

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

A. Kromanis

**Mašīnu detaļu virsmu mikroģeometrijas
telpisko parametru tehnoloģiskais
nodrošinājums**

PROMOCIJAS DARBS

2011

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Transporta un mašīnzinību fakultāte
Mašīnbūves tehnoloģijas institūts

Artis KROMANIS

Doktora studiju programmas „Aparātu inženierija” doktorants

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

Promocijas darbs

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

Rīga 2011

ANOTĀCIJA

Promocijas darbā „Mašīnu detaļu virsmu mikroģeometrijas telpisko parametru tehnoloģiskais nodrošinājums” izstrādāta metodika virsmas raupjuma prognozēšanai atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem, kā arī izveidota apstrādes adaptīvās vadības sistēma. Apskatīts zināmais tehnikas līmenis virsmas raupjuma prognozēšanā atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem. Papildus tam, 2D virsmas raupjuma parametru vietā tiek ieviesti 3D virsmas raupjuma parametri. Analizētas 3D virsmas raupjuma parametru priekšrocības pār 2D virsmas raupjuma parametriem. Eksperimentāli izstrādāti 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi frēzēšanā un virpošanā, izmantojot gan regresijas analīzi, gan faziloģiku. Pētīta faziloģikas iespējamība to izmantot tehnoloģiskā nodrošinājuma risinājumos. Izvērtēta regresijas un faziloģikas prognozēšanas modeļu precizitāte. Izveidots virsmas apstrādes adaptīvās vadības sistēma, izmantojot faziloģiku.

Darbs satur 147 lapas teksta, 96 attēlus, 36 tabulas, 3 pielikumus un 124 nosaukumu informācijas avotus.

ANOTATION

The title of thesis is „Technological assurance for machine part’s micro-geometry spatial parameters”. Methods for prediction of surface roughness according to technological parameters are developed as well as an adaptive control system of machining is designed. Work includes an analysis of known state of art in prediction of surface roughness according to technological parameters. In addition, 2D surface roughness parameters are replaced by 3D surface roughness parameters and analyze of advantages of 3D surface roughness parameters over 2D surface roughness parameters are conducted. 3D surface roughness prediction models are experimentally developed for milling and turning, using both regression analysis and fuzzy logic. Possibility to use fuzzy logic technology assurance solutions is studied. Accuracy of regression and fuzzy logic prediction models is evaluated. Adaptive control system of machining is created, using fuzzy logic.

The work includes 147 pages of text, 96 figures, 36 tables, 3 appendixes and 124 sources of information.

SATURS

DARBĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN SAĪSINĀJUMI	6
IEVADS	7
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	11
1.1. Virsmas raupjuma tehnoloģiskais nodrošinājums frēzēšanā.....	11
1.2. Virsmas raupjuma tehnoloģiskais nodrošinājums virpošana	22
1.3. Virsmas raupjuma tehnoloģiskais nodrošinājums citos apstrādes procesos	26
1.4. Iegūstamais virsmas raupjums atkarībā no apstrādes procesa.....	27
1.5. Sagataves apstrādes adaptīvā vadība.....	29
2. 3D VIRSMAS RAUPJUMS	32
2.1. 3D virsmas raupjuma parametri	32
2.2. 3D virsmas raupjuma mērīšana	37
3. 3D VIRSMAS RAUPJUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE, IZMANTOJOT REGRESIJAS ANALĪZI	44
3.1. Prognozēšanas metodikas izstrāde frēzēšanā	46
3.2. Eksperimentāla prognozēšanas modeļa izstrāde frēzēšanā	46
3.3. Eksperimentāla prognozēšanas modeļu izstrāde virpošanā.....	58
4. 3D VIRSMAS RAUPJUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKAS IZSTRĀDE, IZMANTOJOT FAZILOGĪKU	66
4.1. Faziloģikas jēdziens, tā vēsture un attīstība	66
4.2. Faziloģikas ekspertu sistēma.....	69
4.3. Faziloģikas ekspertu sistēmas darbības posmi	70
4.3.1. Fazifikācija	72
4.3.2. Fazi likumu definēšana.....	74
4.3.3. Defazifikācija	75
4.4. Faziloģikas prognozēšanas metodikas izstrāde <i>FuzzyTECH</i> vidē.....	76
4.5. Eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izstrāde frēzēšanā, izmantojot faziloģiku.....	77
4.5.1. Datu fazifikācija un to piederības funkcijas	79
4.5.2. Fazi likumu datu bāzes izveide	84
4.5.3. Datu defazifikācija un prognozēšanas modeļa ieguve	86
4.6. Eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izstrāde virpošanā, izmantojot faziloģiku.....	97
4.6.1. 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā, apstrādājot X8CrNi18 – 997	
4.6.2. 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā, apstrādājot 11SMnPb30.105	

4.7. 3D virsmas raupjuma faziloģikas prognozēšanas metodikas algoritms	112
4.8. Fazi kontrollera vadības programma.....	113
5. REGRESIJAS UN FAZILOĢIKAS VIRSMAS RAUPJUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKAS SALĪDZINOŠĀ ANALĪZE	115
5.1. Prognozēšanas metodikas salīdzinošā analīze frēzēšanā.....	115
5.2. Prognozēšanas metodikas salīdzinošā analīze virpošanā	119
5.2.1. 11SMnPb30 virpošana	119
5.2.2. X8CrNi18 – 9 virpošana	122
6. IEKĀRTA UN PAŅĒMIENS SAGATAVES APSTRĀDES ADAPTĪVAI VADĪBAI	125
6.1. Apstrādes adaptīvā vadības sistēmas koncepta izstrāde.....	125
6.2. Izstrādātās adaptīvā vadības sistēmas simulācija	127
SECINĀJUMI UN PIELIETOJUMS.....	135
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI.....	137
PIELIKUMI	148

DARBĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN SAĪSINĀJUMI

- a_e – radiālais griešanas dziļums;
 a_p – aksiālais griešanas dziļums;
 d – griešanas dziļums;
 D – frēzes diametrs;
EN – *European Norms* – Eiropas normas;
 f – padeve;
 f_t – padeve uz frēzes apgriezieni;
 f_z – padeve uz zobu;
FCL – *Fuzzy Control Language* – Fazi vadības valoda;
ISO – *International Organization for Standardization* – Starptautiskā standartizācijas organizācija;
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 – faziifikācijas rezultāts;
 z – frēzes zobu skaits;
 φ – galvenā griezējasmens leņķis;
 φ – palīg-griezējasmens leņķis;
 γ – skaidleņķis.

IEVADS

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. Tas sarežģī ražošanas procesu un uzliek papildus kontroli minētajām detaļām. Šī iemesla dēļ nepieciešams izstrādāt tehniku jeb 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.

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: esošā tehnoloģiskā nodrošinājuma teorētiskā analīze un situācijas izpēte; 3D virsmas raupjuma parametru izpēte; eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izveide frēzēšanā un virpošanā, izmantojot regresijas analīzi; faziloģikas pielietošanas iespēju novērtēšana prognozēšanas metodiku izveidē; eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izveide, izmantojot faziloģiku; regresijas un faziloģikas prognozēšanas modeļu salīdzinošā analīze; detaļas virsmas apstrādes adaptīvās vadības sistēmas koncepta izveide; eksperimentālās apstrādes adaptīvās vadības sistēmas simulācija.

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. Fazilōģikas uzdevumu risināšanai un rezultātu grafiskai attēlošanai tika izmantota datorprogramma FuzzyTECH. Pētījumu rezultātu uzskatāmības nodrošināšanai tiek izmantotas tabulas, diagrammas un attēli.

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir tajā, ka virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi tiek izveidoti, izmantojot 3D virsmas raupjuma parametrus. Tiek ieviesta fazilōģikas teorija virsmu mikroģeometrijas telpisko parametru tehnoloģiskajā nodrošinājumā. Izveidota metodika 3D virsmas raupjuma prognozēšanas fazilōģikas modeļu iegūšanai. Izveidota gan teorētiskai modelēšanai, gan praktiskiem pielietojumiem noderīga apstrādes adaptīvās vadības sistēma, izmantojot fazilōģiku.

Aizstāvēšanai izvirzītie pētījuma rezultāti: ar regresijas un fazilōģikas palīdzību iegūti 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi gala frēzēšanai un virpošanai; iegūtas sakarības starp 3D virsmas raupjuma parametriem un tehnoloģiskajiem parametriem; novērtēta regresijas analīzes un fazilōģikas prognozēšanas metodiku prognozēšanas precizitāte; izveidota apstrādes adaptīvās vadības sistēma, izmantojot fazilōģiku. Uz doto izstrādni iegūts LR patents Nr. 14015 „Iekārta un paņēmiens sagataves apstrādes adaptīvai vadībai”.

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

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

Izstrādātā adaptīvās vadības sistēma, kuras pamatā ir fazilōģikas 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.

Promocijas darbs sastāv no 6 nodaļām.

1. nodaļā apskatīti un analizēti zināmie virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi frēzēšanā, virpošanā un slīpēšanā, kas ir visbiežāk lietotie apstrādes veidi. Analizēts zināmais tehnikas līmenis apstrādes adaptīvās vadības sistēmām.

2. nodaļā dots 3D virsmas raupjuma parametru apraksts un izklāstīta 3D virsmas raupjuma vērtību iegūšanas metodika.

3. nodaļā aprakstīti frēzēšanas un virpošanas eksperimenti. Tiek iegūti 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi, izmantojot regresijas analīzi.

4. nodaļā dota fazilōģikas analīze. Pētīts fazilōģikas pielietojums 3D virsmas raupjuma prognozēšanai atkarībā no tehnolōģiskiem parametriem. Izveidoti 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi, izmantojot fazilōģiku.

5. nodaļā dota regresijas un fazilōģikas prognozēšanas modeļu salīdzinošā analīze.

6. nodaļā aprakstīta izstrādātā apstrādes adaptīvās vadības sistēma, kuras pamatā ir fazilōģikas un FCL kontrolera lietošana.

Darba aprobācija

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

- 6th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering, Tallina, 2008.
- The 2nd Manufacturing Engineering Society International Conference CISIF'07 – MESIC'07, Madrid, 2007.
- 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.
- 5th International DAAAM Baltic Conference „Industrial Engineering – adding innovation capacity of labour force and entrepreneurs”, Tallinn, 2006.
- 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.

Izgudrojumi:

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

1. LITERATŪRAS APSKATS

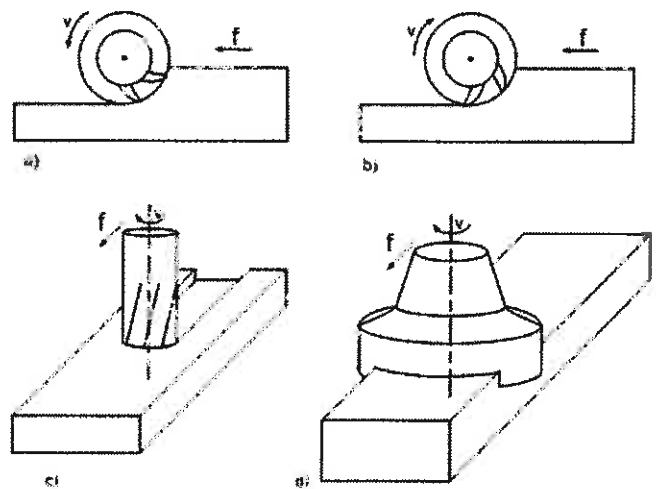
Uzsākot pētījumus, veikta zināmā tehnikas līmeņa padziļināta analīze, kas saistīta ar virsmas mikroģeometrisko parametru prognozēšanu atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Promocijas darbā uzsvars likts uz diviem metālapstrādes veidiem: frēzēšanu un virpošanu, bet iegūtos darba rezultātus var izmantot 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 vēlamu virsmas raupjumu. Praksē, lai atrastu vēlamu virsmas raupjumu, tiek veiktas vairākas eksperimentālas apstrādes, kas palielina izmaksas un patērē laiku. Lai novērstu šo trūkumu tiek izstrādāti virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi, izmantojot dažādas tehnikas. Šajā nodaļā analizēti jau esoši risinājumi, kas paredzēti virsmas raupjuma prognozēšanai.

1.1. Virsmas raupjuma tehnoloģiskais nodrošinājums frēzēšanā

Frēzēšanā materiāls no sagataves tiek aizvākts ar rotējoša griezējinstrumenta palīdzību. Tā ir viena no universālākajām metodēm, bet tajā pašā laikā viena no vissarežģītākajām apstrādes metodēm. Frēzēšanā lietotās frēzes ietver ļoti daudzveidīgus griezējinstrumentus. Tās klasificē pēc vairākām pazīmēm. Atkarībā no konstrukcijas izšķir viengabala un saliktas frēzes, atbilstoši nostiprināšanas paņēmienam – frēzes ar centrālo urbumu un ar cilindrisku vai konisku kātu, atkarībā no zobu novietojuma – frēzes ar cilindriskiem, spirālveida un radiāliem zobiem.

Izšķir vairākus frēžu tipus (1.1. att.). Ir cilindriskās frēzes (1.1.a un 1.1.b att.), ko lieto plakānu virsmu apstrādei. Pieres frēzes (1.1.d att.) var būt viengabala vai saliktas ar iestiprinātiem



1.1. att. a) cilindriskā frēze, frēzējot pret padevi (f); b) cilindriskā frēze, frēzējot padeves (f) virzienā; c) kāta frēze; d) pieres frēze

griezējasmeņiem, kas lietojamas arī plakānu virsmu apstrādei. Diskfrēzes lieto rievu, pakāpju un sānvirsmu apstrādei.

Kāta frēzes (1.1.c att.) lieto plakānu virsmu, rievu, pakāpju un līklīnijas kontūru frēzēšanai. Pieres frēzi lieto relatīvi platu virsmu apstrādei, bet kāta frēzi – profilēšanas un rievu iegriešanas operācijām. Citi pastāvošie frēžu tipi ir atvasināti no šeit minētajiem pamata tipiem. 1.1. attēlā ilustrēti galvenie frēzēšanas procesa kinemātikas un dinamikas veidi.

Promocijas darbā pētīta gala frēzēšanas ietekme uz virsmas raupjumu, kas veidojas izmantojot gala jeb kāta frēzi. Šī ir viena no visizplatītākajām frēzēšanas operācijām. Veidņu jeb līklīnijas kontūru frēzēšanā virsmas raupjumam ir īpaši liela nozīme, tāpēc ir svarīgi zināt un prognozēt virsmas raupjuma parametru vērtības atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem.

Iemeslus, kas ietekmē virsmas raupjuma veidošanos var iedalīt trīs grupās:

- 1) Griezējinstrumenta virsotnes atrašanās attiecībā pret apstrādājamo virsmu;
- 2) Apstrādājamā materiāla elastīgā un plastiskā deformācija;
- 3) Vibrācijas tehnoloģiskajā sistēmā.

Sākotnēji var pieņemt, ka virsmas raupjuma veidošanos ietekmē tikai ģeometriskie faktori – griežņa ģeometrija un tā pārvietojums pa apstrādājamo virsmu. Teorētiski virsmas raupjumu, kas aprakstīts Montgomerija un Altina darbā [49], raksturo profila vidējā aritmētiskā novirze Ra , ko izsaka ar sekojošu vienādojumu:

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

kur n_t - frēzes zobu skaits uz griežņa;

R - frēzes rādiuss (mm);

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

Tā kā šajā vienādojumā iekļautas tikai ģeometriskās sakarības, netiek ņemti vērā būtiski faktori: sistēmas vibrācijas un uzķepuma veidošanās.

Profila vidējo aritmētisko novirzi Ra raksturo šāds vienādojums [59]:

$$Ra = \frac{0,0321 f_z^2}{R}, \quad (1.2)$$

kur f_z - padeve uz zobu (mm/zobs);

R - frēzes rādiuss (mm).

Teorētisko virsmas profila augstumu R_{zt} raksturo sekojošs vienādojums [8]:

$$R_{zt} = \frac{f_z^2}{8r} \quad (1.3)$$

Pie frēzes radiālās sišanas, kad tās ģeometriskā ass nesakrīt ar rotācijas asi un ar vērtību e , turklāt nelīdzenumu profils veidojas tikai ar visvairāk izbīdītā frēzes zoba starpniecību ar patieso rotācijas rādiusu $r + e$, tiek lietots sekojošs vienādojums [8]:

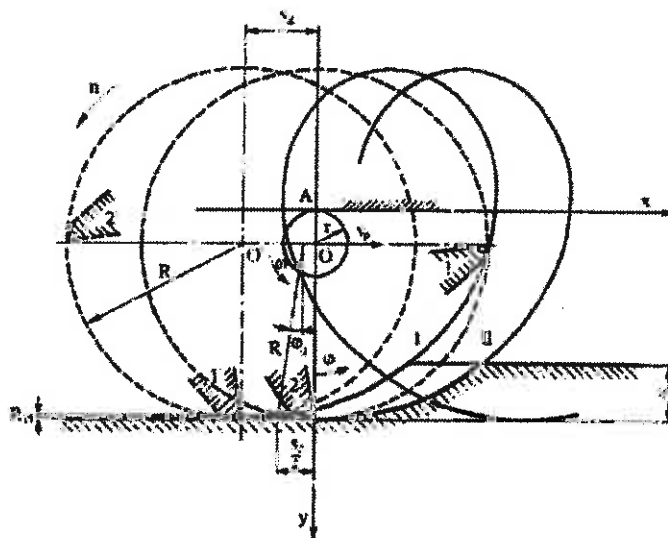
$$R_{zt} = \frac{zf_z}{8(r + e)}, \quad (1.4)$$

kur z - frēzes zobu skaits;

e - ekscentritāte (frēzes simetrijas ass nobīde attiecībā pret tās rotācijas asi).

Arī šajos vienādojumos virsmas profila raupjuma atkarība no tehnoloģiskajiem parametriem ir definēta tikai ar frēzes un apstrādājamā materiāla ģeometriskajiem parametriem.

Teorētisko raupjuma profila augstumu var noteikt, balstoties uz 1.2. attēlā ilustrēto frēzēšanas modeli pret padevi [63]. Frēzes zobs 1 veido loku I, un frēzes zobs 2 veido loku II. Frēzes ass pārvietojas virzienā no O' uz O ar ātrumu v_p . Šie divi viens otram sekojošie frēzes zobi veido virsmas profila raupjumu. Šis frēzēšanas tips ilustrēts arī 1.1. a) attēlā.



