā parādīta griešanas procesa (virpošana) skice, kad iegūtajam virsmas profila raupjumam tiek ņemts vērā griežņa virsotnes rādiuss r .



1.3. att. Virsmas apstrādes skice virpošanā, ņemot vērā griežņa virsotnes rādiusu r



1.4. att. Virsmas apstrādes skice virpošanā, neņemot vērā griežņa virsotnes rādiusu r

1.4. attēlā parādīta griešanas procesa (virpošana) skice, kad iegūtajam virsmas profila raupjumam tiek ņemti vērā griežņa griezējasmēņu leņķi (φ ; φ_1), neņemot vērā griežņa virsotnes rādiusu r . Šajā gadījumā R_{max} tiek izteikts ar šādu sakarību [9]:

$$R_{max} = \frac{f}{4(ctg \varphi + ctg \varphi_1)}, \quad (1.6)$$

kur φ – galvenā griezējasmēņu leņķis;

φ_1 – palīgriezējasmēņu leņķis (palīgriezējasmēņu leņķis).

Šī sakarība darbojas pie lielām padevēm f un/vai liela griešanas dziļuma t .

Līdzīgi kā minēts 1.1. apakšnodaļā, tad arī virsmas profila raupjuma prognozēšanai virpošanā tiek izmantotas matemātiskās statistikas metodes. Piemēram, Nalbanta [15] publikācijā pētīts kā mainās virsmas profila raupjums Ra atkarībā no griežņa virsotnes rādiusa r , padeves f un griešanas dziļuma d izmaiņām. Veicot eksperimentālu apstrādi un izmantojot regresijas analīzi tika iegūts sekojošs pirmās pakāpes regresijas modelis [12]:

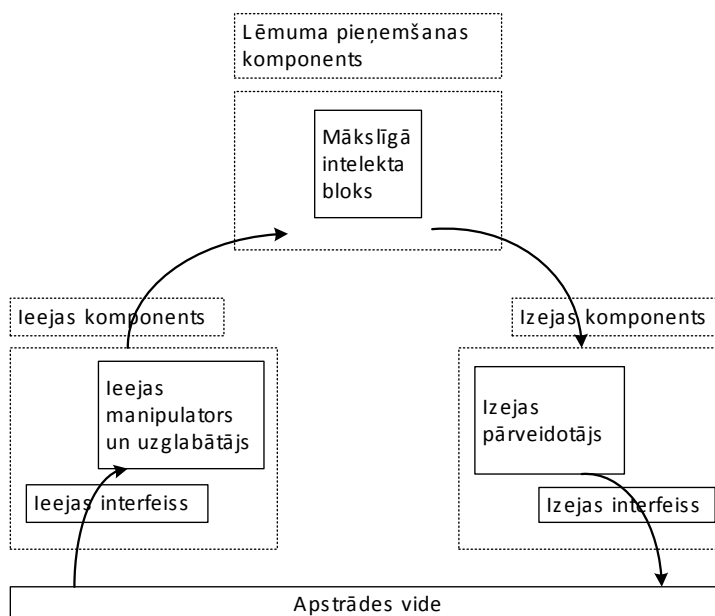
$$Ra = 0,998 + 0,376d + 0,033f - 4,86r. \quad (1.7)$$

1.3. Sagataves apstrādes adaptīva vadība

Iepriekšējās apakšnodaļās ir aplūkota virsmas profila raupjuma prognozēšana atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Viens no variantiem, kur pielietot šādus modeļus, ir to iesaistīšana ciparvadības darbā, nodrošinot automatizētu tehnoloģisko parametru vadību atkarībā no iegūstamā virsmas raupjuma.

Pilnīgi konceptuāla pieeja minētajai problēmai ir aprakstīta ASV patenta pieteikumā US2004/0098147 – „Mākslīgā intelekta ierīce un attiecīgā metode apstrādei” [14]. Patenta pieteikums ir publicēts 2004. gadā un būtībā apraksta pašus pamatus par to kāda varētu izskatīties adaptīvā vadība, nedodot nekādus tehniskos risinājumus. 1.5. attēlā ilustrēta adaptīvās vadības ideja ar sistēmas blokiem, kuru savstarpējās mijiedarbības rezultātā būtu iespējams adaptīvi vadīt apstrādes procesu.

Apstrādes adaptīvās vadības uzdevumu risināšana ir aktuāla, jo šajā virzienā darbojas tādas kompānijas kā *Ford Motor Company*, kas savu adaptīvās vadības sistēmu apraksta ASV patentā Nr. 4,926,309, „Mākslīgais intelekts virsmas raupjuma adaptīvai apstrādes vadībai” [15], un *Toyoda Koki Kabushiki Kaisha*, kas savu pieeju adaptīvās vadības problēmas risināšanā apraksta ASV patentā Nr. 5,679,053, „Metode un aparāts sagataves slīpēšanai” [16].



1.5. att. Apstrādes adaptīvās vadības koncepts, kas aprakstīts ASV patenta pieteikumā US2004/0098147 [14]

2. nodaļa 3D VIRSMAS RAUPJUMS

2.1. 3D virsmas raupjuma parametri

Industrijā virsmas profila raupjuma parametrus nosaka ISO standarts ISO 4287:1997. 3D virsmas raupjuma parametru standartizācija vēl atrodas izstrādes stadijā, taču tiem jau ir piešķirts oficiāls standarta numurs ISO 25178 [5, 6, 13]. Dažas no standarta daļām ir jau oficiāli apstiprinātas, taču dažas no standarta daļām vēl ir izstrādes stadijā. Standarta izstrāde norāda uz faktu, ka industrija ir akceptējusi izmaiņas virsmas raupjuma mērījumu nozarē un 3D raupjuma parametrus var uzskatīt par pilnvērtīgiem virsmas mikroģeometriju raksturojošiem lielumiem. ISO 25178 ietvaros ir pārstrādāti virsmas tekstūras pamati, balstot tos uz faktu, ka apkārtējā pasaule ir trīsdimensiju [2]. 3D virsmas parametri virsmas tekstūru definē pietiekami precīzi, lai no virsmas raksturlielumiem varētu noteikt tās raksturu un funkcionalitāti [5]

Piemēram, vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes Sa ir definēta ar šādu vienādojumu:

$$Sa = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z(x, y) dx dy}. \quad (2.1)$$

2.1. tabulā ir attēloti plašāk lietotie 3D virsmas raupjuma parametri, kas atrodami standartā ISO 25178.

2.1. tabula

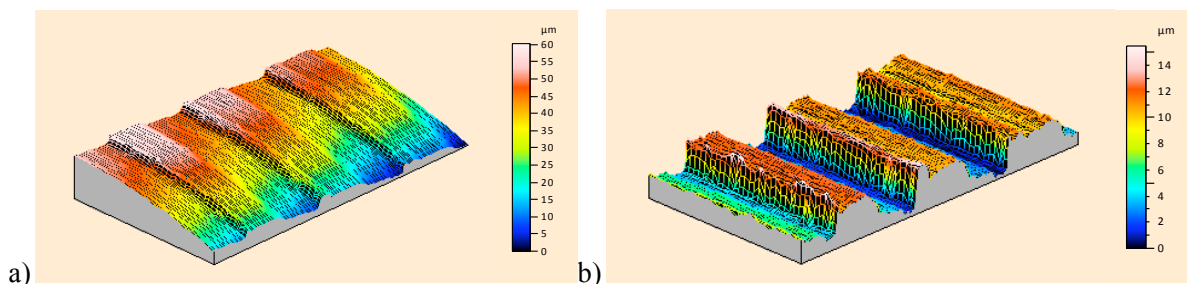
Plašāk lietotie 3D virsmas raupjuma parametri atbilstoši standartam ISO 25178

Nr.	Parametra simbols un nosaukums
1.	Sa – vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes (μm).
2.	Sq – vidējā kvadrātiskā novirze no vidusplaknes (μm). Izskaitļo virsmas amplitūdu efektīvo vērtību.
3.	Sp – virsmas visaugstākā virsotne (μm). Augstums starp vidusplakni un visaugstāko virsotni izmērītās virsmas robežās.

Promocijas darbā tiek lietots viens no visizplatītākajiem 3D raupjuma parametriem Sa (vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes), līdzīgi kā ir 2D raupjuma parametrs Ra , kas ir visbiežāk izmantojamais raupjuma raksturojošais parametrs mašīnbūvē.

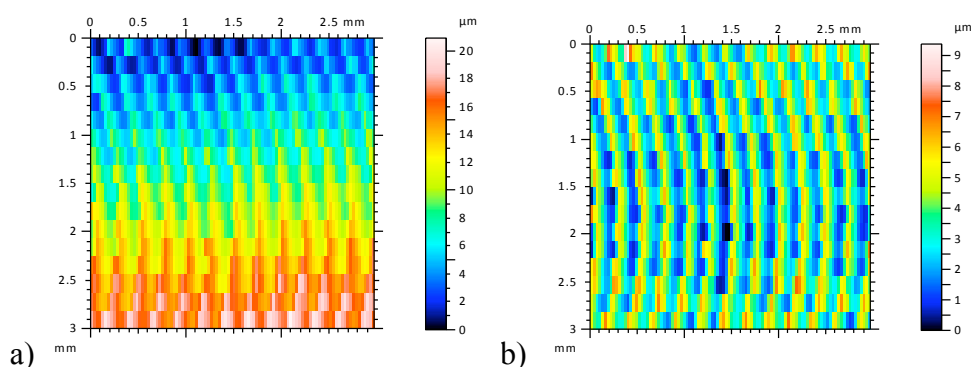
2.2. 3D virsmas raupjuma mērīšana

Promocijas darbā 3D virsmas raupjuma mērījumos tika izmantots *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50* formas mērītājs. Šajā ierīcē ir iebūvēta taustes zonde jeb adata, kas mērīšanas procesā ir kontaktā ar mērāmo detaļu. Virsmas mērīšanas laikā iegūtie dati tiek apstrādāti *Talysurf Intra* datorprogrammā, kas parāda izmērīto parametru vērtības, kā arī vizuāli attēlo izmērītās virsmas tekstūru. 2.1. attēlā ir redzams mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums virpotai detaļai. 2.2. attēlā ir parādīts virsmas raupjuma grafiskais attēlojums pirms un pēc līmeņošanas. Līmeņošana jāveic, lai izslēgtu no 3D virsmas raupjuma parametriem virsmas viļņainību un citas ģeometriskās neregularitātes, kas neattiecas uz virsmas raupjuma parametriem. Viena no sistēmas priekšrocībām ir tā, ka katra mērījuma datu failā digitālā formā tiek uzglabāta informācija par konkrēto virsmu. No šī faila jebkurā brīdī var izgūt jebkuru no nepieciešamajiem parametriem, jo fails satur pirmās izcelsmes datus.



2.1. att. Virpoto paraugu virsmas raupjuma mērijumu rezultātu grafiskais attēlojums aksonometrijā:

a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas



2.2. att. Frēzēto paraugu virsmas raupjuma mērijumu rezultātu grafiskais attēlojums:

a) izmērītā mikropogrāfiskā karte pirms līmeņošanas; b) pēc līmeņošanas

3. nodaļa 3D VIRSMAS RAUPJUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE, IZMANTOJOT REGRESIJAS ANALĪZI

3.1. Metodikas izstrāde frēzēšanā

Regresijas analīze sākas ar atkarīgo mainīgo un saistīto neatkarīgo mainīgo definēšanu. Sākotnēji tiek izveidots vienādojums, kas attēlo funkcionālo saistību starp atkarīgo mainīgo un neatkarīgajiem mainīgiem:

$$Sa = C \cdot f^{a_1} \cdot H^{a_2} \cdot v^{a_3} \cdot d^{a_4}, \quad (3.1)$$

kur atkarīgais mainīgais ir Sa , bet neatkarīgie mainīgie ir

f – darba padeve (mm/apgr. vai mm/zobu);

H – sagataves materiāla cietība;

v – griešanas ātrums (m/min);

d – griešanas dziļums (mm);

C – regresijas vienādojuma konstante.

Nākamais solis ir (3.1) transformācija no nelineāras formas uz sekojošu lineāru matemātisku formu, izmantojot logaritmisko transformāciju:

$$\ln Sa = \ln C + a_1 \ln f + a_2 \ln h + a_3 \ln v + a_4 \ln d \quad (3.2)$$

Tālāk (3.2) var uzrakstīt vienkāršotā formā:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4, \quad (3.3)$$

kur y – aprēķināmais/izmērītais virsmas raupjuma parametrs pēc logaritmiskās transformācijas;

b_0, b_1, b_2, b_3 un b_4 – regresijas koeficienti;

x_1, x_2, x_3 un x_4 – tehnoloģisko parametru logaritmiskās transformācijas.

Tālāk izmantojot statistiskās analīzes programmu *MiniTab* un tajā esošo regresijas analīzes rīku, tiek iegūtas b_0, b_1, b_2, b_3 un b_4 vērtības. Ievietojot minētās vērtības (3.3), tiek iegūts procesu raksturojošs matemātisks modelis. Turpinot analīzi iespējams izveidot arī otrās kārtas vienādojumu, iekļaujot tehnoloģisko parametru savstarpējo reizinājumu. Šajā gadījumā no (3.3) ir iespējams iegūt šādu otrās kārtas vienādojumu:

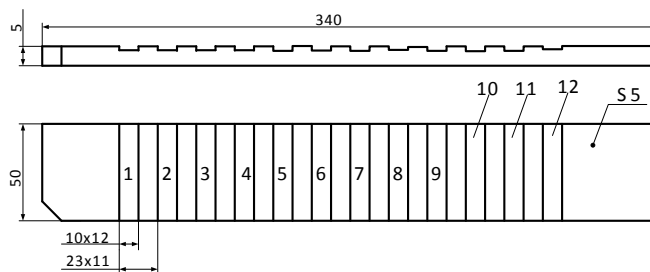
$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_1x_2 + b_7x_1x_3 + b_8x_1x_4 + b_9x_1x_5 + b_{10}x_2x_3 + b_{11}x_2x_4 + b_{12}x_2x_5 + b_{13}x_3x_4 + b_{14}x_3x_5 + b_{17}x_4x_5 + b_{18}x_1x_1 + b_{19}x_2x_2 + b_{20}x_3x_3 + b_{21}x_4x_4 + b_{22}x_5x_5. \quad (3.4)$$

Šajā darbā vienādojumi veidoti tikai no tādiem tehnoloģiskajiem parametriem, kas ir maināmi paša apstrādes procesa gaitā: griešanas ātrums v , griešanas dziļums d un padeve f . Tādējādi no iegūtajiem apstrādes modeļiem ir iespējams izstrādāt adaptīvas darba galdu vadības sistēmas, kas ļauj mainīt tehnoloģiskos parametrus tiešsaistes režīmā, iegūstot vēlamu virsmas raupjumu.

3.2. Eksperimentāla prognozēšanas modeļa izstrāde frēzēšanā

Eksperimenta mērķis ir atrast sakarības starp apstrādātās virsmas raupjumu Sa un virsmas apstrādei izmantotajiem tehnoloģiskajiem parametriem (griešanas ātrumu v (m/min); padevi f (mm/apgr. vai mm/zobu); griešanas dziļumu d (mm)), kuru vērtības attēlotas 3.1. tabulā. Pēc detaļas apstrādes ar gala frēzi tiek izmērīts apstrādātās virsmas raupjums Sa (skat. 3.1. tabulu) un empīriski noteikta virsmas raupjuma parametru atkarība no tehnoloģiskajiem parametriem jeb izveidots 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modelis.

Pirmajā eksperimentā apstrādei tiek izmantota nerūsējošā tērauda plāksne (Stainless steel EN 1.4301 – X5CrNi18-10), kuras skice ilustrēta 3.1. attēlā. Apstrāde veikta ar četru zobu cietkausējuma gala frēzi ar diametru 10 mm.



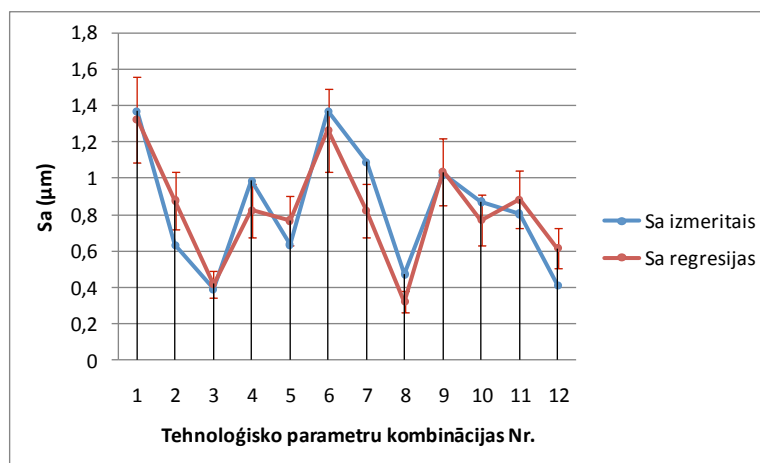
3.1. att. Apstrādājamā materiāla skice ar tajā atzīmētām frēzēšanas rievām

Eksperimenta dati X5CrNi18-10 frēzēšanā

Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)	$Sa_{izmēr}$ (μm)	$Sa_{aprēķ}$ (μm)	ΔSa	$\Delta Sa\%$
1.	0,25	1,5	190	1,370	1,325	0,045	3,284
2.	0,25	0,5	190	0,631	0,879	0,248	39,303
3.	0,1	0,5	190	0,388	0,419	0,031	7,990
4.	0,1	1,5	190	0,988	0,825	0,163	16,498
5.	0,1	1,5	120	0,635	0,767	0,132	20,787
6.	0,25	1,5	120	1,370	1,267	0,103	7,518
7.	0,25	0,5	120	1,090	0,821	0,269	24,679
8.	0,1	0,5	120	0,472	0,321	0,151	31,992
9.	0,21	1	210	1,020	1,036	0,016	1,569
10.	0,13	1	210	0,871	0,770	0,101	11,596
11.	0,21	1	100	0,805	0,882	0,077	9,565
12.	0,13	1	100	0,407	0,616	0,209	51,351

Pēc materiāla apstrādes tiek veikti 3D virsmas raupjuma mērījumi un iegūts Sa (3.2. att.). Turpinājumā 3.1. tabulas dati tiek apstrādāti programmā *MiniTab* un atbilstoši 3.1. apakšnodaļā izveidotajai regresijas analīzes metodikai iegūts sekojošs frēzēšanas procesa matemātisks modelis jeb vienādojums:

$$Sa = -0,403 + 3,33f + 0,446d + 0,00140v . \quad (3.5)$$



3.2. att. Izmērītais un ar regresijas prognozēšanas modeli iegūtās 3D virsmas raupjuma vērtības, apstrādājot X5CrNi18-10

Tālāk noskaidro regresijas analīzes modeļa ticamību. Realizējot datu apstrādi, kuras rezultāti ir parādīti 3.2. attēlā, var secināt, ka modeļa prognozēšanas kļūda ir 19% (18,84%).

3.3. Prognozēšanas metodikas izstrāde virpošanā

Līdzīgi kā izstrādāta prognozēšanas metodika frēzēšanā, izmantojot regresijas analīzi (3.1. nodaļa), izstrādāta metodika arī virpošanā. Lai apstiprinātu metodikas pareizību un lietderību, veikti eksperimenti, kas plašāk aprakstīti 3.4. nodaļā.

3.4. Eksperimentāla prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā

Apstrādei tiek izmantots kalibrēts automāttērauda stieņa materiāls (11SMnPb30), realizējot virpošanu pie dažādiem režīmiem. Vienlaicīgi ar materiāla izvēli tiek izveidota 3.2. tabula ar tehnoloģiskajiem režīmiem. Pielietoti šādi tehnoloģiskie parametri: v – griešanās ātrums ($130 \leq v \leq 200$ m/min.); f – padeve ($0,1 \leq f \leq 0,4$ mm/apgr.); d – griešanas dziļums ($0,5 \leq d \leq 1,5$ mm).