1.2. att. Modelis teorētiskai raupjuma profila augstuma noteikšanai frēzēšanai pret padevi

Teorētisko virsmas profila augstumu R_{zt} (1.2. attēlā) raksturo sekojoši vienādojumi [63]:

$$\begin{aligned}
 R_{zt} &= y_{\max} - y_z \\
 R_{zt} &= (r + R) - (r + R \cos \varphi_u) \\
 R_{zt} &= R(1 - \cos \varphi_u) \\
 R_{zt} &= \left[1 - \cos \frac{s_z}{2(R+r)} \right] \\
 R_{zt} &= \frac{R s_z^2}{8(R+r)^2}
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

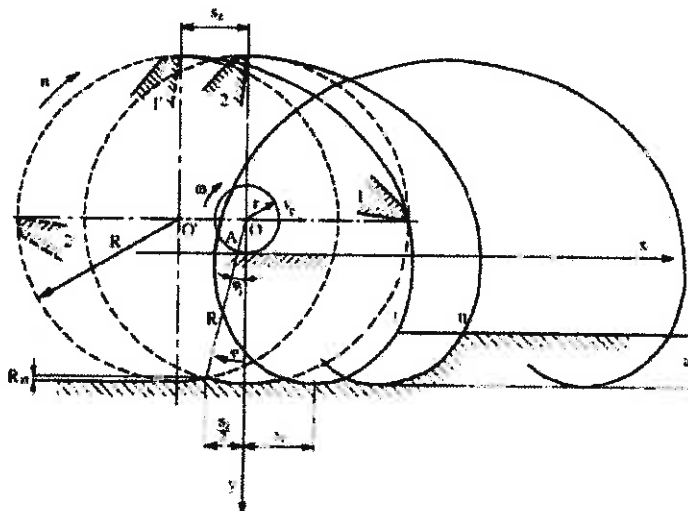
kur φ_u – padeves virziena leņķis griešanas sākumā;

s_z – padeve uz zoba;

r – cikloidālā apļa rādiuss;

R – frēzes rādiuss.

Teorētisko raupjuma profila augstumu frēzēšanā pa padevi, kā ilustrēts 1.1. b) attēlā, var noteikt, balstoties uz 1.3. attēlā ilustrēto frēzēšanas modeli. Frēzes zobs 1 veido loku I, un frēzes zobs 2 veido loku II. Frēzes ass pārvietojas virzienā no O' uz O ar ātrumu v_p . Šie divi viens otram sekojošie frēzes zobi veido virsmas profila raupjumu.



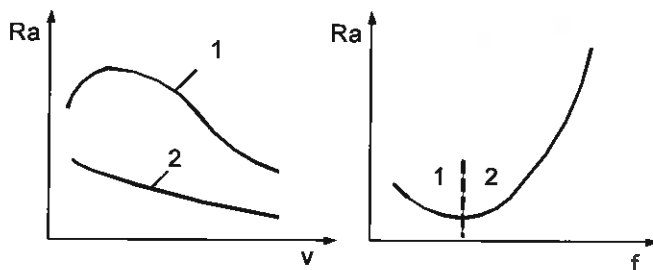
1.3. att. Modelis teorētiskai raupjuma profila augstuma noteikšanai frēzēšanai pa padevi

Teorētisko virsmas profila augstumu R_{zt} , 1.3. attēlā, raksturo sekojošs vienādojums [63]:

$$R_{zt} = \frac{R s_z^2}{8(R-r)^2} \tag{1.6}$$

Praksē novērotas zināmas tipveida sakarības starp virsmas raupjumu un tehnoloģiskajiem parametriem. Piemēram, griešanas ātruma un padeves ietekmes uz virsmas

raupjumu noteikšanā būtiska nozīme ir faktam, vai materiālam ir tendence uz uzķepuma rašanos (1.4. att.). Plašā ātruma un padeves diapazonā virsmas raupjums var vairākkārtīgi mainīties, ko nosaka šādi faktori: uzķepuma rašanās, siltuma plūsmas maiņa griešanas zonā, instrumenta nodilums, vibrācijas, griezējasmens nodilums u.c. [101].



1.4. att. Tipveida sakarības $Ra = f(v)$ un $Ra = f(f)$: 1 – materiāliem, uz kuriem veidojas uzķepums; 2 – materiāliem, uz kuriem neveidojas uzķepums

Agarvala [2] veiktajos eksperimentos atklāts, ka, palielinot griešanas ātrumu frēzēšanā, iespējams maksimizēt produktivitāti un uzlabot virsmas kvalitāti.

Frēzēšanā ar cilindriskām frēzēm (gala jeb kāta frēze) atšķirībā no virpošanas instrumenta gabarīti būtiski ietekmē garenisko virsmas profila raupjuma veidošanos (mērot gareniski galda padeves virzienam), kas vairākumā gadījumu ir lielāks par šķērsenisko virsmas raupjumu. Šī iemesla dēļ apstrādātās virsmas mērījumus veic gareniski padeves virzienam. Var uzskatīt, ka teorētiskais virsmas profila raupjums maksimālais augstums R_{zt} veidojas pēc šāda vienādojuma [59]:

$$R_{zt} = \frac{f_z^2}{8R}, \quad (1.7)$$

kur f_z - frēzes padeve uz zobu, mm;

R - frēzes griežņa virsotnes rādiuss.

Iepriekš minētie virsmas raupjuma veidošanās vienādojumi ir tikai teorētiski un to aprēķina rezultāti būtiski atšķiras no eksperimentāli iegūtiem rezultātiem. Lai izveidotu daudz precīzākus apstrādes aprēķinu modeļus, tiek veikti apstrādes eksperimenti, kur no apstrādes rezultātiem tiek veidoti empīriski apstrādes aprēķinu vienādojumi jeb modeļi.

Kadirgama u.c. [34] pētīja iespēju optimizēt virsmas raupjuma parametrus gala frēzēšanā, frēzējot alumīnija sakausējumu (AA6061-T6). Eksperimentālā apstrāde tika veikta noteiktā tehnoloģisko parametru diapazonā, kas parādīti 1.1. tabulā.

Kadirgama eksperimenta datu tabula AA6061-T6 gala frēzēšanai [34]

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

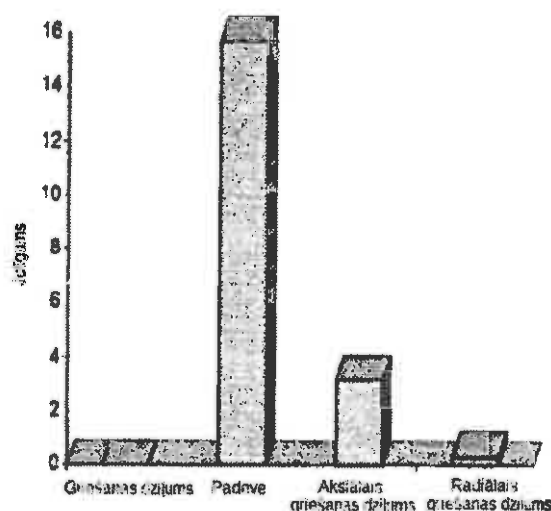
Izpildot regresijas analīzi iegūts šāds pirmās kārtas lineārais vienādojums [34]:

$$Y = 0,5764 + 0,0049 x_1 + 3,5850 x_2 + 1,5383 x_3 - 0,016 x_4, \quad (1.8)$$

kur Y - virsmas profila raupjums (Ra);

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

No vienādojuma redzams, ka, vadoties pēc skaitliskām vērtībām, pie katra koeficienta var noteikt parametru savstarpējo ietekmi uz izejas lielumu, kas šajā gadījumā ir virsmas profila raupjums. Tika secināts, ka padeve ir dominējošais faktors virsmas raupjuma veidošanās procesā, kam seko aksiālais griešanas dziļums, griešanas ātrums un radiālais griešanas dziļums. Vismazākais virsmas raupjums ir sasniedzams pie maza griešanas ātruma un aksiālā griešanas dziļuma, un lielas padeves un radiālā griešanas dziļuma. Jāpiebilst, ka pētīts procesa ekonomiskais lietderīgums – optimālie tehnoloģiskie parametri, lai apstrādātu pēc iespējas lielāku materiāla apjomu, nodrošinot vēlamo virsmas raupjumu. Papildus jau minētajiem secinājumiem, vērtēta arī katra konkrētā parametra ietekme uz virsmas raupjumu. Veikts jutības tests, kura rezultāti ir redzami 1.5. attēlā. Šis tests parāda katra tehnoloģiskā parametra ietekmi uz virsmas raupjumu ar jutīguma pakāpes palīdzību - par kādu tas ir ietekmīgāks vai nebūtiskāks par citiem tehnoloģiskajiem parametriem.



1.5. att. Atsevišķu tehnoloģisko parametru ietekme uz virsmas raupjumu [34]

Jangs un Čens [95] prognozē virsmas profila raupjumu, lai identificētu optimālo virsmas profila raupjumu dotajā griešanas režīmu diapazonā gala frēzēšanā, izmantojot Taguči (Taguchi) metodi, nosakot optimālo profila raupjumu noteiktās tehnoloģisko

parametru robežās. Pie samērā maza eksperimentu skaita (18 eksperimenti) un samērā liela mainīgo tehnoloģisko parametru daudzuma (4 mainīgie ar trīs vērtībām) tiek iegūts prognozēšanai apmierinošs rezultāts. Papildus tiek norādīts, ka rezultāts ir ticams tikai uzdoto parametru vērtību robežās. Tātad lietojot vērtības, kas ir ārpus pētījumā definētajām robežām, prognozēšana ar apmierinošu ticamības pakāpi vairs nav iespējama.

Sevidžs un Čens [14] lietoja MR-M-ISRR struktūras modeli (daudzfaktoru vairāklīmeņu regresija) virsmas profila raupjuma Ra prognozēšanai gala frēzēšanā. Papildus zināmajiem tehnoloģiskajiem mainīgajiem (griešanas dziļums d , griešanas ātrums v un padeve f) tika ņemtas vērā arī sistēmas vibrācijas. Izstrādāts modelis, kura prognozēšanas kļūda ir 18%.

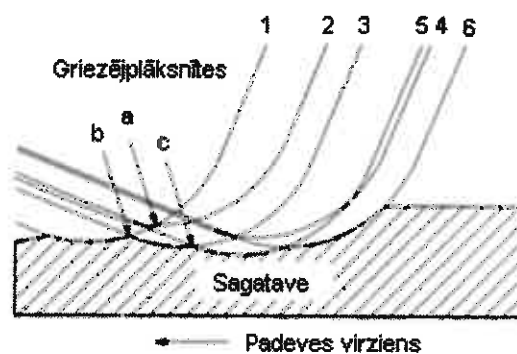
Bagcī un Aikuts [5] pētīja katrs tehnoloģiskā parametra atsevišķo ietekmi uz virsmas profila raupjuma veidošanos. Eksperiments veikts 1.2. tabulā doto tehnoloģisko parametru robežās.

1.2. tabula

Bagcī un Aikuta eksperimenta dati [5]

Apstrādājamais materiāls:		Stellite 6			
Pieres frēze (4 griezējplāksnītes)		Cietkausējuma (TiN) $\gamma=15^\circ$			
Ātrums	v	m/min	50	70	90
Padeve	f	mm/min	100	140	180
Griešanas dziļums	d	mm	0,25	0,5	0,75

No publikācijā analizētā eksperimenta secināts, ka virsmas profila raupjumu ietekmē griešanas dziļums d par 17,88%, griešanas ātrums v par 38,27% un padeve f par 20,14%. Pārējie 23,69% ir kļūda. Procentuāli norādīta tehnoloģisko parametru nozīmība apstrādes procesā. Ņemot vērā iepriekš dotos tehnoloģisko parametru ierobežojumus, iegūts pietiekami mazs virsmas profila raupjums $Ra=0,143\mu\text{m}$, turklāt noteikti optimālie griešanas parametri: griešanas dziļums $d=0,25\text{mm}$; griešanas ātrums $v=90\text{m/min}$ un padeve $f=100\text{mm/min}$. Taču jāņem vērā fakts, ka šādas metodikas izvēle ietvēra 23,69% kļūdu.

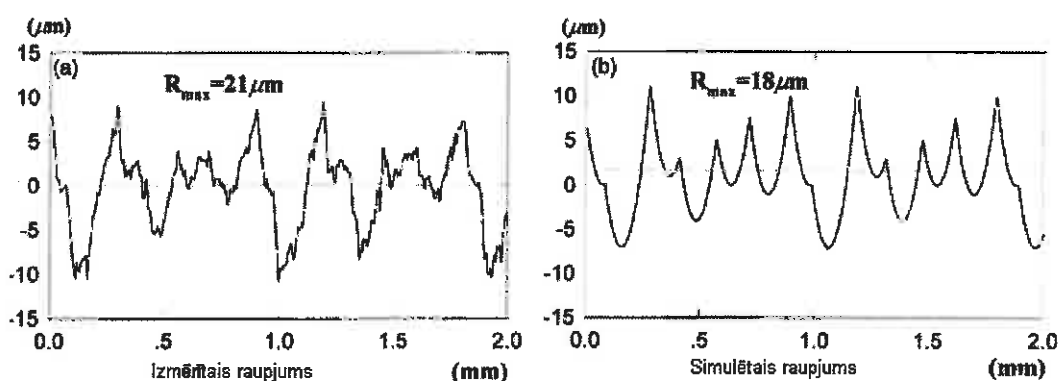


1.6. att. Virsmas profils, ko veido pieres frēze ar 6 griezējplāksnītēm viena apgrieziena laikā

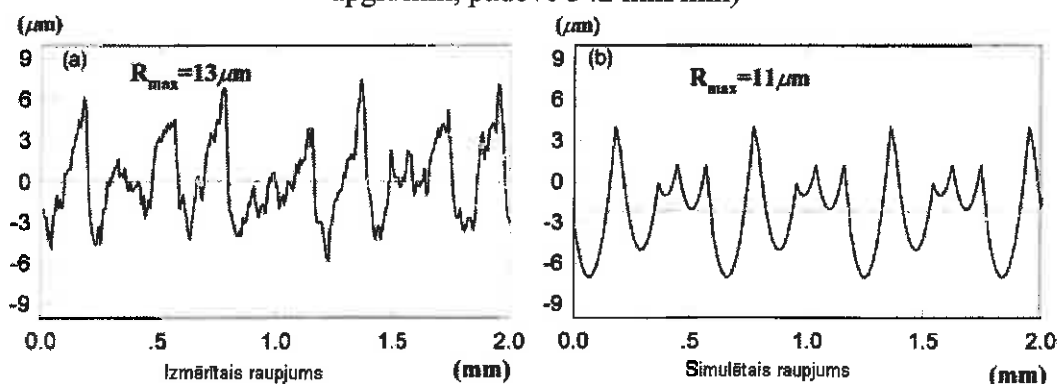
Pie šādas vērtības nevar uzskatīt, ka ir panākta virsmas profila raupjuma prognozējamība atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem.

Baeka, Kima un Ko [4] publikācijā apskatīts teorētiskais virsmas profila raupjuma veidošanās modelis. 1.6. attēlā redzams virsmas raupjuma veidošanās modelis, kad virsma tiek apstrādāta ar pieres frēzi, kurai ir sešas griezējplāksnītes. Arī šis modelis balstās uz ģeometriskiem parametriem, konkrēti modelī tiek pieņemts, ka virsmas profila raupjumu veido frēzes zobu jeb griezējplāksnīšu aksiālā novirze.

Nemot vērā 1.6. attēlā redzamo modeli, realizēts eksperiments: izpildīts reāls apstrādes process un attiecīgi izpildīta apstrādes procesa simulācija. Eksperimenta rezultāti attēloti 1.7. un 1.8. attēlos. Šis modelis ir papildināts ar kļūdas/novirzes aprēķinu, t.i., tiek ņemta vērā katras griezējplāksnītes novirze no pamatplaknes.



1.7. att. Simulētais un izmērītais virsmas profila raupjums (darba vārpstas ātrums 370 apgr./min, padeve 342 mm/min)



1.8. att. Simulētais un izmērītais virsmas profila raupjums (darba vārpstas ātrums 370 apgr./min, padeve 187 mm/min)

1.6. attēlā ilustrētais modelis darbojas tikai gadījumos, kur pieņemts, ka pēc apstrādes virsmas profila raupjums būs relatīvi liels. Modelis nav pielietojams, ja nepieciešams prognozēt virsmas raupjuma veidošanos relatīvi gludām virsmām, kur raupjumu būtiski

ietekmē ne tikai griezējinstrumenta ģeometrija, bet arī vibrācijas, siltums u.c. faktori. Turklāt no eksperimenta secināts, ka raupjumu pārsvarā veido griezējplāksnīšu novirze aksiālā virzienā, ko veido griezējplāksnīšu savstarpējās iestatījuma novirzes. Šādu mēru var uzskatīt par makro izmēru, ne mikro izmēru, pie kura tiek pieskaitīti virsmas raupjuma parametri.

Publikācijā [59] apskatīta virsmas profila raupjuma veidošanās gala frēzēšanā, pētot sakarības starp virsmas profila raupjumu un MRR (*Material Removal Rate* – nogriešanas intensitāte). 1.3. tabulā ir doti eksperimenta dati.

1.3. tabula

Eksperimenta dati, pētot sakarības starp virsmas profila raupjumu un MRR [59]

Apstrādājamais materiāls:	Inconel 718 (53,91Ni; 18,10Cr; 17,76Fe; 5,4Cb+Ta; 2,88Mo; 1,01Ti; 0,48Al; 0,32Co; 0,1Si; 0,026C)			
Gala frēze Ø10 (četri zobi)	Cietkausējuma (TiAlN pārklājums) skaidleņķis 10°			
Ātrums	v	m/min	40	50
Padeve	f_z	mm/min	0,07	0,12
Radiālais griešanas dziļums	a_e	Mm	1	3
Aksiālais griešanas dziļums	a_p	Mm	0,4	0,8

No eksperimentiem secināts, ka virsmas profila raupjumu lielā mērā ietekmē MRR un nav iespējams samazināt virsmas raupjuma vērtības, neupurējot MRR [59]. MRR gala frēzēšanā aprēķina sekojoši:

$$MRR = \frac{f_z z n a_e a_p}{1000} \quad (1.9)$$

kur n tiek noteikts ar:

$$n = \frac{v1000}{\pi D}, \quad (1.10)$$

kur D - instrumenta diametrs;

z - instrumenta zobu skaits.

Mazākais virsmas raupjums $Ra = 0,32\mu\text{m}$ iegūts ar šādiem griešanas režīmiem: $v = 44\text{m/min}$; $f = 0,1$; $a_p = 0,4\text{mm}$; $a_e = 1\text{mm}$.

Redija publikācijā [66] tika izstrādāts virsmas profila raupjuma prognozēšanas modelis AISI 1045 (oglekļa tērauds) materiāla apstrādei ar gala frēzi. 1.4. tabulā ir doti eksperimenta sākumdati.

Redija eksperimenta dati AISI 1045 apstrādei ar gala frēzi [66]

Apstrādājama materiāls:		AISI 1045 (97,7Fe; 0,485C; 0,390Si; 0,991Mn; 0,0138P; 0,020S)			
Gala frēze		Cietkausējuma (TiAlN pārklājums)			
Ātrums	v	m/min	150	200	250
Padeve	f	mm/min	200	300	400
Radiālais skaidleņķis	α	grādi	4	10	16
Virsotnes rādiuss	r	mm	0,4	0,8	1,2

Gala rezultātā iegūts sekojošs regresijas vienādojums:

$$Ra = 0,6088(v)^{-0,4638} (f)^{0,4461} (\alpha)^{0,1129} (r)^{0,1290}. \quad (1.11)$$

Eksperimenta rezultātā vismazākais virsmas profila raupjums ($Ra=0,5\mu\text{m}$) tika sasniegts pie šādiem režīmiem: $v = 250$ m/min; $f = 200$ mm/min; $\alpha = 10^\circ$; $r = 0,8$ mm [66]. Apskatot (1.11), var secināt, ka virsmas raupjumu visvairāk ietekmē ātruma v un padeves f maiņa. Virsmas raupjums samazinās palielinot griešanas ātrumu v un palielinās, palielinot darba padevi f . Atšķirībā no citiem pētījumiem, kā tehnoloģiskie parametri tika izvēlēti skaidleņķis un virsotnes rādiuss, ko atšķirībā no griešanas ātruma vai padeves nav iespējams operatīvi mainīt apstrādes procesa gaitā. Iegūtā modeļa prognozēšanas kļūda ir 42% robežās, kas norāda uz izveidotā prognozēšanas modeļa zemu ticamības pakāpi. Modelis ar šādu precizitāti nav izmantojams virsmas raupjuma prognozēšanai atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem.

Kiha un Dornfelda [39] darbā, izmantojot regresijas analīzi, iegūts sekojošs vienādojums:

$$Ra = 43,6 + 439f + 46,3f^2 + 1256v - 990fv. \quad (1.12)$$

Eksperimenta secinājumos minēts, ka vienādojums (1.12) ir labi piemērots apstrādei ar zemiem griešanas ātrumiem, bet pie lieliem griešanas ātrumiem modelim zūd ticamības pakāpe. Tas ir izskaidrojams ar to, ka katrs izveidotais modelis der pie noteiktiem apstrādes režīmiem un ārpus tiem, tas zaudē savu prognozējamību.

Lū un Čena darbā [46] pētīta tehnoloģisko parametru ietekme uz virsmas raupjumu, apstrādājot alumīniju ar četru zobu gala frēzi. Izveidots šāds gala frēzēšanas otrās kārtas regresijas vienādojums:

$$Y=22,9468+10,9357x_2+0,004274x_1x_2+0,674909x_1x_3-69,7679x_2x_3, \quad (1.13)$$

kur Y - prognozētais virsmas profila raupjums Ra ;

x_1 - griešanas ātrums (m/min);

x_2 – padeve (mm/apgr.);

x_3 - griešanas dziļums (mm).

No regresijas vienādojuma secināts, ka visvairāk virsmas profila raupjumu ietekmējošais faktors ir padeve x_2 . Konstatēts, ka modeļa precizitāte ir 90% robežās. Modeļa izstrādei tika ņemts samērā liels eksperimentu skaits, t.i., 84 eksperimenti. Var secināt, ka minētā modeļa izstrādei ir nepieciešams apjomīgs sākotnējo datu daudzums, kas negatīvi ietekmē modeļa izstrādes produktivitāti.

Savukārt Sevidža un Čena publikācijā [14] iegūto regresijas vienādojuma precizitāte ir 82% robežās. Tas iegūts pēc līdzīgas metodes, kā aprakstīts Lū un Čena publikācijā [46].

Sureša darbā [81] iegūtā regresijas vienādojuma precizitāte ir 65% robežās, tādējādi šo vienādojumu nevar uzskatīt par ticamu prognozēšanas modeli.

Publikācijā [4] veiktie eksperimenti (1.5. tabula) rāda, ka palielinot padevi f , palielinās virsmas profila raupjums Ra , turklāt virsmas profila raupjuma Ra izmaiņas attiecībā pret padevi f ir pietiekami nelineāras, lai padotos prognozēšanai, izmantojot regresijas analīzi.

1.5. tabula

Eksperimenta dati

Apstrādājamais materiāls:	AISI 1041			
Pieres frēze Ø100 (sešas plāksnītes)	Plāksnītes materiāls P20			
Aploces ātrums	n	apgr./min	370	-
Padeve	f	mm/min	50	350

Publikācijā pieminēti arī šādi mainīgie: instrumenta diametrs, materiāls un sagataves materiāls, apgalvojot, ka tie nevar tikt sekmīgi izmantoti prognozēšanas modelī, jo ir kategoriskie/diskrētie mainīgie (*categorical variables*). Šajā pašā pētījumā secinājums minēts, ka turpmākos pētījumos, lai uzlabotu prognozēšanas iespējas, būtu vēlams pievērsties neirotīklu algoritmiem vai fazilōģikai [63]. Var secināt, ka regresijas analīze ir daļēji izsmēlusi savu potenciālu prognozēšanas tehnikas jomā un šobrīd tiek vērsta uzmanība uz matemātiski daudz komplicētākām metodēm, piemēram, uz fazilōģiku vai neirotīkliem. Šādu

virzību var izskaidrot arī ar skaitļošanas jaudu palielināšanos pēdējos gados, kas dod iespējas izmantot daudz jaudīgākus skaitļošanas rīkus. Skaitļošanas jaudas vairs netiek uzskatītas par ierobežojošo elementu un to darbības ātrums šādu prognozēšanas uzdevumu veikšanai ir apmierinošs. Fazilōģikas vai neirotīklu pielietošana varētu nodrošināt pieņemamu alternatīvu virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izveidošanā [3, 23, 36].

Visi iepriekš minētie modeļi tiek izmantoti 2D virsmas raupjuma vai virsmas profila raupjuma parametru prognozēšanai atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem. Zināmajā tehnikas līmenī prognozēšanas metodikas izveidei 3D virsmas raupjuma parametri netiek apskatīti. 3D virsmas raupjuma parametri un to izmantošana jaunu prognozēšanas modeļu izstrādē izpētīta promocijas darba gaitā veiktajos eksperimentos un aprakstīta nākamajās nodaļās.

1.2. Virsmas raupjuma tehnoloģiskais nodrošinājums virpošana

Virpošana ir viena no visizplatītākajām metālapstrādes operācijām. Virpas var aizņemt apmēram 50% no visa darbmašīnu parka [101]. Uz virpām apvirpo sagatavju gala virsmas, ārējās un iekšējās cilindriskās, koniskās virsmas un veidvirsmas, ievirpo rievās, uzgriež un iegriež vītņos, nogriež (nodur) sagataves. Promocijas darbā tiek analizēta tehnoloģisko parametru ietekme uz virsmas raupjuma parametriem apvirpošanā.

Viens no visvienkāršākajiem veidiem, kā aprēķināt iespējamo virsmas raupjumu atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem, ir izmantot ģeometriskās sakarības, kas rodas instrumentam mijiedarbojoties ar sagatavi.

Virpošanā virsmas profila raupjumu jeb R_{max} nosaka izmantojot šādu sakarību [21]:

$$R_{max} = \frac{f^2}{8r}, \quad (1.14)$$

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

f – padeve (mm/apgr.),

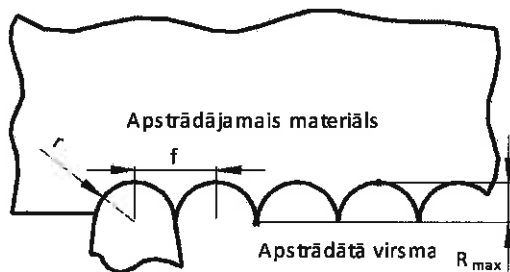
r - griežņa virsotnes rādiuss (mm).

Šī sakarība darbojas pie maziem griešanas dziļumiem, t.i., griešanas procesā nav iesaistīts galvenais griezējasmens un palīg-griezējasmens. Literatūrā [21, 87] minēta vēl viena sakarība teorētiskai virsmas profila raupjuma noteikšanai:

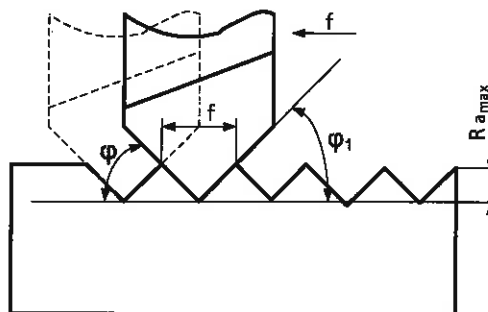
$$Ra = \frac{f^2}{32r}, \quad (1.15)$$

kur Ra_i - virsmas profila vidējā aritmētiskā novirze.

Apskatot formulas (1.14) un (1.15), redzams, ka $R_{max} = 4Ra_i$. 1.8. attēlā parādīta griešanas procesa (virpošana) skice, kad, iegūstot virsmas profila raupjumu, tiek ņemts vērā griežņa virsotnes rādiuss r .



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



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

1.9. attēlā parādīta griešanas procesa (virpošana) skice, kad, iegūstot virsmas profila raupjumu, tiek ņemti vērā griežņa griezējasmēri φ ; φ_1 , bet netiek ņemts vērā griežņa virsotnes rādiuss r . Pieņemts, ka virsotnes rādiuss r ir 0. Šajā gadījumā maksimālais virsmas profila augstums R_{max} tiek izteikts ar sekojošu sakarību:

$$R_{max} = \frac{f}{4(ctg\varphi + ctg\varphi_1)}, \quad (1.16)$$

kur φ - galvenā griezējasmēns leņķis;

φ_1 - palīg-griezējasmēns leņķis (palīgleņķis).

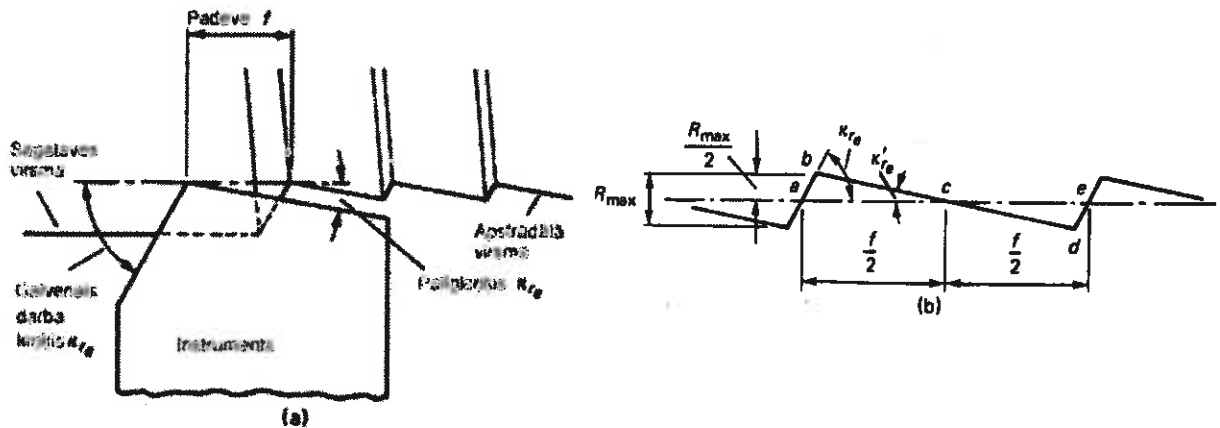
Šī sakarība darbojas pie lielām padevēm f un/vai liela griešanas dziļuma t . Netiek ņemts vērā griežņa virsotnes rādiuss r , jo kopējo virsmas profila raupjumu tas ietekmē minimāli vai vispār neietekmē.

Vēl vienā virsmas prognozēšanas vienādojumā, kas saistīts ar instrumenta un sagataves ģeometriskajiem parametriem, tiek izmantoti lauki, kas veidojas virsmas vidējās līnijas augšpusē un apakšpusē. 1.10. attēlā parādīts apstrādātās sagataves šķērsriezums. Ir zināms, ka viduslīnija ir paralēla galvenajam virsmas virzienam un tā sadala virsmu tādā veidā, ka lauki, kas atrodas virs viduslīnijas, ir vienādi ar laukiem, kas atrodas zem tās. Tādā virsmas profila raupjums Ra ir augšējā lauka un apakšējā lauka summa, kas dalīta ar izmērīto garumu jeb padevi f . Tādējādi virsmas profila maksimālais augstums R_{max} tiek aprakstīts ar sekojošu vienādojumu:

$$R_{max} = \frac{(|S_{abc}| + |S_{cde}|)}{f}, \quad (1.17)$$

kur S_{abc} - laukums starp punktiem a, b un c;

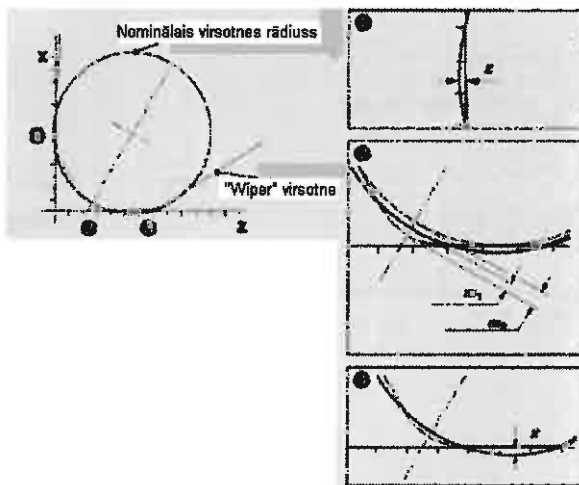
S_{cde} - laukums starp punktiem c, d un e.



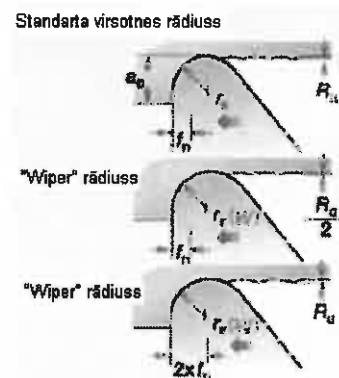
1.10. att. Ģeometriskie parametri, kas ietekmē virsmas raupjumu: a) ir virpošanas shēma un b) ir virpošanas shēma palielinātā mērogā, lai būtu redzami izveidotie lauki S_{abc} , S_{cde}

Visi augstāk minētie modeļi lielākā vai mazākā mērā attiecināmi uz rotācijas ķermeņu apstrādi jeb virpošanu. Protams, attiecīgi tos transformējot, iespējama to pielietošana citos apstrādes procesos.

Savu virsmas raupjuma veidošanās modeli ir izveidojusi arī populārā griezējinstrumentu ražošanas firma no Zviedrijas *SANDVIK*. Tās virsmas profila raupjuma modelis ir balstīts uz griešanas procesa ģeometriju, kas ilustrēts 1.12. attēlā zem virsraksta „Standarta virsotnes rādiuss”. *SANDVIK* savā modelī izmanto savu jauno instrumentu ģeometriju.



1.11. att. Salīdzinājums starp instrumenta nominālo virsotnes rādiusu un *SANDVIK* „Wiper” virsotni



1.12. att. „Wiper” rādiusa priekšrocības, ļaujot dubultot padevi f , nepalielinot virsmas profila raupjumu Ra

Instrumenta virsotni vairs neapraksta viens virsotnes rādiuss, bet gan dažādu formu kopa (skatīt 1.11. att.). Minētā griežņa virsotne ir uzlabota trīs vietās un, kā apgalvo SANDVIK, dod būtisku ieguvumu ražošanas efektivitātes palielināšanai (skatīt 1.12. att.). Ar jauno griežņa virsotnes konstrukciju, kurai dots nosaukums „Wiper”, var dubultot padevi f , saglabājot iepriekšējo virsmas profila raupjuma vērtību Ra , vai arī divkārti samazināt virsmas profila raupjuma vērtību Ra , saglabājot iepriekšējo padeves f vērtību.

1.6. tabula

Virsmas raupjuma atkarība no padeves un instrumenta virsotnes rādiusa

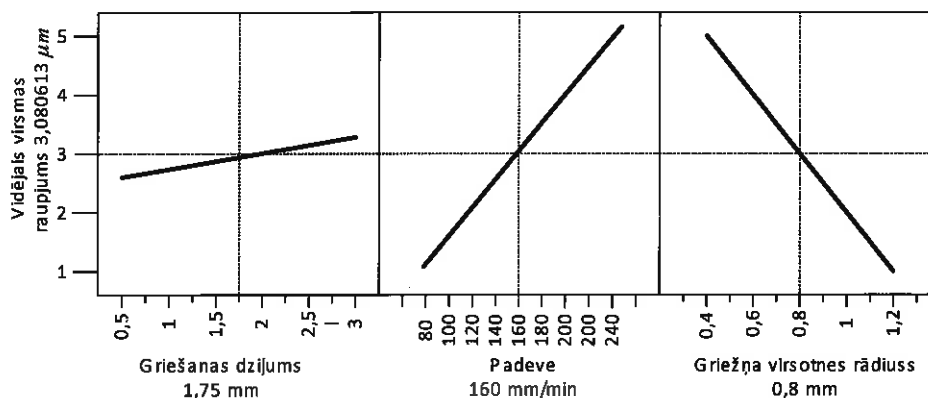
Feed mm	Standard		Wiper		Feed mm	Standard		Wiper	
	$r, 0,4$ $R_a, \mu m$	$r, 0,4$ $R_a, \mu m$	$r, 0,6$ $R_a, \mu m$	$r, 0,8$ $R_a, \mu m$		$r, 1,2$ $R_a, \mu m$	$r, 1,2$ $R_a, \mu m$	$r, 1,6$ $R_a, \mu m$	$r, 1,6$ $R_a, \mu m$
0,07	0,31	0,30	-	-	0,15	0,47	0,30	-	-
0,10	0,63	0,32	0,31	0,30	0,18	0,86	0,34	-	-
0,12	0,20	0,45	0,45	0,30	0,20	0,83	0,42	0,63	0,32
0,15	1,41	0,70	0,70	0,35	0,22	1,16	0,58	0,87	0,44
0,18	2,03	1,00	1,01	0,50	0,25	1,50	0,65	1,12	0,56
0,20	2,50	1,25	1,25	0,63	0,28	1,88	0,66	1,41	0,70
0,22	3,48	1,74	1,74	0,87	0,30	2,16	0,72	1,62	0,78
0,25	-	-	2,25	0,90	0,35	2,93	0,87	2,20	0,80
0,28	-	-	2,82	0,83	0,40	3,83	1,26	2,88	0,95
0,30	-	-	3,23	1,07	0,45	5,70	1,88	4,27	1,41
0,35	-	-	4,40	1,10	0,50	7,33	2,32	5,27	1,74
0,40	-	-	5,75	1,41	0,55	8,51	2,40	6,38	2,10
0,45	-	-	8,54	2,14	0,60	10,13	2,53	7,59	2,40
0,50	-	-	10,55	2,64	0,65	-	-	8,91	2,50
					0,70	-	-	10,34	2,60
					0,85	-	-	15,24	3,81
					0,90	-	-	17,06	4,27

Šādi ģeometrisko sakarību modeļi vai vienādojumi dod aptuvenu priekšstatu par virsmas raupjuma veidošanos apstrādes gaitā. Papildus tam ir ļoti daudz grūti definējamu un mainīgu faktoru, piem., vibrācijas, temperatūra, instrumenta un sagataves materiāla īpašības, EDzV ietekme u.c.