3.2. tabula

Eksperimenta dati 11SMnPb30 virpošanā

Nr.	v (m/min)	f (mm/apgr.)	d (mm)	$Sa(\mu\text{m})$	Sa_{apr_1}	Sa_{apr_2}
1.	130	0,1	0,5	0,36	0,54	0,40
2.	130	0,1	1,5	0,92	0,73	0,82
3.	130	0,4	1,5	3,68	3,57	3,75
4.	130	0,4	0,5	3,36	3,38	3,36
5.	170	0,1	0,5	0,61	0,63	0,60
6.	170	0,1	1,5	0,65	0,83	0,79
7.	170	0,4	0,5	3,53	3,47	3,45
8.	170	0,4	1,5	3,66	3,67	3,62
9.	200	0,1	0,5	0,90	0,70	0,86
10.	200	0,1	1,5	0,92	0,90	0,89
11.	200	0,4	0,5	3,54	3,54	3,63
12.	200	0,4	1,5	3,64	3,74	3,63

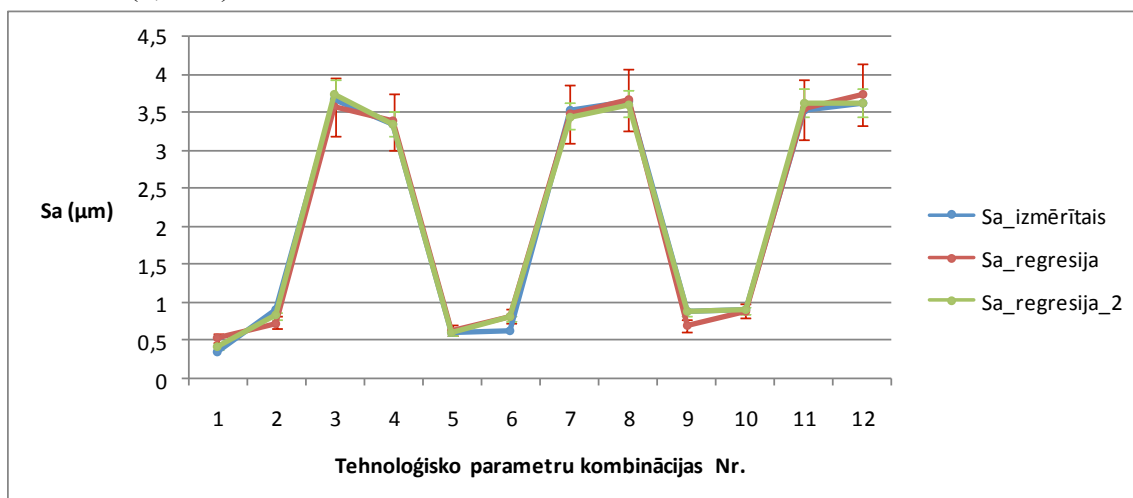
Izpildot 3.1. apakšnodaļā aprakstītos metodikas soļus un ņemot vērā 3.2. tabulā dotos lielumus, iegūts šāds regresijas modelis jeb vienādojums:

$$Sa_1 = -0,806 + 0,00234v + 9,47f + 0,195d \quad (3.6)$$

un izveidots arī otrās kārtas regresijas vienādojums:

$$Sa_2 = -0,71 - 0,0076v + 11,0f + 1,15d - 0,00863vf - 0,00561vd - 0,078fd + 0,000054v^2 \quad (3.7)$$

Rezultāti redzami 3.3. attēlā. Rezultātu analīze norāda, ka pirmās kārtas vienādojuma prognozēšanas kļūda ir 11% (11,21%), savukārt, otrās kārtas vienādojuma prognozēšanas kļūda ir 5% (5,17%).



3.3. att. 3D virsmas raupjums 11SMnPb30 virpošanas gadījumam, izmantojot regresijas analīzi

Kā otrs apstrādājams materiāls tika izvēlēts nerūsējošais tērauds (X8CrNi18 – 9) un attiecīgi tehnoloģiskie parametri: v – griešanās ātrums ($70 \leq v \leq 90$ m/min); f – padeve ($0,05 \leq f \leq 0,1$ mm/apgr.); d – griešanas dziļums ($0,5 \leq d \leq 1,5$ mm).

3.3. tabula

Eksperimenta dati, virpojot X8CrNi18 – 9

Nr.	v (m/min)	f (mm/apgr.)	d (mm)	Sa (μm)	Sa_{apr_1}	Sa_{apr_2}
1	2	3	4	5	6	7
1	80	0,05	0,5	0,78	0,71035	0,81067
2	80	0,05	1,5	0,82	0,79205	0,84802
3	80	0,10	1,5	0,92	0,90355	0,96905
4	80	0,10	0,5	0,87	0,82185	0,90835
5	90	0,05	0,5	0,81	0,90135	0,87742
6	90	0,05	1,5	0,90	0,98305	0,94727
7	90	0,10	0,5	0,95	1,01285	0,9776
8	90	0,10	1,5	1,04	1,09455	1,0708
9	100	0,05	0,5	1,14	1,09235	1,17217
10	100	0,05	1,5	1,22	1,17405	1,27452
11	100	0,10	0,5	1,21	1,20385	1,27485
12	100	0,10	1,5	1,35	1,28555	1,40055

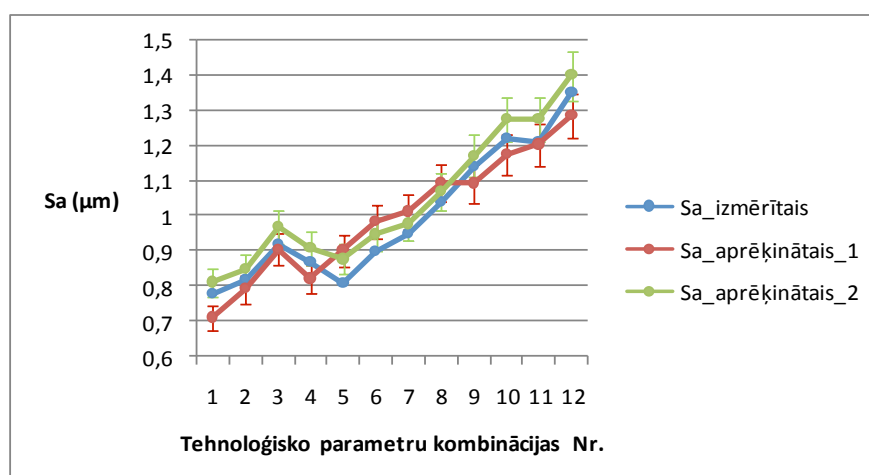
Izpildot 3.1. apakšnodaļā aprakstītos metodikas soļus, iegūts šāds regresijas modelis jeb vienādojums:

$$Sa_1 = -0,970 + 0,0191v + 2,23f + 0,0817d \quad (3.8)$$

un izveidots arī otrās kārtas regresijas vienādojums:

$$Sa_2 = 8,53 - 0,189v + 1,32f - 0,246d + 0,0050vf + 0,00325vd + 0,467fd + 0,00114vv \quad (3.9)$$

Rezultāti redzami 3.4. attēlā. Pirmās kārtas vienādojuma prognozēšanas kļūda ir 5% (5,43%), savukārt, otrās kārtas vienādojuma prognozēšanas kļūda ir 5% (5,21%).



3.4. att. 3D virsmas raupjums X8CrNi18 – 9 virpošanā, izmantojot regresijas analīzi

4. nodaļa 3D VIRSMAS RAUPJUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE, IZMANTOJOT FAZILOĢIKU

4.1. Faziloģika, faziloģikas jēdziens, tā vēsture un attīstība

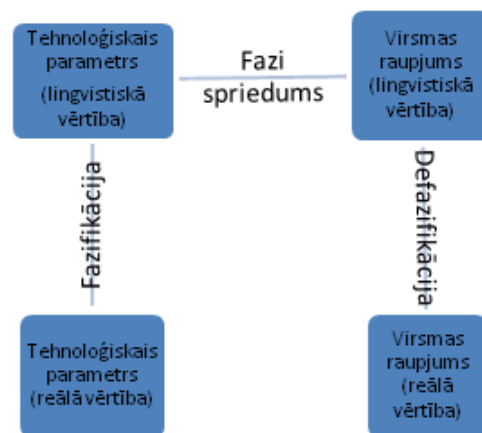
1965. gadā elektronikas un datorzinību profesors Zadehs (L.A. Zadeh) no Berkelejas universitātes publicēja savu darbu “Fuzzy sets” (neskaidrās jeb fazi kopas), kurā aprakstīja neskaidro kopu matemātiku un faziloģiku [17]. No šī darba neskaidrības loģikas teorija ieguva savu nosaukumu – faziloģika. Faziloģika ir uzskatāma par tradicionālās loģikas papildinājumu, lai būtu iespējama daļējas patiesības vērtību apstrāde – patiesuma vērtības starp “pilnīgi paties” un “pilnīgi nepaties”. Šī teorija piedāvā izmantot piederības funkcijas, kas darbojas robežās no 0 (nepaties) līdz 1 (paties).

Faziloģika (*Fuzzy logic*) – loģika, kas speciāli izveidota zināšanu un cilvēka domāšanas procesu attēlošanai. Faziloģika tiek plaši izmantota eksperta un mākslīgā intelekta sistēmās. Atšķirībā no binārās loģikas vērtību „aplams” un „paties” vietā faziloģika operē ar loģiskiem mainīgajiem, kas pieņem veselu virkni dažādu vērtību, piemēram, „pareizi”, „nepareizi”, „ne gluži pareizi”, „vairāk vai mazāk pareizi”, „pavisam pareizi”, „klūdaini”, „ne pārāk klūdaini”, „visai klūdaini”, „augstākā mērā klūdaini”, kas to padara tuvāku cilvēka domāšanas veidam [21]. Daži faziloģikas risinājumi ir ietverti automašīnu automātiskajās pārnesumu kārbās, automātiskās veļas mazgāšanas mašīnās un helikopteros, kas klausu balsis komandām [9].

4.2. Faziloģikas ekspertu sistēma

Pēdējos gados attīstoties ražošanai, ir parādījušies jauni, uzlaboti ciparu vadības (*Computer Numerical Control – CNC*) apstrādes centri, tomēr to vadība bez cilvēka-operatora vēl nav iedomājama. Griešanas režīmu iestatīšanā un korekcijā liela vērtība tiek piešķirta tieši operatora pieredzei un dedukcijas spējam (loģikai). Šādu problēmu risināšanai ļoti noderīgas būtu faziloģikas ekspertu sistēmas [15].

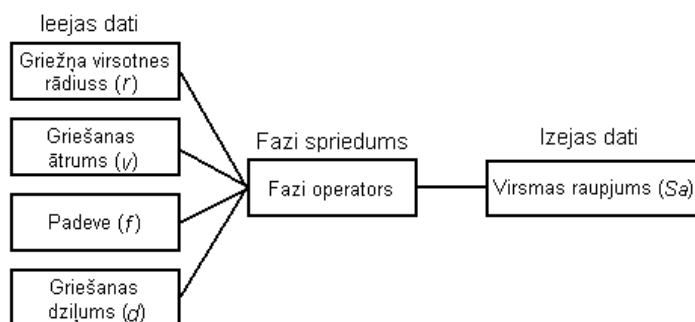
Apstrādes tehnoloģisko parametru iestatīšana ir atkarīga no tehnologa vai CNC darba galda operatora, kas bieži vien neskaidrā (*fuzzy*) un intuitīvā veidā iestata nepieciešamos tehnoloģiskos parametrus, lai sasniegtu vēlamu virsmas raupjumu, balstoties uz savu pieredzi un zināšanām. Tieši šādos gadījumos lietderīga ir faziloģikas ekspertu sistēma, jo tā apvieno cilvēku lingvistisko domāšanu ar datoru precizitāti un ātrumu. No informācijas tehnoloģiju skatu punkta fazi vadība ir uz likumiem balstīta ekspertu sistēma, taču skatoties no vadības sistēmu tehnoloģiju skatupunkta, tā galvenokārt ir nelineāru raksturlielumu lauku kontrolleris [19].



4.1.att. Faziloģikas sistēmas darbības posmi

4.3. Faziloģikas ekspertu sistēmas darbības posmi

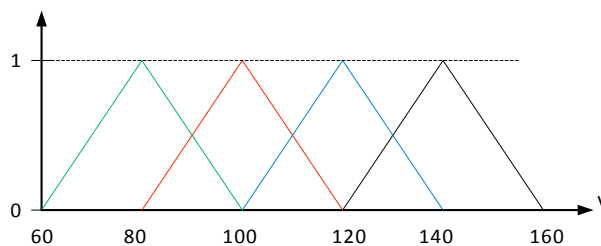
Lai izveidotu prognozēšanas sistēmu, ir jāievēro faziloģikas sistēmas darbības posmi jeb fāzes. Faziloģikas sistēmu darbībā var izdalīt 3 fāzes (4.1. att.). Pirmā fāze ir fazifikācija, kur laikā reālās vērtības, piemēram, griešanas ātrums, izmantojot piederības funkcijas, tiek izteiktas lingvistiskos lielumos – ļoti ātrs, ātrs, vidējs, lēns un ļoti lēns, utt. Otrā fāze ir fazi spriedums, kur izmantojot iepriekšējā posmā iegūtos lingvistiskos lielumus, situācija tiek novērtēta, izmantojot fazi nosacījumus jeb likumus, rezultātā iegūstot lingvistisko lielumu. Trešā fāze ietver defazifikāciju, kur iegūtais rezultāts, izmantojot rezultāta piederības funkcijas, tiek izteikts skaitliskā lielumā (piemēram, μ). Vispirms ir jādefinē sistēmas lielumu savstarpējās sakarības – kādi būs ieejas un kādi būs izejas lielumi. Promocijas darbā faziloģikas sistēma tiek adaptēta virsmas raupjuma prognozēšanas nepieciešamībai (4.2. att.).



4.2. att. Uzdevuma definēšana faziloģikas sistēmā

4.3.1. Fazifikācija

Izvēlētajiem parametriem, kas kalpos par ieejas un izejas vērtībām, piemēram, griešanas ātrumam v , padevei f , griešanas dziļumam d un 3D virsmas raupjumam Sa , ir jāizveido vērtību vai mainīgo lielumu piederības funkcijas. Šādu procesu (fazifikāciju) var uzskatīt par operatora zināšanu pārneši faziloģikas sistēmā. Katrai ieejas vērtībai tiek izveidota faziloģikas kopa ar tajā esošām piederības funkcijām, kur tās vērtība ir robežās no 0 (nepatiess) līdz 1 (pilnīgi patiess) (4.3. att.).



4.3. att. Griešanas ātruma (v) kopa ar 4 piederības funkcijām

4.3.2. Fazi likumu definēšana

Pēc fazifikācijas nākamais solis faziloģikas sistēmas izstrādē ir sprieduma mehānisma jeb likumu (*Rule*) definēšana. 4.4. attēlā ir parādīts logs likumu ievadīšanai sistēmā FuzzyTECH.

Atšķirībā no tradicionālajām sistēmām, kurās nosacījumos tiktu norādītas konkrētās mainīgo vērtības un precīzs rezultāts, šajā gadījumā tiek norādītas mainīgo un rezultātu piederības funkcijas. Empīriskās zināšanas var definēt likumos, kam ir sekojoša forma: IF

nosacījums **a** THEN spriedums **b** (JA nosacījums **a** TAD spriedums **b**). IF (ja) un THEN (tad) kalpo kā loģiskie operatori. Lingvistiskie likumi attēlo sistēmā ieliktais zināšanas.

#	IF	GriesanasDzilums	Padeve	THEN	Sa
1	small	very_small	small	1.00	extra_small
2	medium	very_small	small	1.00	very_small
3	large	very_small	small	1.00	extra_small
4	small	very_small	medium	1.00	medium
5	medium	very_small	medium	1.00	medium
6	large	very_small	medium	1.00	very_big
7	small	very_small	large	1.00	medium
8	medium	very_small	large	1.00	medium
9	large	very_small	large	1.00	very_small
10	small	small	small	1.00	very_small
11	medium	small	small	1.00	very_small

4.4. att. Fazi sprieduma mehānisma jeb likumu datu bāze

4.3.3. Defazifikācija

Defazifikācija būtībā ir pretējs process fazifikācijai. Ja ar fazifikāciju skaitliskās vērtības pārnes lingvistiskās vērtībās, tad defazifikācijā lingvistiskās vērtības pārvērš skaitliskās vērtībās. Šajā posmā tiek iegūti faziloģiskas sistēmas izejas dati. Defazifikāciju var veikt ar dažādiem instrumentiem. Viens no defazifikācijas veidiem ir vērtības noteikšana pēc smaguma centra metodes (*Centre of Gravity*) vai pēc laukuma centra metodes (*Centre of Area*), ko izsaka sekojoši:

$$U = \frac{\int_{Min}^{Max} u \mu(u) du}{\int_{Min}^{Max} \mu(u) du} \quad (4.1)$$

vai

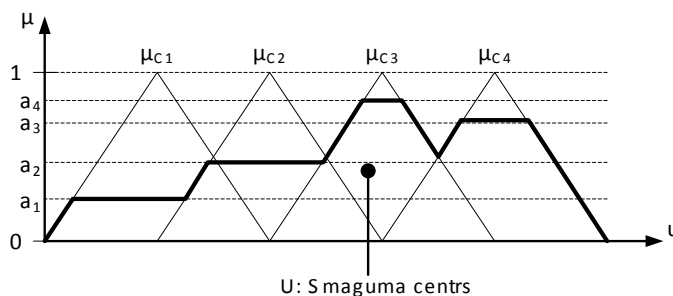
$$U = \int_{u'}^{Max'} \mu(u) du, \quad (4.2)$$

kur U – defazifikācijas rezultāts;

u – izejas mainīgais;

μ – piederības funkcija pēc summēšanas.

Šīs divas metodes ir vispopulārākās defazifikācijas realizācijai un izejas vērtību iegūšanai. 4.5. attēlā ir parādīta izejas kopa un tās defazifikācija, kuras rezultātā tiek izgūta izejas vērtība pēc smaguma centra metodes.



4.5. att. Defazifikācijas grafiskais attēlojums pēc smaguma centra metodes

4.4. Faziloģikas prognozēšanas metodikas izstrāde, izmantojot FuzzyTECH vidi

Faziloģikas prognozēšanas metodikas izveidei lietota FuzzyTECH datorprogramma. Minētā programma ietver grafiskos rīkus, kas ļauj iegūt rezultātus grafiskā formā, kā arī ļauj interaktīvi mainīt izejas vērtību, mainot ieejas vērtības.

4.5. Eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa izstrāde frēzēšanā

Viens no promocijas darba mērķiem ir izstrādāt virsmas raupjuma prognozēšanas metodiku, ar kuras palīdzību var iegūt faziloģikas prognozēšanas modeļus. Minētā mērķa realizācijai tika veikti eksperimenti, kuru rezultātā iegūti faziloģikas prognozēšanas modeļi. Izstrādātā metodika ļautu ieviest virsmas raupjuma prognozēšanas tehniku ražošanas cehā vai tehnologa darba kārtībā. Kā eksperimenta sākumdati tiek izmantoti 3. nodaļā iegūtie rezultāti, t.sk., iegūtais regresijas prognozēšanas modelis.

Funkcionālā sakarība fazi kopās tiek definēta sekojoši: $f(f; v; d) = Sa$, kur f definē nelineāro sakarību starp virsmas raupjumu Sa (fazi izejas vērtība) un padevi f , griešanas ātrumu v un griešanas dziļumu d . Fazi algoritmam ir trīs ieejas vērtības (f, v, d) un viena izejas vērtība Sa . Vispirms tiek definētas ieejas vērtības, tad dotās ieejas vērtības tiek pakļautas fazifikācijai jeb definētas faziloģikai saprotamā valodā. Tālāk fazi interfeiss ģenerē izejas vērtības, ņemot vērā iepriekš datu bāzē ievadītos fazi likumus. Noslēgumā defazifikācijas interfeiss definē izejas vērtību, kas dotajā gadījumā ir 3D virsmas raupjuma parametrs Sa . Lai izstrādātu prognozēšanas metodiku, kas balstīta uz faziloģiku, tika izmantota datorprogramma (*fuzzyTECH 5.54*), kas paredzēta faziloģikas problēmu risināšanai.

4.5.1. Datu fazifikācija un to piederības funkciju definēšana

Vispirms izpilda datu fazifikāciju jeb definē ieejas vērtības un šo ieejas vērtību piederības funkcijas. Jāpiebilst, ka liela nozīme piederības funkciju vērtību un dalījumu izvērtēšanā ir tieši paša sistēmas izstrādātāja pieredzei un kompetencei. Sistēmas izstrādātājam ir jāpārzina griešanas procesi un to radītā ietekme uz virsmas raupjumu. Daļēji šo darbu atvieglo 3. nodaļā iegūtie eksperimentu dati un secinājumi, ko var uzskatīt par sākotnējo informācijas datu bāzi. Atšķirībā no regresijas, faziloģikas prognozēšanas modeļa izstrādei ir nepieciešams kvalificēts darbspēks, kas orientējas apstrādes procesos un pārzina galvenos virsmas raupjumu ietekmējošos faktorus. Par zināšanu datu bāzi var kalpot pats tehnologs ar savām zināšanām vai uz iepriekšējiem apstrādes procesu secinājumiem uzbūvētas datu bāzes, kas šajā gadījumā ir 3. nodaļas rezultāti.