Nalbanta [52] publikācijā izpētīts, ka virsmas profila raupjums Ra samazinās, palielinot griežņa virsotnes rādiusu r , bet palielinot padevi f un griešanas dziļumu d virsmas profila raupjums Ra palielinās. Palielinot griešanas dziļumu d , virsmas profila raupjums Ra palielinās nedaudz, tādējādi var uzskatīt, ka dotajā gadījumā griešanas dziļumam d ir maza ietekme uz virsmas profila raupjuma Ra veidošanos. Eksperimenta sākuma dati doti 1.7. tabulā un minētās sakarības grafiski attēlotas 1.13. attēlā.

Nalbanta eksperimenta dati [52]

Parametrs	Simbols	Līmeņi				
Griešanas dziļums (mm)	d	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Padeve (mm/min)	f	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
Griežņa virsotnes rādiuss (mm)	r	0,4	0,8	1,2	-	-

1.13. att. Galvenie virsmas profila raupjumu Ra ietekmējošie faktori [52]

Veicot iegūto datu regresijas analīzi tika iegūts sekojošs pirmās pakāpes regresijas modelis [52]:

$$Ra = 0,998 + 0,376d + 0,033f - 4,86r \quad (1.18)$$

No vienādojuma (1.18) skaidri redzamas sakarības, kas definētas Nalbanta secinājumos.

Bigerala [8] pētījumi uzrādīja, ka palielinot griešanas ātrumu var palielināt produktivitāti un vienlaicīgi uzlabot virsmas raupjumu.

1.3. Virsmas raupjuma tehnoloģiskais nodrošinājums citos apstrādes procesos

Tipiski virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi, kas iegūti ar regresijas analīzes palīdzību ir aprakstīti T.Torima publikācijā [86]. Izmantojot regresijas analīzi iegūts regresijas vienādojums virsmas profila raupjuma Ra prognozēšanai pie noteiktiem apstrādes režīmiem:

$$Ra = 0,42 \frac{gr^{0,3} t^{0,29} S_{rad}^{0,11}}{v^{0,01}} \quad (1.19)$$

kur S_{rad} - radiālā padeve (mm);

t - slīpēšanas dziļums (mm);

gr - slīpripas graudainība;

v - aksiālā padeve (m/min).

Līdzīgā ceļā, kā aprakstīts T.Torima publikācijā, iegūts regresijas vienādojums Malkina un Guo publikācijā [48]. Izmantojot mazliet atšķirīgus slīpēšanas parametrus, iegūts sekojošs virsmas profila raupjuma $R_{a,0}$ prognozēšanas vienādojums:

$$R_{a,0} = R_0 s_d^{1/2} a_d^{1/4} \left(\frac{dv_w}{v_s}\right)^x, \quad (1.20)$$

kur R_0 un x - konstantes, kas attiecīgi balstās uz slīpripas specifikāciju un sagataves materiālu;

a_d - slīpripas materiāla biezums;

s_d - padeve;

d - griešanas dziļums;

v_w - sagataves griešanas ātrums;

v_s - slīpripas griešanas ātrums.

Žou un Hī [72] ieviesa analītisko metodi, kura izmanto kinemātisko analīzi virsmas raupjuma prognozēšanai slīpēšanā. Minētās metodes vidējā relatīvā kļūda ir 16%.

1.4. Iegūstamais virsmas raupjums atkarībā no apstrādes procesa

Ražošanas prakses rezultātā ir izveidotas vairākas tabulas, kur uzrādīts ekonomiski lietderīgi iegūstamais virsmas raupjums attiecībā pret kādu no apstrādes procesiem. Šīs tabulas noder, izvēloties apstrādes tipu. Piemēram, izvēloties apstrādes procesu, lai ekonomiski lietderīgi iegūtu urbuma virsmas raupjumu ar $Ra = 0,4$, aplūko tabulu datus un izvēlas honēšanu. Protams, jāņem vērā apstrādājamās sagataves ģeometriskās īpatnības, jo kvadrātiskas formas detaļas nav iespējams apstrādāt tās apvirpojot. Mūsdienās ražošana pieprasa daudz precīzāku raupjuma noteikšanu atkarībā no apstrādes procesa, bet šīs tabulas ir viens no vieglākiem veidiem, kā noteikt sasniedzamā virsmas raupjuma vērtību atkarībā no apstrādes procesa, ja nav noteiktas augstas prasības detaļas virsmas raupjumam. Turklāt šeit netiek ņemti vērā konkrēti ražošanas apstākļi (griešanas režīmi). Šādas tabulas var būt noderīgas, lai izveidotu apstrādes procesu zināšanu datu bāzi vai ekspertu sistēmas.

1.8. tabula

Virsmas raupjuma vērtības pie noteiktiem apstrādes procesiem

(Ra, μm)	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025	0.012
Griešana ar liesmu													
Zāģošana													
Ēvelošana, tēšana													
Urbšana													
Apstrāde ar elektrisko izlādi													
Frēzēšana													
Caurvilkšana													
Izrīvēšana													
Apstrāde elektronu staru													
Apstrāde ar lāzeru													
Elektroķīmiskā apstrāde													
Paplašināšana, virpošana													
Slīpēšana ar elektrolieta palīdzību													
Slīpēšana													
Honēšana													
Elektropulēšana													
Pulēšana													
Lepēšana													
Superfīniša apstrāde													
Liešana veidzemes veidnēs													
Karstā velmēšana													
Kaļšana													
Ekstrudēšana													
Aukstā velmēšana, vilkšana													
Liešana metāla veidnēs													

© pārpublicēts no Machinery's Handbook, 24th ed., Industrial Press, 1992

1.5. Sagataves apstrādes adaptīvā vadība

Iepriekšējās apakšnodaļās ir aplūkota virsmas profila raupjuma prognozēšana atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Viens no variantiem, kur pielietot šādus modeļus, ir to iesaistīšana ciparvadības darbagaldu vadībā, nodrošinot automatizētu tehnoloģisko parametru vadību atkarībā no iegūstamā virsmas raupjuma. Promocijas darba ietvaros bija nepieciešams realizēt zināmā tehnikas līmeņa analīzi, lai iepazītos ar esošiem risinājumiem.

Līdzīgu adaptīvās vadības sistēmu izstrādājuši Makino Milling Machine Co., Ltd. (Japāna), bet šajā sistēmā netiek izmantota faziloģika. Sistēma darbojas pēc noteikta algoritma, kas nestandarta gadījumos vai ārpus iestatītajām robežām nespēj nodrošināt apmierinošu procesa vadību. Uz doto sistēmu ir iegūts ASV patents Nr. 6,438,445 – „Apstrādes procesors” [97]. Šī sistēma ir paredzēta, lai adaptīvi kompensētu instrumenta novirzes no apstrādājamā profila.

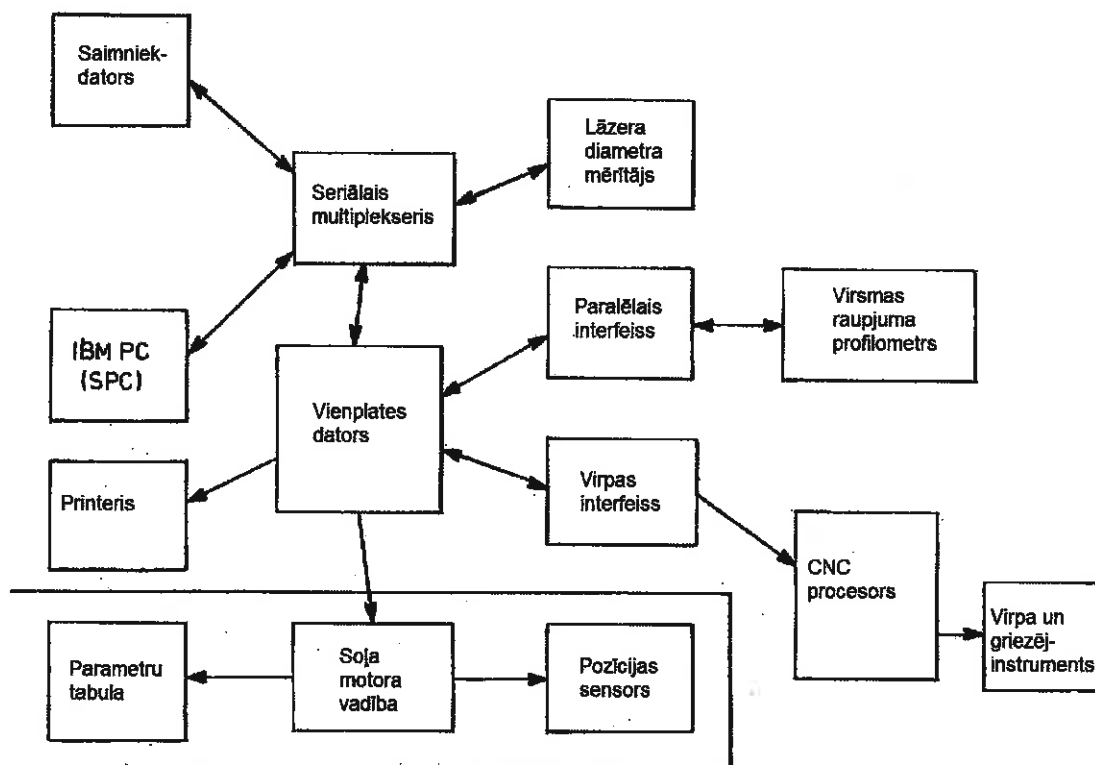
Adaptīvo apstrādes vadības sistēmu ir izstrādājusi arī Ford Motor Company (ASV), kas uz minēto sistēmu ir ieguvusi ASV patentu Nr. 4,926,309 – „Mākslīgais intelekts virsmas raupjuma adaptīvai apstrādes vadībai” [92]. Adaptīvā vadība notiek uz matemātiskā modeļa pamata, kas ir šāds:

$$R_{z,f} = (1262,79)f^2/r, \quad (1.21)$$

kur f - padeve, mm/apgr.;

r - griežņa virsotne rādiuss, mm.

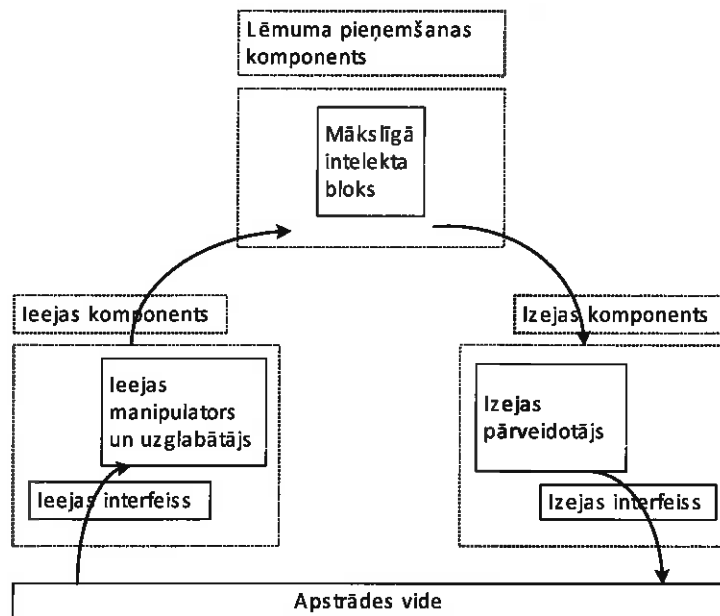
Kā minēts iepriekšējās nodaļās, šāds vienādojums, kas balstās tikai uz ģeometriskiem parametriem, ietver augstu prognozēšanas kļūdu. Šādas sistēmas adaptīvā vadība ir ar zemu precizitāti un nespēj nodrošināt apmierinošu virsmas raupjumu. Uz šo pašu sistēmu ir mēģināts saņemt Eiropas patentu taču nezināmu iemeslu dēļ patentēšana ir apturēta uz sistēma ir palikusi Eiropas patenta pieteikuma līmenī ar Nr. EP 0359378A. 1.14. attēlā ir parādīta sistēmas blokshēma, kas ilustrē elektronisko komunikāciju starp sistēmas pamatelementiem.



1.14. att. Ford Motor Company adaptīvās vadības sistēmas blokhēma [92]

Ja Ford Motor Company sistēma paredzēta virpošanai, tad gandrīz identisku sistēmu piedāvā Toyota Koki Kabushiki Kaisha (Japāna), kas aprakstīta ASV patentā Nr. 5,679,053 – „Metode un aparāts sagataves slīpēšanai” [96]. Toyota Koki Kabushiki Kaisha sistēmai ir tādi paši trūkumi, kā iepriekš minētajai sistēmai, resp., augsta prognozēšanas kļūda. Turklāt šīs sistēmas galvenais uzdevums ir kontrolēt slīpripas diametra izmaiņas un attiecīgi kompensēt tās.

Pilnīgi konceptuāla pieeja minētajai problēmai ir aprakstīta ASV patenta pieteikumā US2004/0098147 – „Mākslīgā intelekta ierīce un attiecīgā metode apstrādei” [89]. Patenta pieteikums ir publicēts 2004. gada 20. maijā un būtībā apraksta pašus pamatus par to kāda varētu izskatīties adaptīvā vadība, nedodot nekādus tehniskos risinājumus. 1.15. attēlā ilustrēta adaptīvās vadības ideja ar sistēmas blokiem, kuru savstarpējās mijiedarbības rezultātā būtu iespējams adaptīvi vadīt apstrādes procesu.



1.15. att. Apstrādes adaptīvās vadības koncepts, kas aprakstīts ASV patenta pieteikumā
US2004/0098147 [89]

Par šo tēmu atrasts ievērojams daudzums patentu dokumentu, kurus izanalizējot, var secināt, ka šādu sistēmu izveide vēl atrodas sākuma stadijā (daudzi patenti ir koncepta līmenī). Lielais skaits patentu dokumentu ļauj secināt, ka šādu sistēmu ieviešanai ir saskatāms komerciālais potenciāls, jo dažādi pētniecības centri dažādās ģeogrāfiskajās teritorijās turpina to attīstību un pilnveidi.

Pēc literatūras un zināmā tehnikas līmeņa analīzes iegūti šādi secinājumi:

- 1) Vairumā gadījumu virsmu profila raupjuma prognozēšanas modeļu ieguvei tiek izmantota regresijas analīze.
- 2) Dažos gadījumos regresijas analīzes ceļā iegūto modeļu relatīvās novirzes kļūda ir robežās no 20 – 40%.
- 3) Kā turpmāko pētījumu virzieni tiek minēta neirotīklu un faziloģikas izmantošana virsmas raupjuma prognozēšanas uzdevumos, bet konkrētu risinājumu nav.
- 4) 3D virsmas raupjuma parametru prognozēšana atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem netiek apskatīta. Visi modeļi ir veidoti ar virsmas profila raupjuma parametriem jeb 2D virsmas raupjuma parametriem.
- 5) Regresijas analīze ir daļēji izsmēlususi savu potenciālu prognozēšanas tehnikas jomā un pašreiz tiek vērsta uzmanība uz matemātiski daudz komplicētākām metodēm, piemēram, faziloģiku vai neirotīkliem.

2. 3D VIRSMAS RAUPJUMS

Mašīnbūvē detaļu virsmu raksturošanai tiek izmantoti virsmas profila raupjuma parametri jeb 2D raupjuma parametri. Taču reālā pasaule ir trīs dimensijās un minētie divdimensiju parametri tādi kā 2D raupjuma parametri (Ra , Rz , u.c.) vairs nespēj pilnībā raksturot pētāmo virsmu. Lai labotu šīs nepilnības, ieviesti telpiskie virsmas mikroģeometrijas raupjuma parametri jeb 3D virsmas raupjuma parametri. 3D virsmas parametri virsmas tekstūru definē pietiekami precīzi, lai no virsmas raksturlielumiem varētu noteikt tās raksturu un veiktspēju [27].

Viena no promocijas darba novitātēm ir 3D virsmas raupjumu parametru izmantošana prognozēšanas modeļu izstrādē. Šāda izvēle dod iespēju izstrādāt precīzākus virsmas raupjuma prognozēšanas modeļus un reālākas adaptīvās vadības sistēmas, kas balstītas uz izveidotajiem prognozēšanas modeļiem. Zināmās literatūras analīze neuzrāda publikācijas, kurās virsmas raupjuma prognozēšanai tiktu izmantoti 3D virsmas raupjuma parametri.

2.1. 3D virsmas raupjuma parametri

Stouta un Salivana veiktais pētījums [78] norāda, ka 3D virsmas topogrāfijas mērījumos nav ieinteresēts tikai akadēmiskais personāls. Daudzas ražošanas firmas sāk izmantot 3D virsmas raupjuma mērījumus, lai iegūtu pilnu ražotā produkta virsmas topogrāfiju.

Industrijā ir zināms, ka virsmas profila raupjuma parametrus nosaka ISO standarts ISO 4287:1997. Šis standarts ir atjaunojums iepriekšējam ISO standartam ISO 4287/1:1984. Jāpiebilst, ka no jaunā standarta ir svītrots virsmas profila raupjuma parametrs Rz .

3D virsmas raupjuma parametru standartizācija vēl atrodas izstrādes stadijā, taču tiem jau ir piešķirts oficiāls standarta numurs ISO 25178. Līdz tam 3D parametri tika standartizēti zem pagaidu standarta EUR 15178 EN „Paņēmienu attīstība raupjuma aprakstam trīs dimensijās“. Šobrīd ISO 25178 ir pilnībā izstrādāts, bet vēl nav apstiprināts un oficiāli ieviests. 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 [10].

Lai 3D virsmas raupjuma parametrus būtu vieglāk atšķirt no 2D raupjuma parametriem, 1991. gada septembrī Briselē Eiropas Kopienas komisijas darba sanāksmē

saistībā ar 3D virsmas raksturojošiem parametriem tika nolemts, ka 3D parametri sāksies ar burtu „S” (2D raupjuma parametri sākas ar burtu „R”) [80].