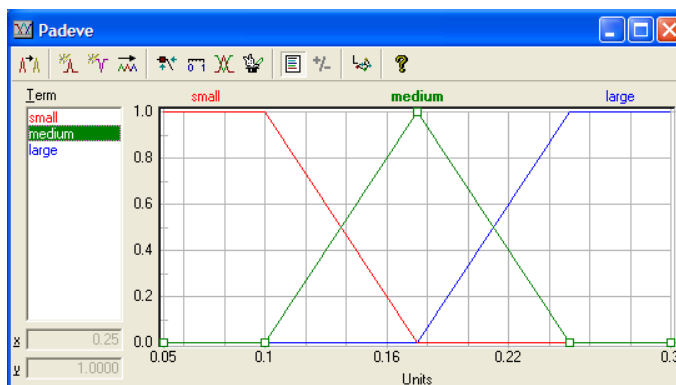
Eksperimenta ieejas vērtības tiek ņemtas no 3.1. tabulas un to robežas ir šādas: $f = 0,1 \dots 0,25$ mm/apgr.; $v = 100 \dots 210$ m/min; $d = 0,5 \dots 1,5$ mm.

Padevei tika izvēlētas trīs piederības funkcijas. Padeves rindas vektors ir $f^r = \{M, V, L\}$, kur: $M =$ mazs *small* (0,1 mm/apgr.); $V =$ vidējs *medium* (0,175 mm/apgr.); $L =$ liels *large* (0,25 mm/apgr.). Pie dotajām vērtībām atbalsta pakāpes rādītājs (DoS) ir 1 (viens). Piemēram, vidējās vērtības piederības funkcijai atbalsta pakāpe 1 (viens) ir pie 0,175, bet 0 ir pie 0,1 un 0,25. Doto sakarību var attēlot ar šādām piederības funkcijām (4.6. att.):

$$A_s(f) = \begin{cases} 1, & \text{kad } f \leq 0,1 \\ (0,1 - f)/0,075, & \text{kad } 0,1 < f < 0,175; \\ 0, & \text{kad } f \geq 0,175 \end{cases} \quad (4.3)$$

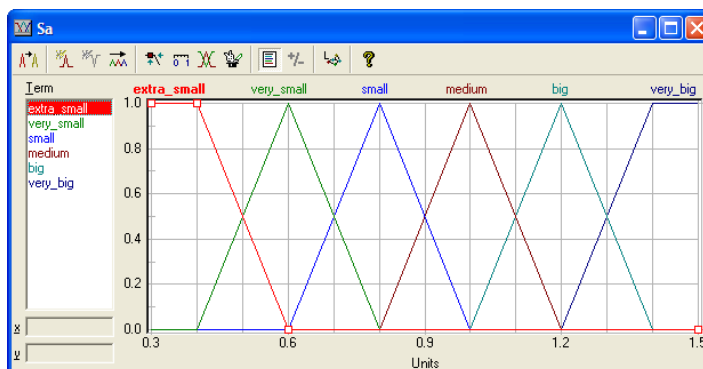
$$A_m(f) = \begin{cases} 0, & \text{kad } f \leq 0,1 \text{ vai } \geq 0,25 \\ (f - 0,1)/0,075, & \text{kad } 0,1 < f < 0,175 \\ (0,25 - f)/0,075, & \text{kad } 0,175 < f < 0,25 \\ 1, & \text{kad } f = 0,175 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$A_l(f) = \begin{cases} 0, & \text{kad } f \leq 0,175 \\ (f - 0,175)/0,075, & \text{kad } 0,175 < f < 0,25 \\ 1, & \text{kad } f \geq 0,25 \end{cases} \quad (4.5)$$



4.6. att. Trīs padeves piederības funkcijas X5CrNi18-10 frēzēšanā

Līdzīga fazifikācija procedūra tika veikta griešanas ātrumam v , izvēloties trīs piederības funkcijas. Griešanas ātruma rindas vektors ir $v^T = \{M, V, L\}$, kur: M = mazs *small* (120 m/min); V = vidējs *medium* (150 m/min); L = liels *large* (190 m/min). Griešanas dziļumam d izvēlētas piecas piederības funkcijas, ņemot vērā 3. nodaļā iegūtos rezultātus. Griešanas dziļuma rindas vektors ir $d^T = \{LM, M, V, L, LL\}$, kur: LM = ļoti mazs *very_small* (0,5 mm); M = mazs *small* (0,75 mm); V = vidējs *medium* (1 mm); L = liels *large* (1,25 mm); LL = ļoti liels *very_large* (1,5 mm).



4.7. att. Sešas 3D virsmas raupjuma Sa piederības funkcijas, frēzējot X5CrNi18-10

Virsmas raupjumam Sa , kas ir faziloģiskas izejas vērtība, tika izvēlētas sešas piederības funkcijas. Virsmas raupjuma rindas vektors ir $d^T = \{PM, LM, M, V, L, LL\}$, kur PM = pavisam mazs *extra_small* (0,4 μm); LM = ļoti mazs *very_small* (0,6 μm); M = mazs *small* (0,8 μm); V = vidējs *medium* (1 μm); L = liels *big* (1,2 μm); LL = ļoti liels *very_big* (1,4 μm). Virsmas raupjuma piederības funkcijas parādītas 4.7. attēlā.

Katram parametram iespējams izveidot pēc nepieciešamības daudz piederības funkciju. Taču dažos gadījumos pārāk liela funkciju skaita izvēle nenes vēlamo rezultātu, sistēma kļūst sarežģītāka, bet precizitātes uzlabojams nav būtisks vai vispār nav novērojams.

4.5.2. Fazi likumu datu bāzes izveide

Pēc faziloģikas piederības funkciju izveides ir nepieciešams izveidot fazi likumu datu bāzi. Minētā datu bāze sastāv no likumiem, kurus sistēmai ir jāievēro un uz kuru pamatu tiek iegūtas izejas vērtības. Dotie fazi likumi diktē mijiedarbību starp ieejas un izejas mainīgajiem, kas ļauj pieņemt atbilstošos vadības procedūras, lai sistēma strādātu ar vēlamo rezultātu, šajā gadījumā, kā jāmaina griešanas režīmi, lai iegūtu vēlamo virsmas raupjumu. 4.1. tabulā ir parādīta fazi likumu datu bāze matricas formā, kas nosaka konkrētās fazi sistēmas darbību. Minētie likumi ir izveidoti vadoties pēc 3. nodaļā iegūtajiem secinājumiem, piemēram, **ja** griešanas ātrums v ir mazs un **ja** griešanas dziļums d ir ļoti liels, un **ja** padeve f ir liela, **tad** virsmas raupjums Sa ir ļoti liels.

4.1. tabula

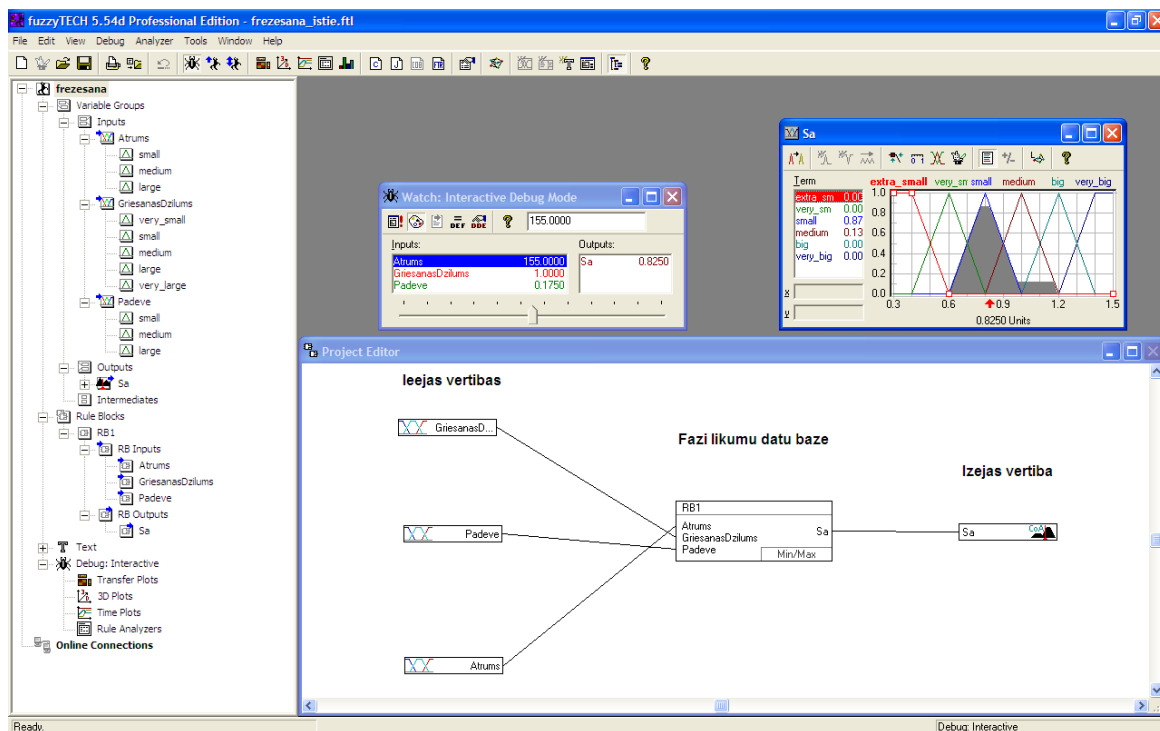
Fazi likumi matricas formā

$v \rightarrow$	mazs			vidējs			liels		
$f \rightarrow$	mazs	vidējs	liels	mazs	vidējs	liels	mazs	vidējs	liels
$d \downarrow$									
ļoti mazs	<i>PM</i>	<i>M</i>	<i>V</i>	<i>LM</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>PM</i>	<i>LM</i>	<i>LM</i>
mazs	<i>LM</i>	<i>M</i>	<i>V</i>	<i>LM</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>
vidējs	<i>PM</i>	<i>LM</i>	<i>M</i>	<i>LM</i>	<i>M</i>	<i>V</i>	<i>M</i>	<i>V</i>	<i>V</i>
liels	<i>LM</i>	<i>V</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>L</i>	<i>L</i>	<i>V</i>	<i>L</i>	<i>LL</i>
ļoti liels	<i>LM</i>	<i>V</i>	<i>LL</i>	<i>M</i>	<i>V</i>	<i>L</i>	<i>V</i>	<i>L</i>	<i>LL</i>

Pēc piederības funkciju un fazi likumu datu bāzes izveides var teikt, ka ir izstrādāts virsmas raupjuma prognozēšanas modelis atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Vēl jāveic datu defazifikācija, lai pārbaudītu modeļa prognozējamību, kā arī jāpārbauda minētā modeļa ticamība.

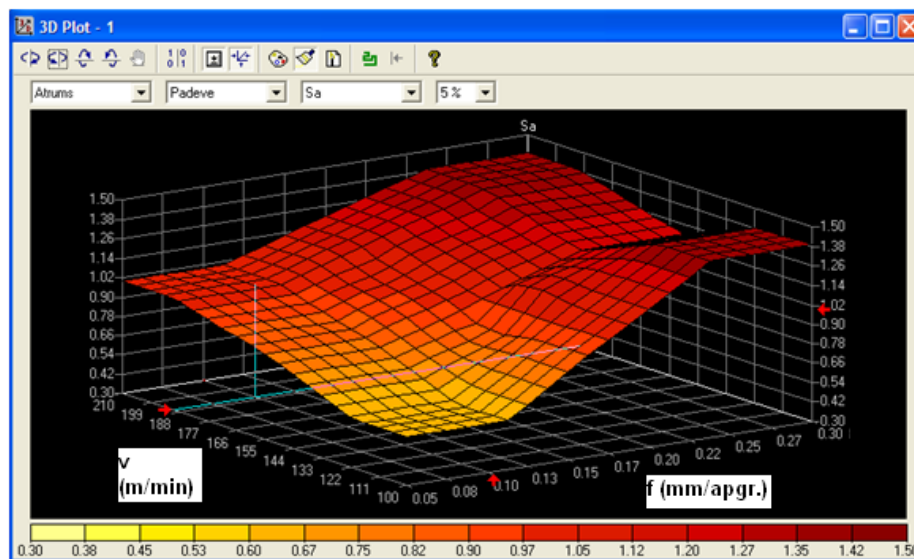
4.5.3. Datu defazifikācija un prognozēšanas modeļa ieguve

Datu defazifikācija ir lingvistisko vērtību pārvēršana skaitliskās vērtībās. 4.8. attēlā redzams fazi modelis ar atvērtiem defazifikācijas logiem. Logā ar nosaukumu „*watch: interactive debug mode*” ir iespējams interaktīvi mainīt ieejas vērtības, kas tiek apstrādātas pēc fazi likumiem, rezultātā iegūstot izejas vērtību, kas dotajā gadījumā ir virsmas raupjuma vērtība. Logā ar nosaukumu „*Sa*” tiek parādīta izejas vērtība jeb virsmas raupjuma vērtība, kā arī ir redzams pats defazifikācijas process, kur vērtība tiek noteikta pēc laukuma centa metodes.



4.8. att. Fazi modelis ar defazifikāciju X5CrNi18-10 frēzēšanā

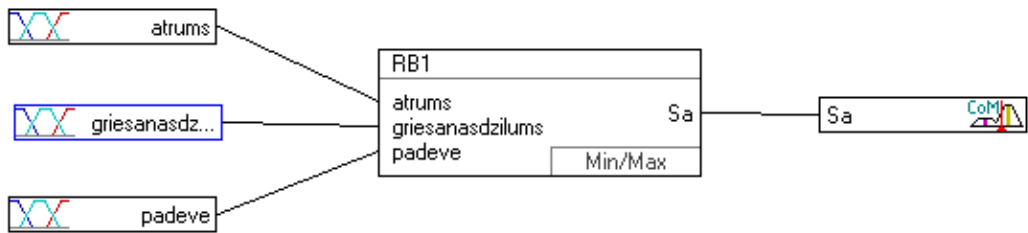
Papildus analīzē ir iespējams izgūt grafikus, kas attēlo ieejas vērtību sakarības ar izejas vērtību. 4.9. attēlā uzskatāmi parādīta virsmas raupjuma atkarība no tehnoloģiskiem parametriem – griešanas ātruma v un padeves f .



4.9. att. Trīsdimensionāls grafiks 3D virsmas raupjuma Sa atkarībai no griešanas ātruma v un padeves f , frēzējot X5CrNi18-10

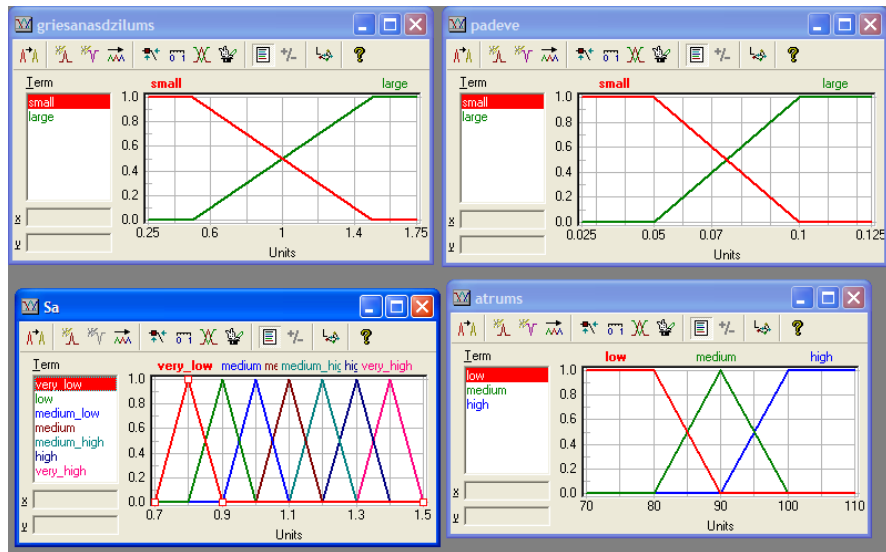
4.6. Eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā

Līdzīgi kā izklāstīts 4.5. apakšnodaļā frēzēšanas gadījumā, šeit veikta faziloģikas prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā (eksperimenta sākumdati ņemti no 4.4. apakšnodaļas), izmantojot cilindriskas nerūsējošā tērauda (X8CrNi18 – 9) sagataves. Vispirms tiek izveidota parametru sakarību blokshēma, kas redzama 4.10. attēlā.



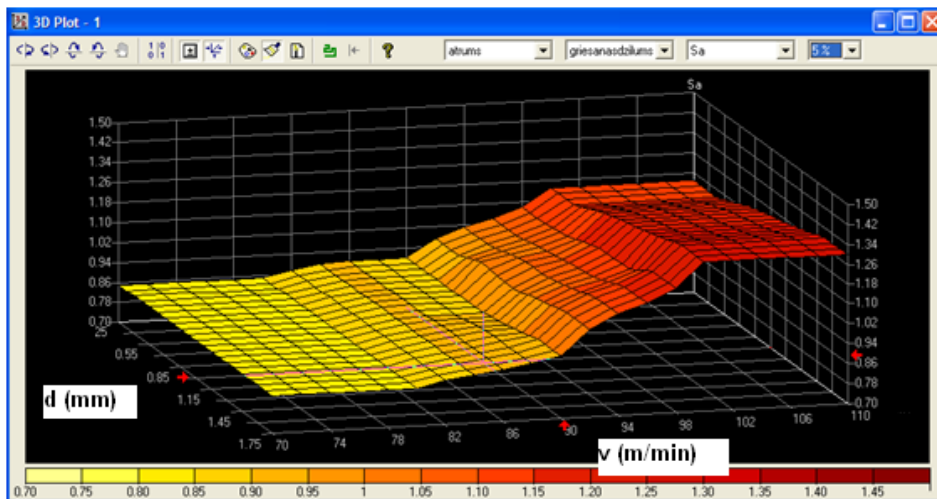
4.10. att. Procesa parametru sakarību blokshēma virpošanā

Pēc tam tiek veikta parametru fazifikācija un izveidotas to piederības funkcijas, kas parādītas 4.11. attēlā.



4.11. att. Eksperimenta parametru piederības funkcijas X8CrNi18 – 9 virpošanas gadījumā

Tam seko Fazi likumu datu bāzes izveide, tad datu defazifikācija un prognozēšanas modeļa ieguve, un rezultātu apkopošana. Telpisks virsmas raupjuma attēlojums redzams 4.12. attēlā. Pēc līdzīgas metodikas veikta virpošanas prognozēšanas modeļa izstrāde arī kalibrētam automāttēraudam (11SMnPb30). Rezultātus skatīt 5. nodaļā.



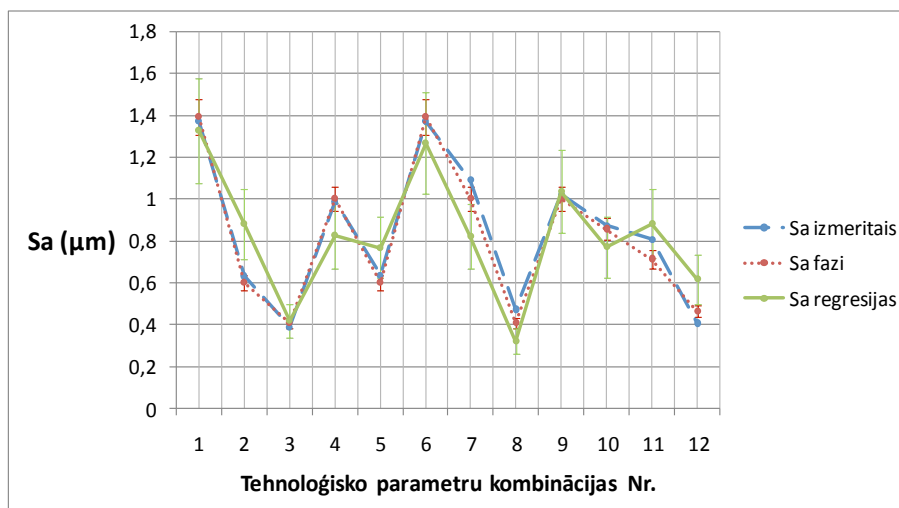
4.12. att. Trīsdimensionāls grafiks virsmas raupjuma Sa atkarībai no griešanas ātruma v un griešanas dziļuma d , virpojot X8CrNi18 – 9

4.7. Fazi kontrolera vadības programma

Pēc jaunā fazi programmas koda testēšanas to var pielietot CNC darba galda adaptīvās vadības sistēmas izveidē. Kontrolera vadības programmas kods ir uzrakstīts fazi vadības programmēšanas valodā (*Fuzzy Control Language – FCL*), kas ir Starptautiskās elektrotehniskās komisijas (IEC) publicēts standarts fazi vadības programmēšanā [16]. Pilns 3D virsmas raupjuma prognozēšanas programmas kods dots promocijas darba 1. pielikumā.