Salīdzinot ar 2D raupjuma parametriem, 3D virsmas raupjuma parametriem ir šādi raksturlielumi, [77]:

- 1) Virsmas topogrāfija pēc savas dabas ir trīsdimensionāla. 3D virsmas topogrāfijas mērījumi atklāj virsmas reālos raksturlielumus, ko ar 2D profila mērījumiem sasniegt nav iespējams.
- 2) Parametri, kas iegūti no 3D virsmas topogrāfijas, ir daudz reālistiskāki nekā tie, kas ir iegūti no 2D profila. Tādi parametri kā R_p , R_u , R_y , R_t un R_z nodrošina 2D profila raksturošanu [107, 108, 109]. Tā kā profils sakrīt ar mērāmās virsmas vertikālo plakni, tas nevar šķērsot reālas virsmas virsotnes un dobumus. Tādējādi no augstāk minētiem parametriem, kas ir iegūti no profila, var iegūt tikai reālajām vērtībām tuvinātas vērtības. Mērot 3D virsmas topogrāfiju, var atrast reālas virsotnes un ielejas. Līdzīga situācija rodas aprēķinot atbalsta līkni. Profila atbalsta līkne var ievērojami atšķirties no virsmas atbalsta līknes [107, 108, 109], jo profils nenodrošina patiesu atbalsta laukuma attēlojumu.
- 3) 3D virsmas topogrāfijas mērījumi nodrošina virsmas analīzi ar vairākiem jauniem raksturojošiem parametriem, piemēram, eļļas tilpuma vai kontaktvirsmas parametriem [18], kas nav pieejami ar parasto 2D profila analīzi. Šie parametri ir ļoti noderīgi inženieriem un triboloģijas speciālistiem, jo ļauj realizēt detaļu virsmu funkcionālo raksturlielumu analīzi.
- 4) No statistiskās analīzes viedokļa ir zināms, ka labāk iespējams novērtēt pētāmo procesu, ja ir vairāk neatkarīgu mērījumu datu [77]. 3D virsmas topogrāfijas statistiskā analīze ir daudz uzticamāka un raksturojošāka, jo liels datu ieguves apjoms, palielina datu neatkarību. Tādējādi 3D analīze nodrošina mazāku virsmas raupjuma parametru vērtību variāciju vienai un tai pašai virsmai.
- 5) Viens no svarīgākajiem 3D topogrāfijas analīzes raksturlielumiem [79] ir virsmas vizualizācijas nodrošināšana, izmantojot datortehniku. Izometriskā projekcija, kontūra kartēšana, šķērsriezumu izveide nodrošina detalizētu virsmas topogrāfijas attēlojumu.

Lai arī 3D virsmas topogrāfijas analīzei ir tik daudzsoļošas priekšrocības, viens no tās trūkumiem ir nepieciešamo instrumentu izmaksas un laiks, kas nepieciešams 3D virsmas topogrāfijas iegūšanai. Taču ņemot vērā datortehnikas attīstību, var secināt, ka arī šis šķērslis tiks pārvarēts.

Vairumam 2D raupjuma jeb virsmas profila raupjuma parametru, kas definēti ISO 4287 standartā, matemātiskās izteiksmes viegli var tikt pārveidotas uz 3D raupjuma parametru matemātiskām izteiksmēm. Piemēram, Sq ir ekstrapolācija uz plakni no Rq :

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lb} \int_{lb} Z^2(x) dx} \quad (2.1)$$

un [32]:

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(x, y) dx dy} \quad \text{vai} \quad (2.2)$$

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |Z_{x,y}^2|}. \quad (2.3)$$

kur lb - profila garums;

$z(x)$ - punkti uz profila;

A – mērīšanas laukums;

M – punktu skaits uz profila;

N - profilu skaits;

$z(x, y)$ - raupjās virsmas tekstūras datu kopa.

$z(x, y)$ tiek iegūts izmantojot filtrēšanu [32].

Sa , Sq , Ssk , Sku , Sp , Sy , utt., 3D virsmas raupjuma parametri tiek definēti līdzīgi. Kaut arī ar dažiem parametriem ir jābūt uzmanīgam [10].

Nemot vērā augstāk minēto apgalvojumu var uzrakstīt arī Ra un Sa vienādojumus, kur Sa ir parametra Ra ekstrapolācija:

$$Ra = \sqrt{\frac{1}{lb} \int_{lb} Z(x) dx} \quad (2.4)$$

un

$$Sa = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z(x, y) dx dy} \quad \text{vai} \quad (2.5)$$

$$Sa = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |z_{x,y}|. \quad (2.6)$$

2.1. tabulā ir uzskaitīti standartā ISO 25178 ierakstītie 3D virsmas raupjuma parametri. Standarts vēl nav oficiāli apstiprināts, bet tajā atrodamā informācija ir vērā ņemama un izmantojama. Darbā izmantoti tieši šajā standartā atrodamie virsmas raupjuma parametri, piemēram, Sa – vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes.

3D virsmas raupjuma parametri atbilstoši standartam ISO25178

Nr.	Parametra simbols un nosaukums
Augstuma parametri:	
1.	<i>Sa</i> – vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes (mērvienība – μm).
2.	<i>Sq</i> – vidējā kvadrātiskā novirze no vidusplaknes (μm). Izskaitļo virsmas amplitūdu efektīvo vērtību.
3.	<i>Ssk</i> – ieplaku izkļiedes līknes simetrija (mērvienība – skaitlis). Negatīvs <i>Ssk</i> norāda uz to, ka virsma galvenokārt ir veidota no viena līdzenuma un dziļām un smailām ieplakām. Šajā gadījumā, izkļiede ir nobīdīta uz augšu. Pozitīvs <i>Ssk</i> norāda uz virsmu ar daudzām smailām virsotnēm uz plaknes. Izkļiede ir nobīdīta uz leju. Tā kā tiek lietots liels eksponents, šis parametrs ir ļoti jutīgs pret mērījuma trokšņiem un tā pārveidošanu digitālajā formātā.
4.	<i>Sku</i> – ieplaku izkļiedes līknes plakanums (skaitlis). <i>Sku</i> norāda uz virsmas “asumu” jeb „pīķainību” (izkļedei). Arī šajā gadījumā tiek lietots liels eksponents, tāpēc šis parametrs ir ļoti jutīgs pret mērījuma trokšņiem un tā pārveidošanu digitālajā formātā (samplēšana – signāla apstrādes veids).
5.	<i>Sp</i> – virsmas visaugstākā virsotne (μm). Augstuma starp vidusplakni un visaugstāko virsotni izmērītās virsmas robežas.
6.	<i>Sv</i> – virsmas visdziļākā ieplaka (μm). Dziļums starp vidusplakni un visdziļāko ieplaku.
7.	<i>Sz</i> – virsmas 10 punktu augstums (μm). Vidējais attālums starp 5 visaugstākajām virsotnēm un 5 visdziļākajām ieplakām. Tiek ņemts vērā 3x3 liels laukums, lai atrastu virsotnes un ieplakas.
Funkcionālie parametri:	
8.	<i>Smr</i> – virsmas atbalsta laukuma pakāpe vai virsmas materiāla izmantošanas koeficients.
9.	<i>Smc</i> – virsmas atbalsta laukuma pakāpes augstums vai apgrieztā virsmas materiāla izmantošanas koeficienta augstums.
10.	<i>Sxp</i> – virsotnes maksimālais augstums.
Funkcionālie parametri (tīlpums):	
11.	<i>Vm</i> – mērogā ierobežotas virsmas materiāla tīlpums noteiktā dziļumā (mērvienība – mm^3/mm^2).
12.	<i>Vv</i> – mērogā ierobežotas virsmas dobumu/tukšumu tīlpums noteiktā dziļumā (mm^3/mm^2).

2.1. tabulas turpinājums

13.	V_{mp} – mērogā ierobežotas virsmas virsotņu materiāla tilpums jeb virsotņu materiāla tilpums (mm^3/mm^2).
14.	V_{mc} – mērogā ierobežotas virsmas kodola materiāla tilpums (mm^3/mm^2).
15.	V_{vc} – mērogā ierobežotas virsmas kodola tukšumu tilpums (mm^3/mm^2).
16.	V_{vv} – mērogā ierobežotas virsmas dobumu/ieplaku tukšumu tilpums (mm^3/mm^2).
Telpiskie un hibrīda parametri:	
17.	Sal – straujākā krituma garums pie 0,2 no autokorelācijas (mm). Šis parametrs izsaka virsmas viļņa garuma saturu. Augsta vērtība nosaka to, ka virsmai galvenokārt ir gari viļņa garumi (zemas frekvences).
18.	Str – tekstūras izskata indekss (skaitlis). Virsmas izotropijas mērs. Šis ir visīsākā krituma garuma indekss pie 0,2 no autokorelācijas uz vislielāko garumu. Šī parametra vērtība ir starp 0 un 1. Ja vērtība ir tuvu 1, var teikt, ka virsma ir izotropiska, t.i., visos virzienos ir vienādi raksturlielumi. Ja vērtība ir tuvāk 0, tad virsma nav izotropiska, t.i., tai ir orientēta un/vai periodiska struktūra.
19.	Std – virsmas nelīdzenumu virziens jeb tekstūras virziens (mērvienība – grādi). Izskaitļo virsmas tekstūras galveno leņķi. Šim parametram ir nozīme, ja Std ir mazāks par 0,5. Šis leņķis tiek izteikts grādos no -90° līdz 90° . Ja virsmai ir apļveida struktūra (virpošana, zāģēšana), tad šis parametrs riņķa aploces tuvumā dos nepareizu virzienu. Gadījumā, kad virsmai ir divi vai vairāki galvenie virzieni, tad Sal parametrs dos galvenā virziena leņķi.
20.	Sdq – virsmas vidējais kvadrātiskais slīpums ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$). Tas ir hibrīda parametrs, kas izvērtē virsmas kontaktīpašības vai optiskās īpašības.
21.	Sdr – izveidotās virsmas laukuma indekss vai izveidotās virsmas plakņu attiecība (mērvienība - %). Hibrīda parametrs, kas palīdz izprast virsmas reģionu deformāciju. Izveidotā virsma norāda uz virsmas sarežģītību, pateicoties nelineārās virsmas un balstvirsmas salīdzinājumam. Pilnīgi plakanai virsmai Sdr būs tuvs 0%. Kompleksai virsmai Sdr būs daži procenti.
Reljefa īpatnību parametri:	
22.	Spd – virsotņu blīvums.
23.	Spc – virsotņu izliekumu vidējā aritmētiskā vērtība.
24.	$S10z$ – virsmas augstums 10 punktos.
25.	$S5p$ – virsotņu augstums 5 punktos.

26.	<i>S5v</i> – ieplaku dziļums 5 punktos.
27.	<i>Sda</i> – ieplaku laukuma vidējā vērtība.
28.	<i>Sha</i> – pakalnu laukumu vidējā vērtība.
29.	<i>Sdv</i> – ieplaku tilpumu vidējā vērtība.
30.	<i>Shv</i> – pakalnu tilpumu vidējā vērtība.
	Virsmas raupjuma parametri, kas nav iekļauti standartā ISO 25178:
31.	<i>Sy</i> – augstuma starpība starp virsmas augstāko un zemāko punktu.
32.	<i>Ssc</i> – vidējais aritmētiskais virsotņu izliekums ($1/\mu\text{m}$). Šis parametrs ļauj uzzināt virsotņu vidējo formu: vai smaila, vai noapaļota; saskaņā ar virsmas izliekuma vidējo vērtību šajos punktos. Mēra to, cik atvērta vai noslēgta ir virsmas tekstūra.

Promocijas darbā lietots viens no visizplatītākajiem 3D raupjuma parametriem *Sa* (vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes), līdzīgi kā 2D raupjuma parametrs *Ra* (profila vidējā aritmētiskā novirze), kas ir visbiežāk izmantotais raupjumu raksturojošais parametrs mašīnbūvē. Jāatzīmē, ka šajā darbā ar terminu virsmas raupjums tiek saprasts 3D virsmas raupjums, bet 2D raupjums tiek definēts kā virsmas profila raupjums. Paredzams, ka 3D virsmas raupjuma parametriem iegūstot popularitāti, *Sa* būs viens no visbiežāk lietojamiem parametriem. Šī iemesla dēļ promocijas darbā tieši *Sa* tiek izmantots pie virsmas raupjuma prognozēšanas.

2.2. 3D virsmas raupjuma mērīšana

Promocijas darbā 3D virsmas raupjuma mērījumos tika izmantots *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50* formas mērītājs, kas attēlots 2.1. attēlā. Šajā ierīcē ir iebūvēta taustes zonde jeb adata, kas mērīšanas procesā ir kontaktā ar mērāmo detaļu. Mēraparāta specifikācija ir uzrādīta 2.2. tabulā.

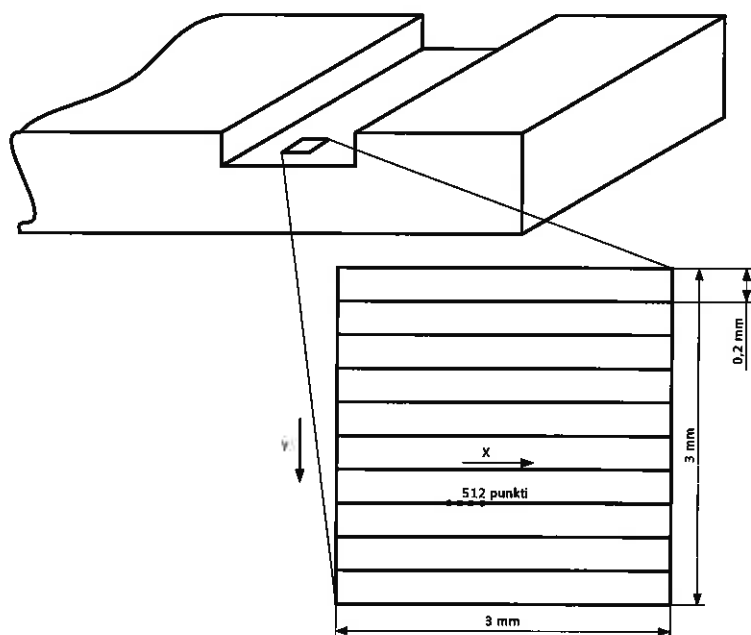
Lai izmērītu 3D virsmas raupjumu, uz apstrādātās virsmas izvēlas 3x3 mm lielu mērļauku, pa kuru tiks veikti profilogrāfa zondes pārgājieni ar 0,2 mm atstarpi. Uz 3 mm ir iespējami 15 gājieni, kuru solis ir 0,2 mm. Var izvēlēties arī 4x4 mm laukumu,



2.1. att. *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50* mēraparāts

kur viena gājiena garums ir 4 mm un atstarpe starp gājieniem var būt 0,2 vai 0,4 mm. Gājiena garumu izvēlas atbilstoši standartam ISO 4288-1996 [103], kur, piemēram, virsmas raupjumam robežās no 0,1 līdz 2,0 μm bāzes garums ir 0,8 mm.

Viens gājiens var ietvert 256 – 512 mērpunktus, kas ir pietiekami, lai iegūtu statistiski būtiskus rezultātus. 2.2. attēlā ir ilustrēta eksperimentos izmantotā mērījuma shēma. Mērāparāta zonde pārvietojas pa X asi, veicot mērījumus. Pēc tam zonde atgriežas atpakaļ pa X asi tā gājiena sākumpunktā un veic pārvietojumu pa Y asi. Pēc pārvietojuma pa Y asi, zonde uzsāk jaunu pārvietojumu pa X asi, lai veiktu virsmas mērījumu. Uz katras mērāmās virsmas tiek veikti trīs mērījumi. Trīs mērījumu vidējā vērtība tiek uzrādīta kā izmērītā virsmas raupjuma vērtība.



2.2. att. 3D virsmas raupjuma mērīšanas lauka shēma (nav mērogā)

2.2. tabula

Form Talysurf 50 specifikācija jeb galvenie raksturlielumi

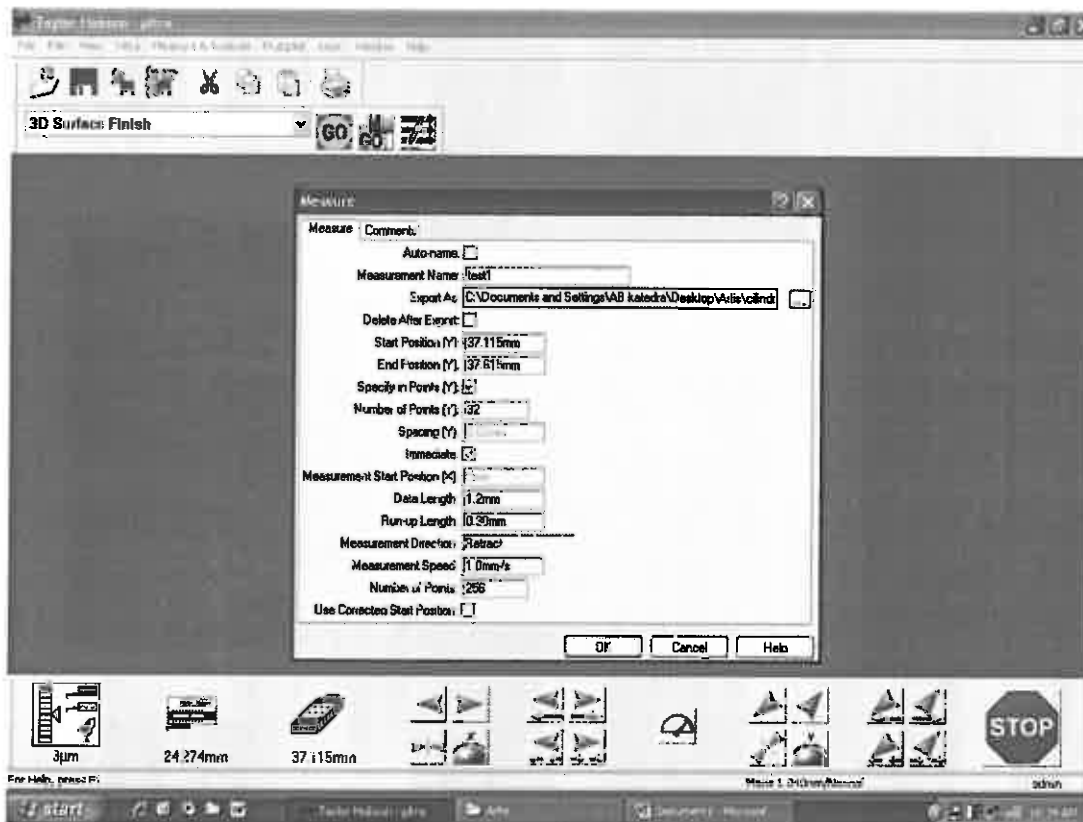
Modeļa nosaukums	Form Talysurf 50
X – ass veikspēja	
Mērīšanas apgabals Max/Min	50 mm / 0,1 mm
Mērīšanas ātrums	0,5 mm/s – 10 mm/s
Datu uztveršanas intervāls	0,25 μm
Taisnuma nevienmērība (Pt) [X = garums mm]	(0,06+0,007X [mm]) μm
X ass rādījuma kļūda [X = garums mm]	(0,3+0,03X [mm]) μm

2.2. tabulas turpinājums

Z – ass veiktspēja	
Nominālā mērīšanas robeža	1 – 2 mm
Izšķirtspēja	16 nm / 1 mm robežās 3 nm / 0,2 mm robežās 0,6 nm / 0,04 mm robežās
Izšķirtspējas attiecība	65536:1
Adatas turētāja garums / adatas tips / spēks	60 mm / dimanta adata / 1 mN 120 mm / 0,5 mm rādiusa lode / 20 mN
Z ass nelinearitāte [Z = mēra pārvietojums]	(0,1 + 0,03Z [mm]) μm
Atkārtojuma iespējamības Z ass radītājs	Gludām virsmām 0,05 μm, izliektām 0,10 μm
Sistēmas veiktspēja	
Standarta kalibrēšanas lode	1 mm robeža / 12,5 mm nominālais rādiuss 2 mm robežā / 22 mm nominālais rādiuss
Kalibrēšanas nevienmērība (Pt)	0,25 μm / 60 mm turētājs 0,5 μm / 120 mm turētājs
Sistēmas traucējumi (Rq)	10 nm
Virsmas tekstūras parametru nevienmērība	2% + 4 nm – tikai virsotņu parametri
Rādiusa mērīšanas nevienmērība	0,1 – 12,5 mm = 0,2% no nomināla 12,5 – 15 mm = 0,02% no nomināla 25–1000 mm=0,02-0,1% no nomināla
Rādiusa maiņa atkarībā no t°	4 μm/C° 12,5 mm rādiuss
Izmērs (izpildošā daļa)	374x114x125 mm
Svars	7,5 kg

Pirms jaunas mērījumu sērijas uzsākšanas nepieciešama mēraparāta kalibrēšana. To izpilda ar speciālas kalibrētas sfēras palīdzību. Kad kalibrēšana pabeigta, uz mērgalda kalibrēšanas sfēru nomaina pret mēramajām detaļām. Kad iestatīta mērāmā detaļa, caur mēraparāta interfeisu, kas ir *Taylor Hobson ultra* datorprogramma, iestata nepieciešamos mērījuma parametrus (2.3. att.). Minētā adata jeb mēradata pārvietojas pa mērāmo detaļu atbilstoši iestatītajiem mērījuma parametriem. Mēradatas pārvietojumam iestata divus

parametrus: pārvietojumu pa x un pa y asi. Papildus iestata mērījumu punktu skaitu, kas nepieciešami viena mērījumu gājiena laikā. Mērījumu punktus iespējams iestatīt katrai asij atsevišķi. Iespējams iestatīt arī mērīšanas ātrumu un adatas pārvietojuma virzienu. Programma nodrošina plašas mērīšanas iestatījumu variēšanas iespējas, kas ļauj adaptēt mērīšanas sistēmu atbilstoši mērāmajai detaļai.