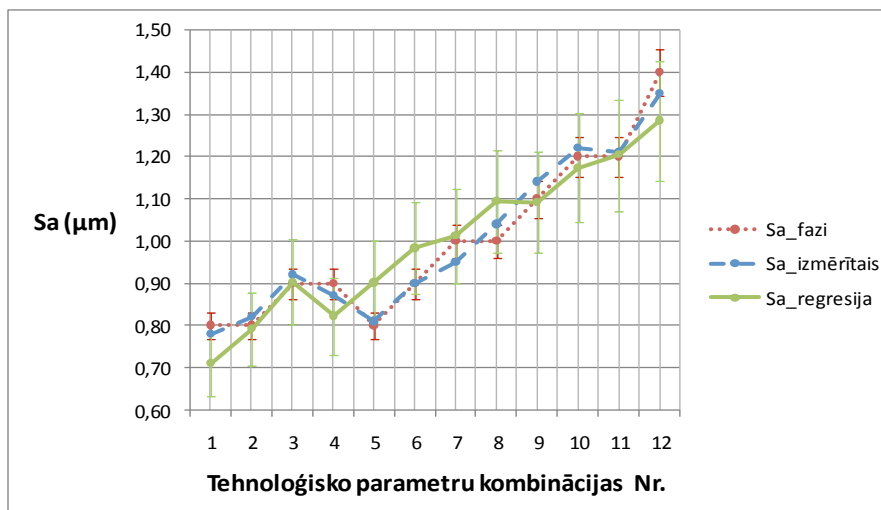
5. nodaļa REGRESIJAS UN FAZILOĢIKAS 3D VIRSMAS RAUPJUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKU SALĪDZINOŠĀ ANALĪZE

Šajā nodaļā tiek salīdzināti ar regresijas un faziloģikas metodiku iegūto prognozēšanas modeļu rezultāti. No rezultātiem, kas apkopoti 5.1. attēlā, redzams, ka 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa, kas iegūts ar faziloģikas pielietošanu, prognozēšanas kļūda ir 6%, savukārt 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa, kas iegūts ar regresijas analīzes pielietošanu, prognozēšanas kļūda ir 19%. No šī eksperimenta var secināt, ka ar faziloģikas pielietošanu var iegūt daudz precīzāku 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeli atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem.



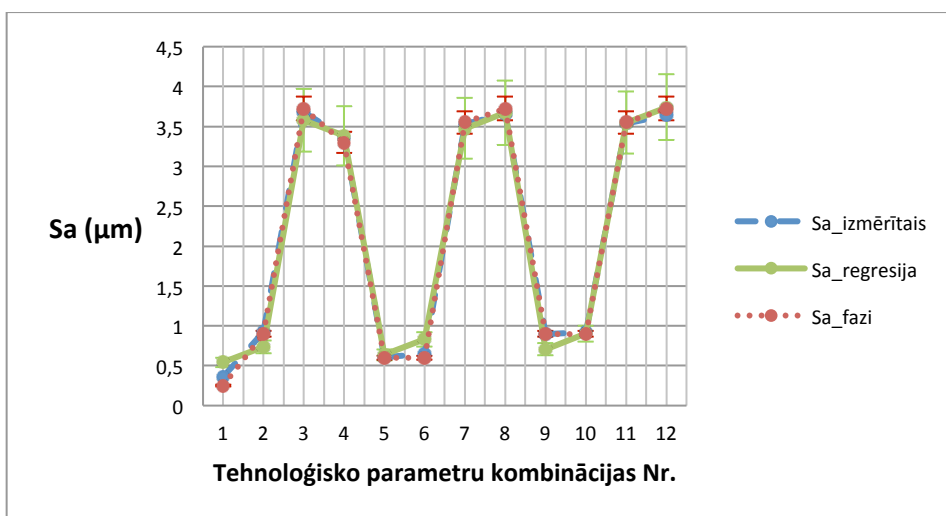
5.1. att. 3D virsmas raupjuma parametru salīdzinošais grafiks, frēzējot X5CrNi18-10

No rezultātiem, kas apkopoti 5.2. attēlā, redzams, ka 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa, kas iegūts ar faziloģikas pielietošanu, prognozēšanas kļūda ir 4%, savukārt 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa, kas iegūts ar regresijas analīzes pielietošanu, prognozēšanas kļūda ir 6%. No šī eksperimenta var secināt, ka ar faziloģikas pielietošanu var iegūt nedaudz precīzāku 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeli atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem.



5.2. att. 3D virsmas raupjuma parametru salīdzinošais grafiks, virpojot X8CrNi18 – 9

No rezultātiem, kas apkopoti 5.3. attēlā, redzams, ka 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa, kas iegūts ar faziloģikas pielietošanu, prognozēšanas kļūda ir 4%, savukārt 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa, kas iegūts ar regresijas analīzes pielietošanu, prognozēšanas kļūda ir 11%. No šī eksperimenta var secināt, ka ar faziloģikas pielietošanu var iegūt daudz precīzāku 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeli.



5.3. att. 3D virsmas raupjuma parametru salīdzinošais grafiks, virpojot 11SMnPb30

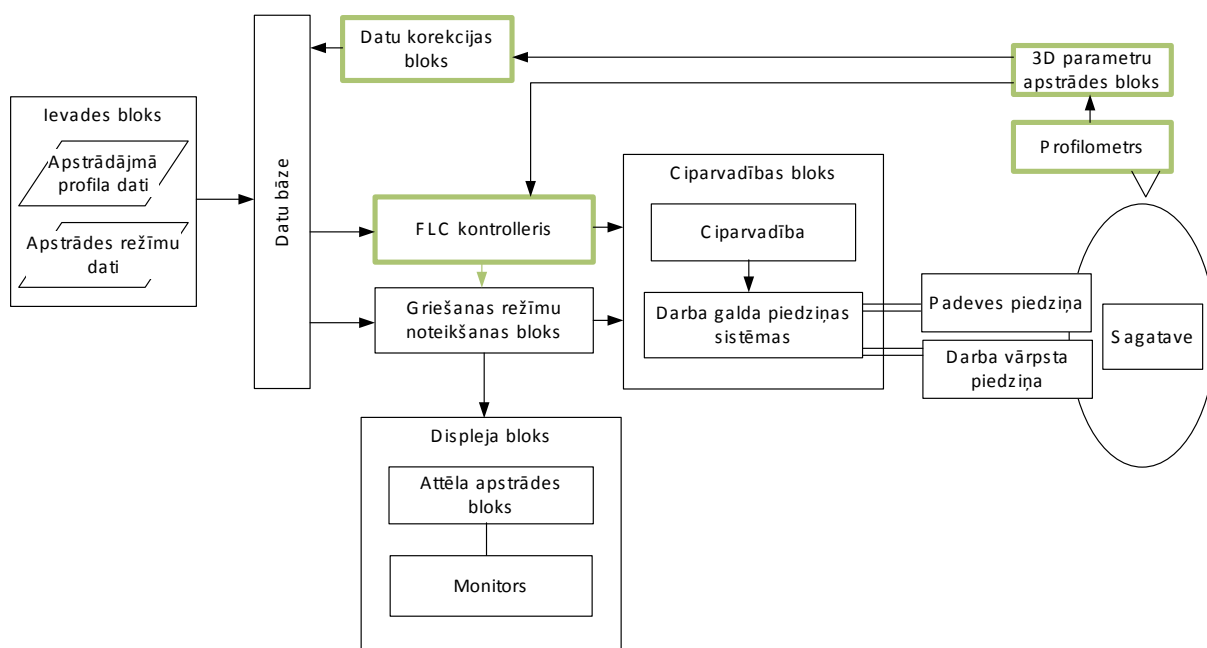
No visu eksperimentu rezultātu prognozēšanas kļūdas vērtībām var secināt, ka ar faziloģikas prognozēšanas metodikas palīdzību iegūto modeļu rezultāti ir precīzāki nekā ar regresijas prognozēšanas metodiku iegūto modeļu rezultāti.

6. nodaļa IEKĀRTA UN PAŅĒMIENS APSTRĀDES ADAPTĪVAI VADĪBAI

Promocijas darbā izstrādāta arī iekārta un paņēmiens sagataves apstrādes adaptīvai vadībai. Izstrādātās sistēmas blokshēma ir redzama 6.1. attēlā, kur ar zaļo krāsu ir parādīti tie elementi, kas tika pievienoti jau zināmā CNC vadības sistēmai (zināmā tehnikas daļa). Tiek izveidota sistēma griešanas režīmu adaptīvai vadībai atkarībā no 3D virsmas raupjuma parametriem un to izmaiņām. Sistēmas pamatā ir FLC controlleris, kas no 3D virsmas

raupjuma parametru apstrādes bloka saņem datus par 3D virsmas raupjuma izmaiņām apstrādes laikā un izmantojot faziloģiskas adaptīvās apstrādes modeli, izdod griešanas parametrus ar jaunām vērtībām, nodrošinot vēlamo 3D virsmas raupjumu apstrādes laikā. Izstrādātā sistēma realizē mašīnu detaļu virsmu mikroģeometrijas telpisko parametru tehnoloģisko nodrošinājumu.

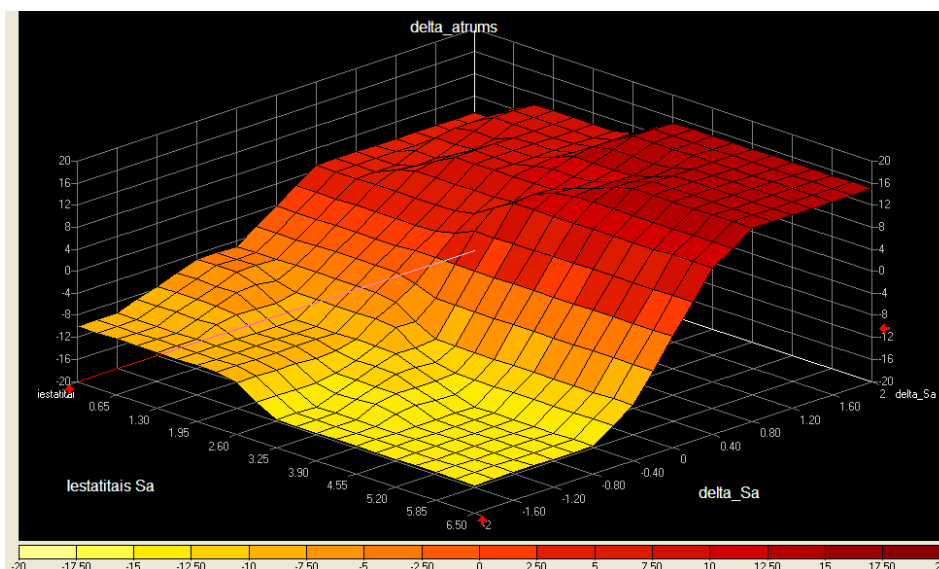
Ņemot vērā sistēmas novitāti, rūpniecisko pielietojumu un izgudrojuma līmeni, LR Patentu valdē tika iesniegts patenta pieteikums uz izgudrojuma objektu „Iekārta un paņēmieni sagataves apstrādes adaptīvai vadībai”. 2010. gada 1. janvārī uz minēto izgudrojumu tika izsniegts LR patents Nr. 14015B ar prioritāti 2009. gada 2. septembris. Patenta īpašnieks ir Rīgas Tehniskā universitāte, izgudrotāji – Artis Kromanis un Juris Krizbergs.



6.1. att. Izstrādātā adaptīvās vadības sistēmas blokshēma

Pēc apstrādes adaptīvās vadības sistēmas koncepta izstrādes, tika realizēta minētās sistēmas simulācija, lai pārliecinātos par tās efektivitāti un spēju darboties. Tika veikts eksperiments, kurā ar izstrādātās sistēmas palīdzību tika vadīts griešanas ātrums v atkarībā no iegūstāmā 3D virsmas raupjuma.

Eksperimentā tika pieņemts, ka adaptīvi vadāmais parametrs ir griešanas ātrums, kur šo parametru adaptīvi vada caur FLC kontrolleri un ciparvadības bloku (skat. 6.1. att.). Griešanas ātrums v tiek mainīts atkarībā no apstrādātās detaļas virsmas raupjuma izmaiņām $delta_Sa$. 6.2. attēlā ir ilustrēts eksperimentā iegūtais grafiks, kurā ir redzams pie kādām virsmas raupjuma izmaiņām $delta_Sa$ mainīsies griešanas ātrums $delta_atrum$. Iestatītais Sa kalpo kā 3D virsmas raupjuma atskaites vērtība, kas norāda sākotnēji iestatīto 3D virsmas raupjuma vērtību.



6.2. att. Grafiskais attēlojums, kas parāda sakarību starp iestatīto *iestatitais_Sa*, *delta_Sa* (*Sa* izmaiņas) un *delta_atrums* (griešanas ātruma izmaiņas)

Izveidojot adaptīvās vadības sistēmu un realizējot tās simulāciju tika secināts, ka faziloģikas prognozēšanas modeļi ir izmantojami apstrādes adaptīvās vadības sistēmas izveidošanā CNC darba galdos. Izveidotā adaptīvās vadības sistēma ļauj izveidot automatizētu griešanas režīmu vadības sistēmu, kas atkarībā no apstrādājamās detaļas nepieciešamā 3D virsmas raupjuma vada griešanas parametru vērtības. Izmantojot faziloģikas prognozēšanas modeļus, ir izveidojama gan teorētiskai modelēšanai, gan praktiskiem pielietojumiem noderīga adaptīvās vadības sistēma.

SECINĀJUMI UN PIELIETOJUMS

1. Pēc zināmā tehnikas līmeņa analīzes tika secināts, ka virsmas raupjuma tehnoloģiskajā nodrošinājumā prognozēšanas modeļi nav veidoti, izmantojot kombināciju – 3D virsmas raupjuma parametri un regresijas analīze vai faziloģika.
2. Faziloģikas teorija ir veiksmīgi pielietojama 3D virsmas raupjuma tehnoloģiskā nodrošinājuma uzdevumu realizācijai.
3. Izstrādāti 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi gala frēzēšanai un virpošanai dod iespēju tehnologam operatīvi izvēlēties vēlamos tehnoloģiskos parametrus, lai iegūtu nepieciešamo 3D virsmas raupjumu.
4. Novērtēta izveidoto regresijas un faziloģikas modeļu prognozēšanas kļūda. Regresijas modeļa prognozēšanas kļūda ir 19%, savukārt faziloģikas modeļa prognozēšanas kļūda ir 6% (frēzējot X5CrNi18-10). Var secināt, ka izstrādātā faziloģikas prognozēšanas modeļa iegūšanas metodika piedāvā iegūt ievērojami precīzāku 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeli.
5. Regresijas modeļa prognozēšanas kļūda virpošanā ir 6% (11SMnPb30) un 11% (X8CrNi18–9), savukārt faziloģikas modeļa prognozēšanas kļūda ir attiecīgi 4% (11SMnPb30) un 4% (X8CrNi18–9). Lai arī eksperimentā ar 11SMnPb30 abu modeļu prognozēšanas kļūda ir līdzīga, tomēr tendence saglabājas – izstrādātā faziloģikas prognozēšanas metodika spēj nodrošināt precīzāku 3D virsmas raupjuma tehnoloģisko nodrošinājumu.
6. Izstrādātā 3D virsmas raupjuma faziloģikas prognozēšanas modeļu iegūšanas metodika ļauj samazināt apstrādes procesa piestrādes laiku, attiecīgi samazinot ražošanas izmaksas un patērēto laiku. Izveidotos faziloģikas modeļus var izmantot tehnologs, lai bez papildus eksperimentālās apstrādes iestatītu nepieciešamos tehnoloģiskos parametrus, atbilstoši vēlamajam 3D virsmas raupjumam.
7. Iegūtos darba rezultātus attiecībā uz frēzēšanu un virpošanu var izmantot arī citos apstrādes procesos, piemēram, slīpēšanā.
8. Faziloģikas prognozēšanas modeļi ir izmantojami apstrādes adaptīvās vadības sistēmas izveidošanai CNC darba galdos, realizējot tos caur FLC kontrolleri, kas ir operacionāli saistīts ar CNC vadības bloku. Adaptīvās vadības sistēma dod iespēju izveidot automatizētu griešanas režīmu vadības sistēmu atkarībā no apstrādājamās detaļas nepieciešamā 3D virsmas raupjuma. Uz adaptīvās vadības sistēmu tika izsniegts Latvijas patents Nr. 14015B.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Baek D.K., Ko T.J., Kim H.S. Optimization of feed rate in a face milling operation using a surface roughness model// *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2001. – Volume 41 – pp. 451-462.
2. Blateyron F. Special issue: The new 3D standard ISO 25178 in mountains version 5// *Surface Newsletter*. – 2007. – Autumn/Winter 2007/2008 – 4 p.
3. Feng C.-X. An experimental study of the Impact of turning parameters on surface roughness// *Proceedings of the 2001 Industrial Engineering Research Conference*. – 2001. – pp. 2036-2045.
4. Feng C.-X., Wang X.-F. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning// *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2002. – Volume 20, Number 5 – pp. 348-356.
5. Griffiths B. *Manufacturing surface technology: surface integrity & functional performance*. – NY: Taylor & Francis, 2001. – 237 p.
6. Jiang X., Blunt L. *Advanced techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D surface texture standards „Surfstand”*. – London: Kogan Page Science, 2003. – 340 p.
7. Kadrigama K., Noor M.M., Zuki N.M. etc. Optimization of surface roughness in end milling on mould Aluminium alloys (AA6061-T6) using response surface method and radian basis function network// *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. – 2008. – Volume 2, Number 4 – 209-214 p.
8. Kalpakjian S., Schmidt S.R. *Manufacturing processes for engineering material*. – NY: Pearson Education Inc., 2003. – 780 p.
9. Kirby E.D., Zhang Z., Chen J.C. Development of an accelerometer-based surface roughness prediction system in turning operations using multiple regression techniques// *Journal of Industrial Technology*. – 2004. – Volume 20, Number 4. – pp. 1-8.
10. *Mašīnbūves materiāli un to apstrāde./ J.Avotiņš, V.Freimanis, I.Roze u.c. – Rīga: Zvaigzne, 1985. – 304 lpp.*
11. Montgomery D., Altintas Y. Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling// *ASME J. Eng. Ind.* – 1991. – Volume 113 – pp. 160-168.
12. Nalbant M., Gokkaya H., Toktas I. Comparison of regression and artificial neural network models for surface roughness prediction with the cutting parameters in CNC turning// *Modelling and Simulation in Engineering*. – 2007. – January 2007, Number 1. – 14 p.
13. Stout K.J., Sullivan P.J. *Workshop on the characterization of surface in 3-D// First EC workshop on 3D surface topography measurement and characterization*. – September 1991.
14. Voon W.S., Hamouda A.M.S. *Artificial intelligence device and corresponding methods for sselecting machinability*. Patent No. US 2004/0098147 A1. – 2004. – 12 p.
15. Wu C.L., Haboush R.K. *Artificial intelligence for adaptive machining control of surface finish*. Patent No. US 4926309. – 1990. – 23 p.
16. Yoneda T. *Method and apparatus for grinding a workpiece*. Patent No. EP 0562632 B1. – 1997. – 39 p.
17. Zadeh L. A. *Fuzzy Sets// Information and Control*. – 1965. – Volume 8 – pp. 338-353.
18. Яцерицын П.И., Фельдштейн Е.З., Корниевич М.А. *Теория резания*. – Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.

19. *International Electrotechnical Commission (IEC), Technical committee No. 65: industrial process measurement and control sub-committee 65 b: devices, IEC 1131 - programmable controllers, part 7 - fuzzy control programming, committee draft cd 1.0 (rel. 19 jan 97).*
20. *Brule J.F. Fuzzy Systems - A Tutorial / Internets. –*
<http://www.austinlinks.com/Fuzzy/tutorial.html>
21. *LZA Terminoloģijas komisija / Internets. –*
<http://www.termini.lv/index.php?term=fuzzy%20logic&lang=EN&terms=fuzzy>