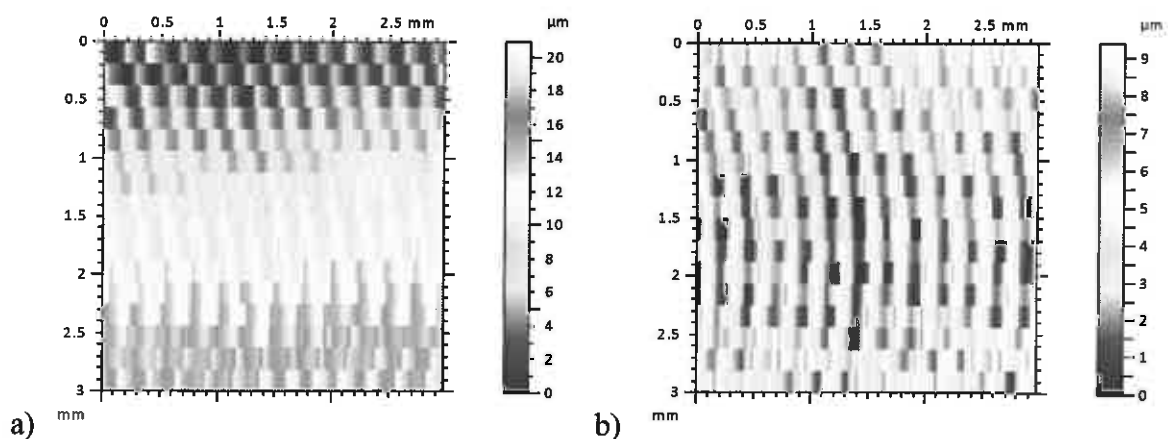


2.3. att. Taylor Hobson mēraparāta vadības interfeiss *ultra* datorprogrammā. Atvērts mērījumu iestatīšanas logs

Šobrīd vēl nav izstrādāta standartizēta 3D virsmas raupjumu mērīšanas metodika, tādēļ promocijas darba vajadzībām 2D parametru mērīšanas metodikas standarti ir adaptēti 3D virsmas raupjuma mērīšanas metodikai. Galvenokārt tas attiecas uz mērlauka izvēli, kur mērlauka izmēri tiek izvēlēti pēc tā, kādās robežās ir virsmas raupjuma vērtības un tam atbilstošais mērīšanas bāzes garums.

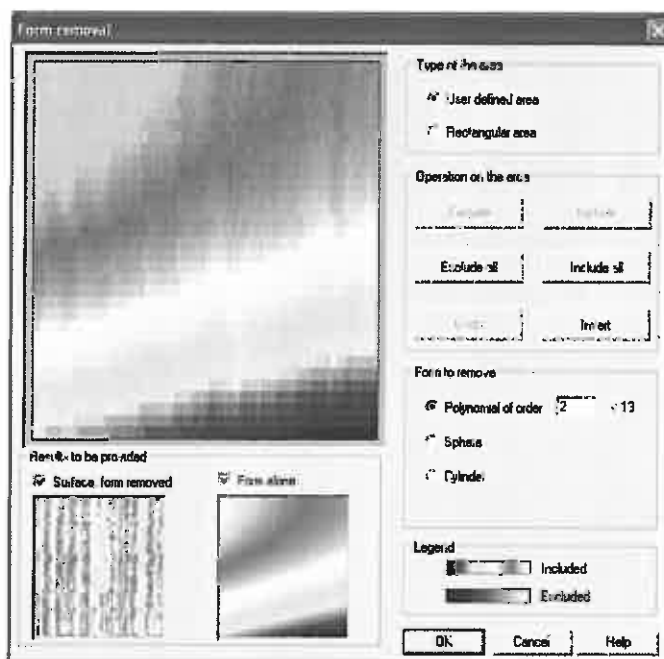
Virsmas mērīšanas laikā iegūtie dati tiek apstrādāti *TalySurf Intra* datorprogrammā, kas parāda izmērīto parametru vērtības, kā arī vizuāli attēlo izmērītās virsmas tekstūru.

2.4. attēlā ir parādīts virsmas raupjuma grafiskais attēlojums pirms un pēc līmeņošanas.



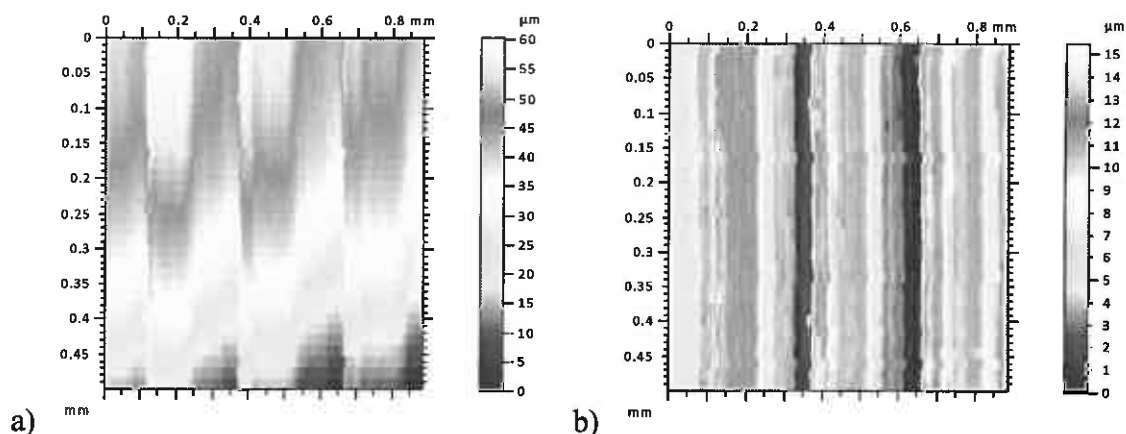
2.4. att. Apstrādāto (frēzēto) paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums: a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Minētā parauga 3D virsmas raupjums (pēc līmeņošanas) $Sa=1,37 \mu\text{m}$

2.4. b) attēlā ilustrētais līmeņotais mērījuma paraugs tiek realizēts caur *Talysurf* programma *Form removal* (formas aizvākšana), kas ilustrēta 2.5. attēlā. Līmeņošana jāveic, lai izslēgtu no 3D virsmas raupjuma parametriem virsmas viļņainību un citas ģeometriskās neregularitātes, kas neattiecas uz virsmas raupjuma parametriem. *TalySurf Intra* programma ļauj veikt dažādas manipulācijas ar datiem, kā arī veikt datu apstrādi lietotāja definētiem datu apgabaliem. 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 (dati, kas iegūti mērījuma rezultātā – virsmas augstuma punkti).



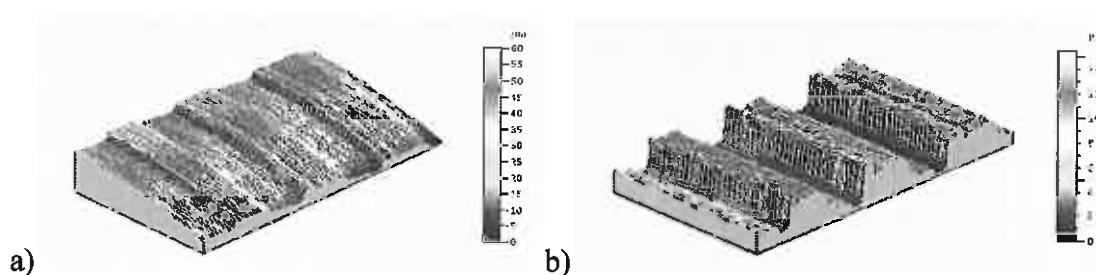
2.5. att. Formas novirzes aizvākšanas logs

Virsmas līmeņošanas procedūru caur *Form removal* realizē ne tikai virsmām ar novirzi plaknē, bet arī cilindriskām vai sfēriskām virsmām. 2.5. attēlā ilustrēts 3D virsmas raupjuma mērījums cilindriskas virsmas segmentam, kur tiek ņemts minētais virsmas izliekums. Liekās formas noņemšana ir nepieciešama, lai virsmas raupjuma parametru vērtības neietekmētu virsmas makroskopiskās novirzes, tādas kā viļņainība, koniskums, cilindriskums, utt.



2.6. att. Apstrādāto (virpoto) paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums: a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Minētais paraugs ir daļa no cilindriskas detaļas

Uzskatāmākam mērījumu rezultātu atspoguļojumam izmērītos paraugus var attēlot aksinometrijā. 2.7. attēlā ir ilustrēts 2.6. attēlā iegūto mērījumu attēlojums aksinometrijā.



2.7. att. Apstrādāto (virpoto) paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums aksinometrijā: a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Minētais paraugs ir daļa no cilindriskas detaļas

Talysurf programma apstrādā izmērītos datus ne tikai grafiski, bet dod arī 3D virsmas raupjuma parametru skaitliskās vērtībās, kas redzamas 2.3. tabulā. Visas norādītās *Talysurf* programmas priekšrocības nav nepieciešams izmantot ikreiz, kad tiek veikti 3D virsmas raupjuma mērījumi, bet šīs iespējas spēj atvieglot dažādu virsmas raupjuma noteikšanas problēmu risināšanu.

Visi pieejamie 3D virsmas raupjuma parametri vienam izmērītam paraugam

Amplitūdas parametri	Laukuma un tilpuma parametri	Funkcionālie parametri
$Sa = 1,37 \mu\text{m}$ $Sq = 1,6 \mu\text{m}$ $Sp = 5,9 \mu\text{m}$ $Sv = 3,46 \mu\text{m}$ $St = 9,36 \mu\text{m}$ $Ssk = 0,201$ $Sku = 2,16$ $Sz = 6,67 \mu\text{m}$	$Smr = 0,1\%$ (1 μm zem visaugstākās virsotnes) $Sdc = 3,11 \mu\text{m}$ $Smmr = 0,00346 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ $Smvr = 0,0059 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ $STp = 0,1\%$ (1 μm zem visaugstākās virsotnes) $SHTp = 3,11 \mu\text{m}$ (20 - 80%)	$Sbi = 0,486$ $Sci = 1,58$ $Svi = 0,0652$ $Vv = 0,0059 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ (0,01%) $Vm = 0,00345 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ (0,01%) $Vmp = 0,000621 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ $Vmc = 0,00256 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ $Vvc = 0,00216 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ $Vvv = 0,000104 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$
Hibrīdparametri	Telpiskie parametri	Funkcionālie parametri
$Sdq = 0,0431 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ $Ssc = 0,00167 1/\mu\text{m}$ $Sdr = 0,093 \%$	$SPc = 0 \text{ pks}/\text{mm}^2$ (1 μm ; 10 μm) $Sds = 6,5 \text{ pks}/\text{mm}^2$ $Str = 0,114$ $Sal = 0,00274 \text{ mm}$ $Std = -71,5$ $Sfd = *****$	$Sk = 3,03 \mu\text{m}$ $Spk = 0,926 \mu\text{m}$ $Svk = 0,178 \mu\text{m}$ $Sr1 = 19,6\%$ $Sr2 = 97,7\%$

Analizējot 3D virsmas topogrāfiju, 3D virsmas raupjuma parametrus un mērīšanas metodiku, iegūti šādi secinājumi:

- 1) 3D virsmas raupjuma parametri daudz precīzāk raksturo mērāmo virsmu, jo ir tuvāki reālajiem apstākļiem nekā 2D jeb profila raupjuma parametri.
- 2) Daļa no 3D virsmas topogrāfijas standarta ISO 25178 ir apstiprināta. Tas norāda uz to, ka 3D raupjuma parametri ir pieņemti industrijā un tas ir tikai laika jautājums līdz ISO 25178 tiks apstiprināts pilnībā.

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

Viens no paņēmieniem, kā iegūt sakarības starp virsmas raupjumu un apstrādes tehnoloģiskajiem parametriem, ir empīrisko metožu lietošana. Tiek iegūtas eksperimentālo datu kopas, no kurām tiek izgūtas sakarības. Regresijas analīze ir ļoti populāra statistikas metode, ar ko realizē šīs darbības. Regresijas analīzes pamatmērķis ir notikumu paredzēšana, šajā gadījumā virsmas raupjuma prognozēšana atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Darbā regresijas analīzi lieto, lai pārbaudītu sakarību starp atkarīgo mainīgo (3D virsmas raupjumu) un saistītiem neatkarīgiem mainīgiem (tehnoloģiskiem parametriem: padeves, griešanas ātruma, griešanas dziļuma u.c.). Tiek iegūts sakarību matemātiskais modelis – regresijas vienādojums. Tālāk analizējot iegūto regresijas vienādojumu, iespējams secināt, kādi parametri un cik lielā mērā ietekmē virsmas raupjumu.

Regresijas analīze sākas ar atkarīgo mainīgo un saistīto neatkarīgo mainīgo definēšanu. Šajā gadījumā atkarīgais mainīgais ir jebkurš no 3D virsmas raupjuma parametriem (Sa , Sz , utt.), bet saistītie neatkarīgie mainīgie – tehnoloģiskie parametri. Vispirms tiek izveidots vienādojums, kas attēlo funkcionālo saistību starp atkarīgo mainīgo un neatkarīgajiem mainīgiem:

$$Sa = C \cdot f^{a_1} \cdot H^{a_2} \cdot v^{a_3} \cdot d^{a_4} \cdot \gamma^{a_5}, \quad (3.1)$$

kur Sa – 3D virsmas raupjuma parametrs jeb virsmas vidējā absolūtā novirze;

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

h – sagataves materiāla cietība (HB vai HRC);

v – griešanas ātrums (m/min);

d – griešanas dziļums (mm);

γ – skaidleņķis (grādi);

C – regresijas vienādojuma konstante.

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

$$\ln Sa = \ln C + a_1 \ln f + a_2 \ln h + a_3 \ln v + a_4 \ln d + a_5 \ln \gamma, \quad (3.2)$$

Ja nepieciešams, sistēmas vienkāršošanai iespējams dažus parametrus izslēgt. Piemēram, ja skaidleņķim (γ) nav būtiskas ietekmes vai tā ietekme ir labi, vienādojums tiek izpildīts sekojoši:

$$\ln Sa = \ln C + a_1 \ln f + a_2 \ln h + a_3 \ln v + a_4 \ln d, \quad (3.3)$$

Parametru izslēgšana no vienādojuma ir jāveic ļoti apdomāti, lai netiktu pazaudēti būtiski vienādojuma parametri. Piemēram, ja griešanas ātrumam v ir būtiska ietekme uz virsmas raupjuma veidošanos, šāda faktora izslēgšana no vienādojuma var radīt regresijas vienādojumu ar nepatiesām sakarībām.

Tālāk vienādojumu (3.3) apraksta vienkāršotā formā:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5, \quad (3.4)$$

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

b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 un b_5 - attiecīgi parametru novērtējumi jeb regresijas koeficienti;

x_1, x_2, x_3, x_4 un x_5 - padeves, materiāla cietības, ātruma, griešanas dziļuma un skaidleņķa logaritmiskās transformācijas.

Tālāk izmanto statistiskās analīzes programmas, piemēram, SPSS, MiniTab, MatLab utt., un tajās esošos regresijas analīzes rīkus vērtību b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 un b_5 iegūšanai. Ievietojot šīs vērtības vienādojumā (3.4), iegūst procesu raksturojošu matemātisku modeli. Tālāk vienādojumu transformē tā sākotnējā formā, iegūstot vienādojumam (3.1) līdzīgu izteiksmi, gadījumā, ja kāds no koeficientiem ir ar negatīvu vērtību, dalījumu:

$$Sa = C \cdot \frac{f^{a_1} \cdot H^{a_2} \cdot d^{a_4}}{v^{a_3} \cdot \gamma^{a_5}} \quad (3.5)$$

Gadījumos, kad vienādojuma pārvešana atpakaļ logaritmiskā formā var būt neveiksmīga un var tikt zaudētas regresijas analīzes ceļā iegūtās sakarības, tas tiek atstāts vienādojuma (3.4) formā. Piemēram, publikācijā [34] tiek izmantota vienādojuma (3.4) forma – pirmās kārtas vienādojums:

$$y = 0,5764 + 0,0049x_1 - 3,5850x_2 + 1,5383x_3 + 0,016x_4 \quad (3.6)$$

Secinājumus par tehnoloģisko parametru ietekmi uz virsmas raupjumu var izdarīt arī no šīs vienādojuma formas.

Turpinot pārveidojumus, iegūst otrās kārtas vienādojumu, kas dod iespēju analizēt tehnoloģisko parametru ietekmi uz virsmas raupjumu, iekļaujot tehnoloģisko parametru savstarpējo reizinājumu. Vienādojumam (3.4) atbilstošais otrās kārtas vienādojums:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_1x_2 + b_7x_1x_3 + b_8x_1x_4 + b_9x_1x_5 + b_{10}x_2x_3 + b_{11}x_2x_4 + b_{12}x_2x_5 + b_{13}x_3x_4 + b_{14}x_3x_5 + b_{17}x_4x_5 + b_{18}x_1x_1 + b_{19}x_2x_2 + b_{20}x_3x_3 + b_{21}x_4x_4 + b_{22}x_5x_5 \quad (3.7)$$

Darbā vienādojumi veidoti no tehnoloģiskajiem parametriem, kas ir maināmi apstrādes procesa gaitā: griešanas ātrums – v , griešanas dziļums – d un padeve – f , bet netiek ņemti vērā apstrādājamā materiāla parametri, piemēram, apstrādājamā materiāla cietība. Tā kā izvēlētie parametri ir maināmi apstrādes gaitā, no iegūtajiem apstrādes modeļiem iespējams izstrādāt adaptīvas darba galdu vadības sistēmas, kas nodrošina vēlamu virsmas raupjumu, mainot tehnoloģiskos parametrus tiešsaistes režīmā.

Promocijas darbā regresijas analīzes veikšanai izmantota MiniTAB matemātiskās statistikas programma. Regresijas analīzes izmantošana prognozēšanas modeļu/vienādojumu izstrādē ir vispārzināma metodika. Darbā prognozēti konkrēti uzdoti apstrādes procesi un to veidojamais 3D virsmas raupjums, kas darbam piešķir novitāti. Pētot zināmo literatūru par virsmas raupjuma prognozēšanu atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem, nav konstatētas publikācijas, kas ietvertu tieši 3D virsmas raupjuma parametru prognozēšanu atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem, kas ir vēl viens no faktoriem, lai darbs pretendētu uz novitāti.

3.1. Prognozēšanas metodikas izstrāde frēzēšanā

Sakarību parādīšanai starp virsmas raupjumu un tehnoloģiskiem parametriem izmanto prognozēšanas modeļus, ko iegūst regresijas analīzes rezultātā. 2. nodaļā uzskaitīti vairāki informācijas avoti, kuru analīzes rezultātā izstrādāta 3D virsmas raupjuma prognozēšanas metodika. Metodikas izstrāde balstīta uz veiktajiem eksperimentiem (gala frēzēšana, apvirpošana) un 2. nodaļā aprakstīto regresijas modeļu iegūšanas paņēmieni pielāgošanas 3D parametru īpatnībām.

3.2. Eksperimentāla prognozēšanas modeļa izstrāde frēzēšanā

Eksperimenta mērķis ir sakarību noteikšana starp apstrādātās virsmas raupjumu Sa un virsmas apstrādei izmantojamiem tehnoloģiskajiem parametriem (v – griešanas ātrums

(m/min); f – padeve (mm/apgr. vai mm/zobu); d - griešanas dziļums (mm)). Detaļas virsmu apstrādā ar gala frēzi ar iepriekš zināmiem tehnoloģiskajiem parametriem. Pēc detaļas apstrādes izmēra apstrādātās virsmas raupjumu Sa un empīriski nosaka virsmas raupjuma parametru atkarību no tehnoloģiskajiem parametriem – izveido 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeli.

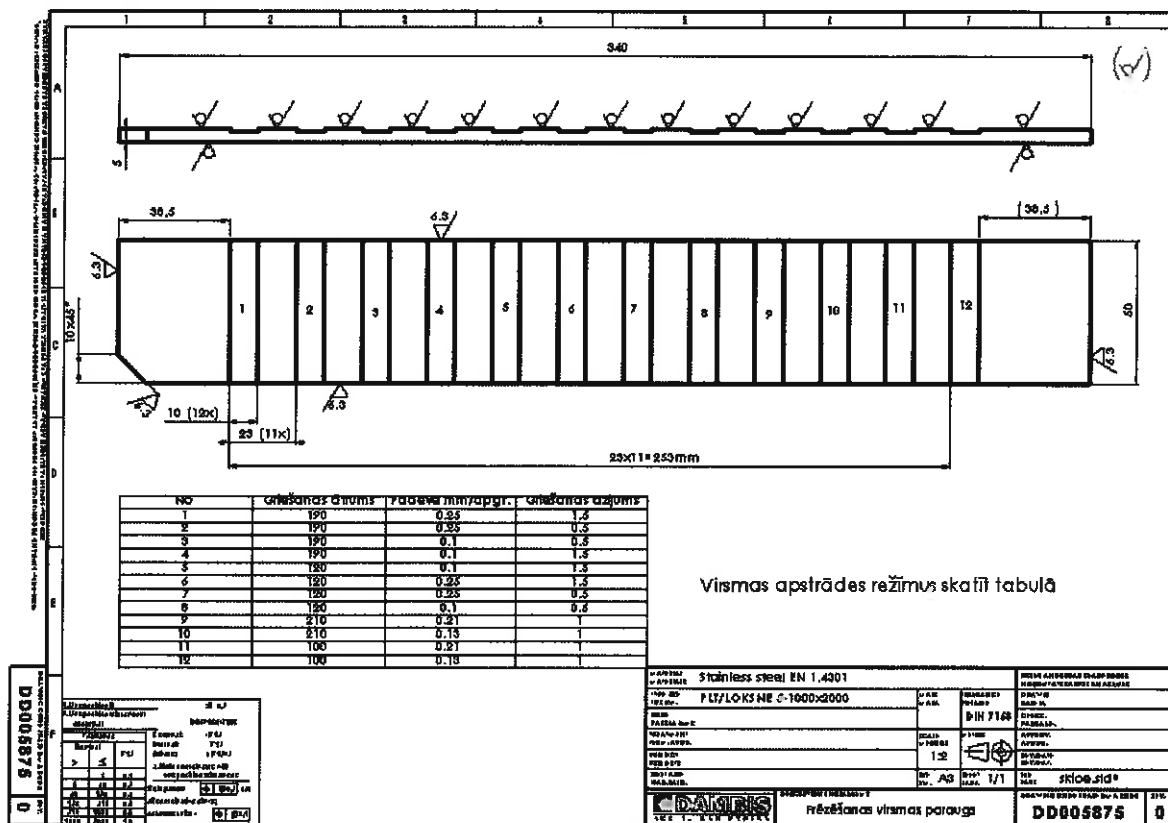
Apstrādājamais materiāls ir nerūsējošā tērauda plāksne (Stainless steel EN 1.4301 = X5CrNi18-10), tās ķīmiskais sastāvs uzrādīts 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Apstrādājamā materiāla ķīmiskais sastāvs

Materiāls	C %	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Cu%	N%
X5CrNi18-10	≤0,1	≤1,0	≤2,0	≤0,045	≤0,15 - 0,35	17,0 - 19,0	9,0 - 11,0	≤1,0	≤0,11

Uz parauga atzīmē 12 vietas, kur veic apstrādi ar gala frēzi. Apstrādē izmanto četru zobu cietkausējuma gala frēzi ar diametru 10 mm. Apstrādājamā materiāla skice dota 3.1.attēlā.



3.1. att. Frēzēšanas skice, kur redzams apstrādājamais materiāls ar frēzēšanas rievām

Vienlaicīgi ar materiāla izvēli izveido tabulu (3.2. tabula) ar apstrādes jeb tehnoloģiskajiem režīmiem. Dažās publikācijās papildus padevei, griešanas ātrumam un griešanas dziļumam tiek ņemts vērā arī apstrādājamo materiāls un frēzes ģeometrija, kas šajā darbā izmantots tikai pielāgošanai jau izvēlēto tehnoloģisko parametru robežas. Apstrādājamo materiālu parasti nosaka projektētājs jeb konstruktors, bet tehnologs operācijas sākumā izvēlas frēzes ģeometriju, kas ekonomisku apsvērumu dēļ paliek konstanta visu operācijas laiku. Apstrādes gaitā elastīgi maināmi ir parametri f , d un v , ko nelabvēlīga virsmas raupjuma iegūšanas gadījumā operators vai tehnologs operatīvi izmaina, lai nodrošinātu optimālu virsmas raupjumu (vērtību, kas uzdota tehnoloģiskajā kartē).

3.2. tabula

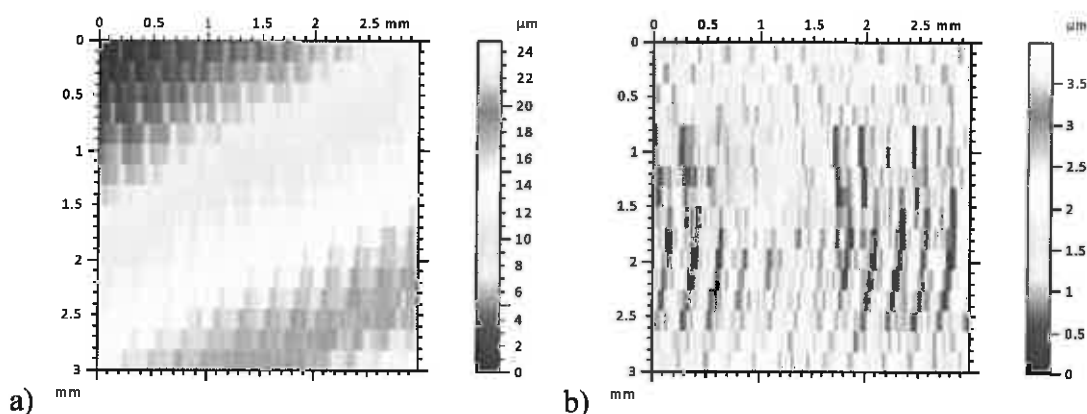
Tehnoloģisko parametru izvēle

Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)
1.	0,25	1,5	190
2.	0,25	0,5	190
3.	0,1	0,5	190
4.	0,1	1,5	190
5.	0,1	1,5	120
6.	0,25	1,5	120
7.	0,25	0,5	120
8.	0,1	0,5	120
9.	0,21	1	210
10.	0,13	1	210
11.	0,21	1	100
12.	0,13	1	100

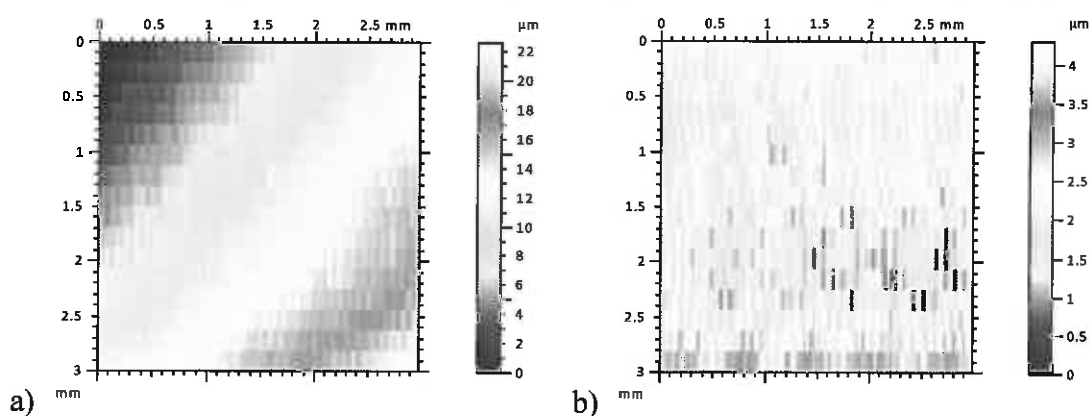
Kā redzams no 3.2. tabulas, griešanas režīmi ņemti šādās robežās:

- griešanas ātrums v : $120 \leq v \leq 190$ (m/min);
- padeve f : $0,1 \leq f \leq 0,25$ (mm/apgr.);
- griešanas dziļums d : $0,5 \leq d \leq 1,5$ (mm).

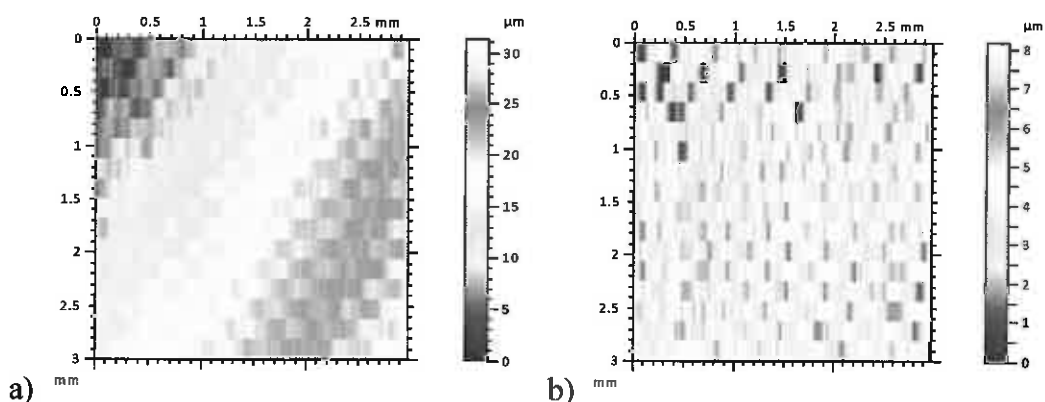
Robežu noteikšana ir ļoti svarīga, jo izvēloties parametrus ārpus noteiktajām robežām, iegūtais empīriskais vienādojums var izrādīties nepareizs, t.i., nav iespējams to lietot, lai turpmāk paredzētu 3D virsmas raupjuma parametrus atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem.



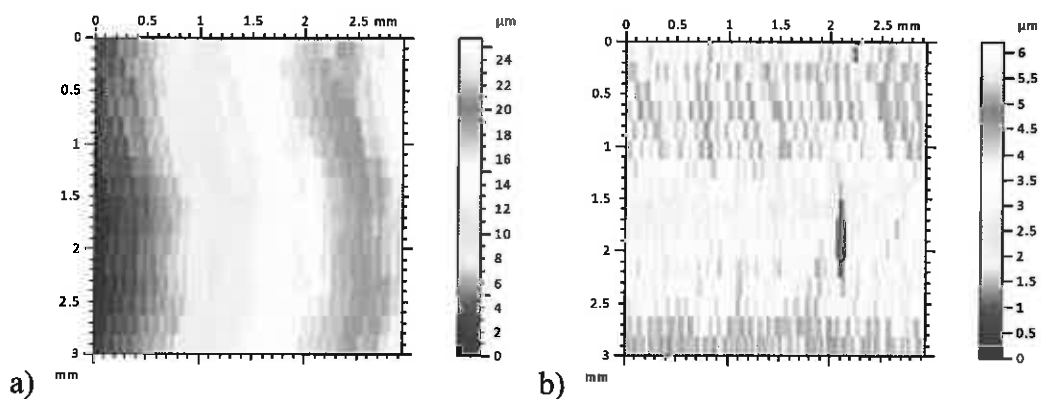
3.2. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums:
 a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,25$ mm/apgr.; $d=0,5$ mm; $v=190$ m/min ($Sa = 0,631$ μm)



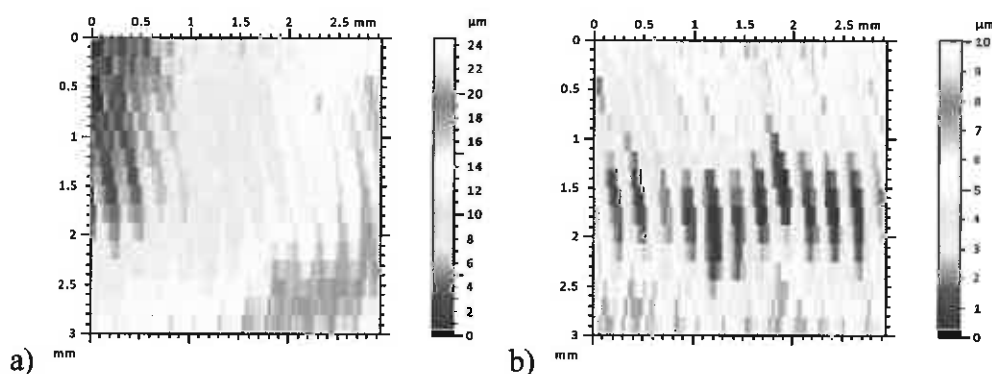
3.3. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums:
 a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,1$ mm/apgr.; $d=0,5$ mm; $v=190$ m/min ($Sa = 0,388$ μm)



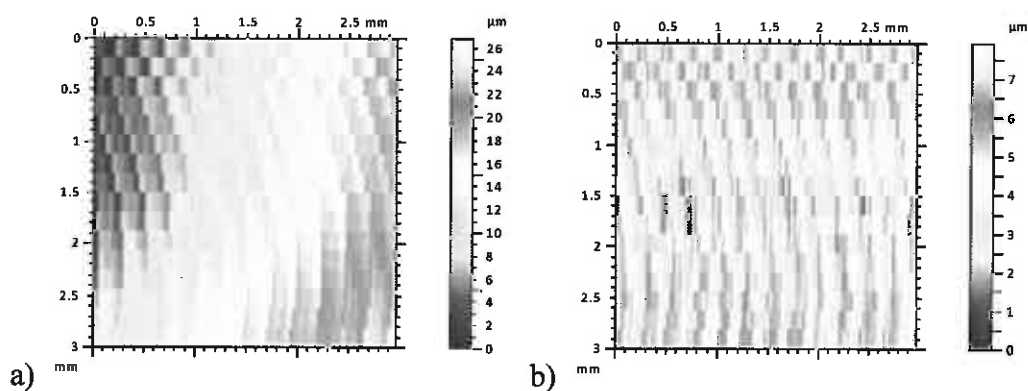
3.4. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums:
 a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,1$ mm/apgr.; $d=1,5$ mm; $v=190$ m/min ($Sa = 0,988$ μm)



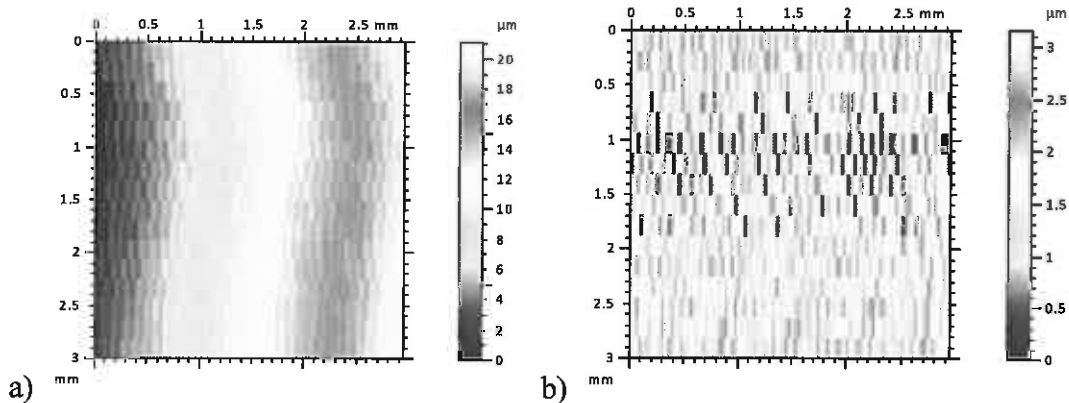
3.5. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums:
 a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,1$ mm/apgr.; $d=1,5$ mm; $v=120$ m/min ($Sa = 0,635$ μm)



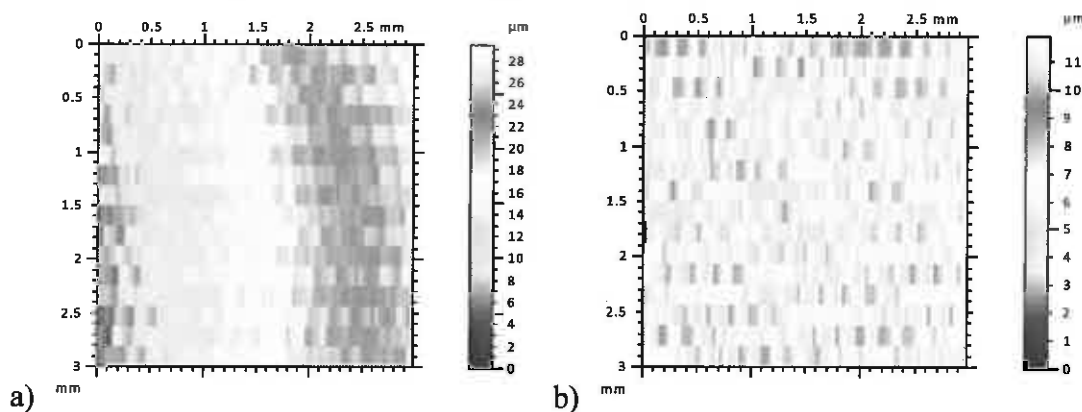
3.6. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums:
 a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,25$ mm/apgr.; $d=1,5$ mm; $v=120$ m/min ($Sa = 1,37$ μm)



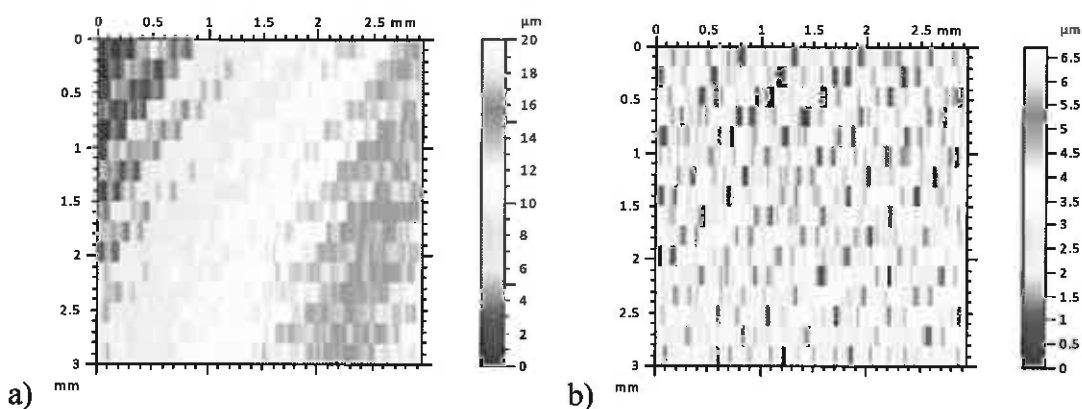
3.7. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums:
 a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,25$ mm/apgr.; $d=0,5$ mm; $v=120$ m/min ($Sa = 1,09$ μm)



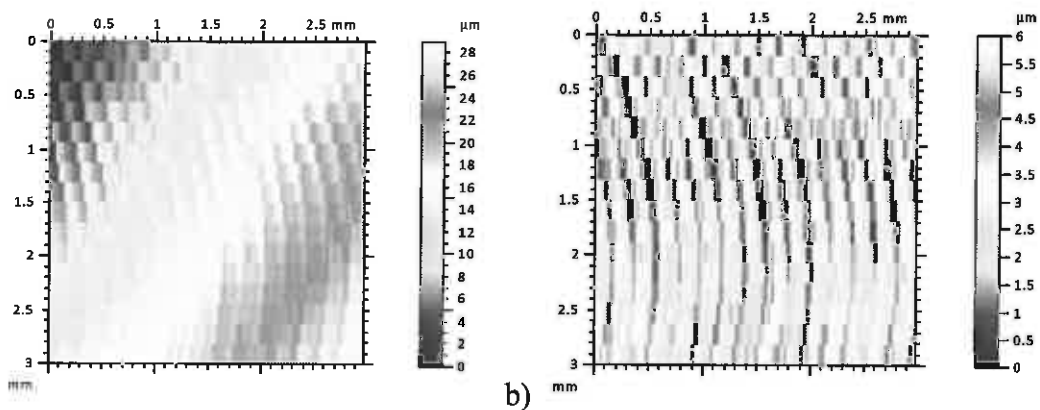
3.8. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums:
 a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,1$ mm/apgr.; $d=0,5$ mm; $v=120$ m/min ($Sa = 0,472$ μm)



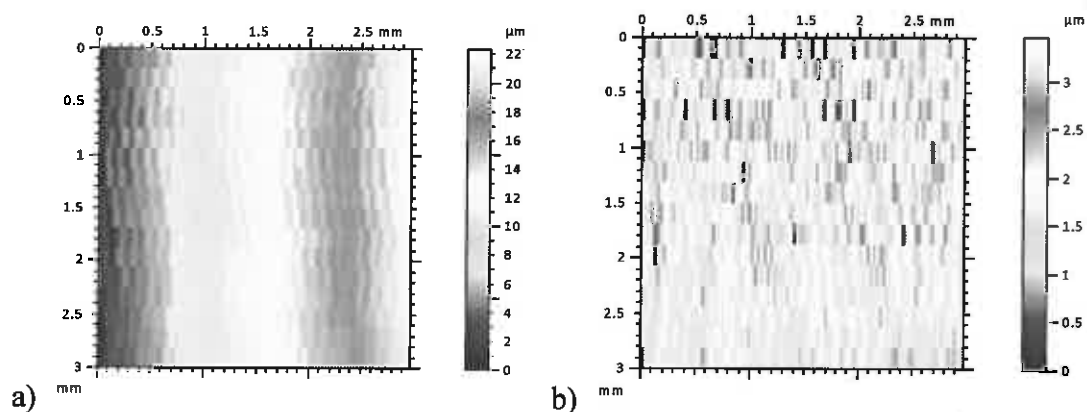
3.9. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums:
 a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,21$ mm/apgr.; $d=1$ mm; $v=210$ m/min ($Sa = 1,02$ μm)



3.10. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums:
 a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,13$ mm/apgr.; $d=1$ mm; $v=210$ m/min ($Sa = 0,871$ μm)



3.11. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums: a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,21$ mm/apgr.; $d=1$ mm; $v=100$ m/min ($S_a = 0,805$ μm)



3.12. att. Apstrādāto paraugu virsmas raupjuma mērījumu rezultātu grafiskais attēlojums: a) izmērītais paraugs pirms līmeņošanas; b) izmērītais paraugs pēc līmeņošanas. Parauga apstrādes tehnoloģiskie parametri: $f=0,13$ mm/apgr.; $d=1$ mm; $v=100$ m/min ($S_a = 0,407$ μm)

No visiem pieejamajiem 3D virsmas raupjuma parametriem eksperimentāli izgūta virsmas vidējā absolūtā novirze S_a , ko ieraksta eksperimentu rezultātu tabulā (3.3. tabula). 3.3. tabulā dota trīs mērījumu mēģinājumu vidējā vērtība. Kā redzams 3.2. – 3.12. attēlos, mērāmā lauka izmēri ir 3x3 mm robežās. Ņemot vērā relatīvi mazās virsmas raupjuma vērtības mērāmais lauks varētu būt arī 1x1 mm robežās un joprojām nodrošinātu apmierinošus mērījumu rezultātus. Mērāmā lauka lielumu izvēlas atbilstoši eksperimentam paredzētajam laikam, ko ražošanas apstākļos, protams, ekonomiski lietderīgi pēc iespējas samazināt.

Iestatītie tehnoloģiskie parametri un izmērītais 3D virsmas raupjums Sa

Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)	Sa (μm)
1.	0,25	1,5	190	1,37
2.	0,25	0,5	190	0,631
3.	0,1	0,5	190	0,388
4.	0,1	1,5	190	0,988
5.	0,1	1,5	120	0,635
6.	0,25	1,5	120	1,37
7.	0,25	0,5	120	1,09
8.	0,1	0,5	120	0,472
9.	0,21	1	210	1,02
10.	0,13	1	210	0,871
11.	0,21	1	100	0,805
12.	0,13	1	100	0,407

Regresijas analīzes galvenais uzdevums ir pētīt sakarības starp rezultatīvo pazīmi (Sa) un faktoriālajām pazīmēm (v, f, d) un novērtēt šīs sakarības funkciju:

$$Sa = f(v, f, d) + \varepsilon, \quad (3.8)$$

kur f - atbildes funkcija;

v, f, d - frēzēšanas procesa mainīgie;

ε - kļūda, kas izkliedēta uz Sa pa vidējo vērtību.

Ņemot vērā iepriekšējo vienādojumu (3.8), sakarību starp 3D virsmas raupjumu Sa un tehnoloģiskajiem parametriem v, f, d var attēlot šādi:

$$Sa = C \cdot f^{a_1} \cdot d^{a_2} \cdot v^{a_3}, \quad (3.9)$$

kur C – konstante;

a_1, a_2, a_3 - eksponenti.

Lai realizētu konstantes un eksponentu noteikšanu, matemātisko modeli linearizē, veicot šādu logaritmisko transformāciju:

$$\ln Sa = \ln C + a_1 \ln f + a_2 \ln d + a_3 \ln v, \quad (3.10)$$

Tālāk vienādojumu (3.10) vienkāršo formā (3.11), lai to varētu izmantot statistiskās analīzes programmā MiniTab. $\ln Sa$ tiek aizvietots ar y , $\ln C$ ar b_0 , $a_1 \ln f$ ar $b_1 x_1$, $a_2 \ln d$ ar $b_2 x_2$ un $a_3 \ln v$ ar $b_3 x_3$:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 . \quad (3.11)$$

Pirms regresijas analīzes veikšanas MiniTab datorprogrammā ir pieejama šādā tabula:

3.4. tabula

Izvēlētie tehnoloģiskie parametri, izmērītais un aprēķinātais 3D virsmas raupjums Sa prognozēšanas kļūdu

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

No 3.4. tabulas redzams, ka 9. līdz 12. pozīcijas ir kontroles mērījumi (iekrāsoti pelēkā krāsā). To tehnoloģisko parametru vērtības ņemtas ar nobīdi no robežvērtībām. 3.4. tabulas dati tiek implementēti programmā MiniTab un atbilstoši vienādojumiem (3.9) – (3.11), iegūts frēzēšanas procesa matemātisks modelis:

$$Sa = -0,403 + 3,33f + 0,446d + 0,00140v . \quad (3.12)$$

Pēc tam vienādojumu (3.12) var transformēt tā sākotnējā izskatā:

$$Sa = 987,82 \cdot f^{9,95} \cdot d^{1,4933} \cdot v^{1,0025} \quad (3.13)$$

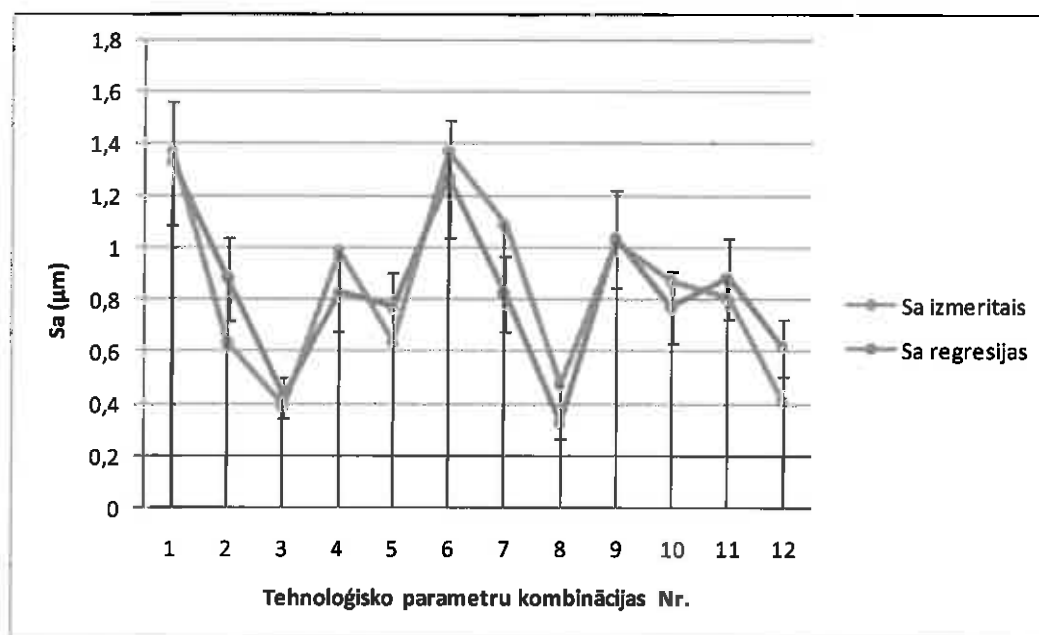
Pēc detaļas apstrādes un datu analīzes, izmantojot regresijas analīzi, var secināt, ka nerūsējošā tērauda (Stainless Steel 1.4301) apstrādē ar gala frēzi lielāku ietekmi uz virsmas raupjuma veidošanos rada griešanas dziļums d un padeve f . Griešanas ātrumam v šajā gadījumā ir minimāla ietekme. Jāņem vērā, ka pie citādiem apstrādes apstākļiem griešanas ātrums v var radīt pietiekami lielu vai pat būtisku ietekmi uz virsmas raupjuma veidošanos.

Veicot kvalitatīvu datu analīzi, iegūstam sekojošus rezultātus:

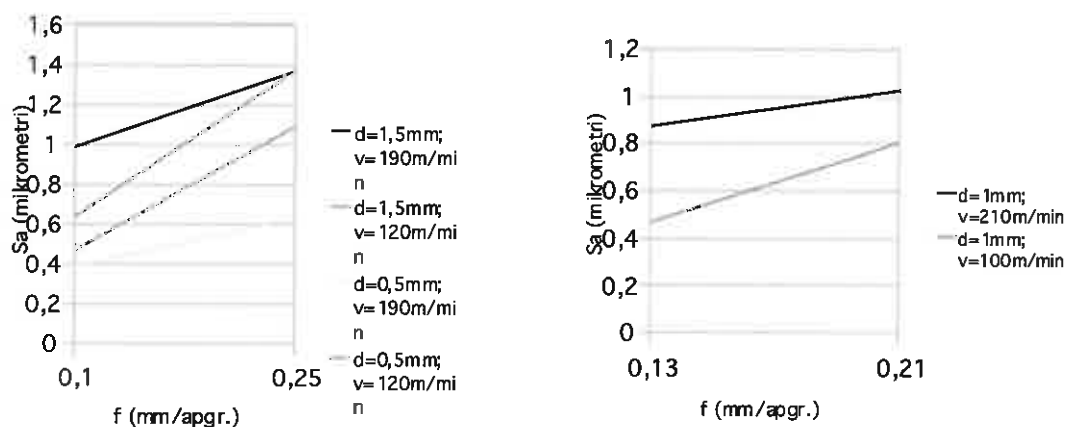
- vismazākais $Sa = 0,338\mu\text{m}$ ir tad, kad $f = 0,1\text{mm/apgr.}$; $d = 0,5\text{mm}$; $v = 190\text{m/min}$
- vislielākais $Sa = 1,37\mu\text{m}$ ir tad, kad $f = 0,25\text{mm/apgr.}$; $d = 1,5\text{mm}$; $v = 190\text{mm}$ vai 120m/min .

Redzams, ka vismazākais virsmas raupjums Sa ir sasniedzams, lietojot pēc iespējas mazāku padevi f un griešanas dziļumu d un pēc iespējas lielāku ātrumu v . Analizējot tehnoloģiskos parametrus pie vislielākā virsmas raupjuma Sa , redzams, ka tiek lietota vislielākā pieejamā padeve f un griešanas dziļums d , bet griešanas ātrumā v ietekme šajā gadījumā ir nebūtiska. Apkopojot abu ekstrēmo datu kopumu (vismazākais/vislielākais virsmas raupjums), varam secināt, ka virsmas raupjumu Sa ietekmē padeve f un griešanas dziļums d , bet griešanas ātruma v ietekme tā robežās (120 – 190m/min) ir minimāla.

Tālāk veikta izveidotā regresijas prognozēšanas modeļa precizitātes vai ticamības analīze, tās rezultāti ilustrēti 3.13. att.



3.13. att. Ar regresijas prognozēšanas modeli iegūto 3D virsmas raupjuma parametru Sa salīdzinošā analīze ar izmērītajiem 3D virsmas raupjuma parametriem Sa



3.14. att. 3D virsmas raupjuma S_a izmaiņas pie dažādām padeves f , griešanas dziļuma d un griešanas ātruma v vērtībām

No eksperimenta var secināt, ka regresijas analīze dod apmierinošu rezultātu 3D virsmas raupjuma prognozēšanas paņēmiena izstrādei atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Turklāt šeit atšķirībā no citām zināmām publikācijām virsmas raksturošanai tika lietots 3D virsmas raupjuma parametrs S_a , kas ļauj daudz precīzāk raksturot apstrādē iegūto virsmu.

Iegūtās sakarības tehnologs var izmantot, lai veiktu konkrētā materiāla (Stainless Steel 1.4301) apstrādi ar gala frēzi. Turpmākiem pētījumiem šos rezultātus var ievietot zināšanu datu bāzēs, ko izmanto tehnologi optimālu tehnoloģisko parametru iestatīšanai, pamatojoties uz virsmas raupjuma parametriem.

Tālāk nepieciešams noskaidrot, vai iespējams prognozēšanas metodiku pielietot arī prognozējot citu 3D virsmas raupjuma parametru izmaiņas atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem. Prognozēšanai tiek izvēlēts 3D virsmas raupjuma parametrs S_q . S_q apzīmē vidējo kvadrātisko novirzi no vidusplaknes. S_q mērvienība ir μm . S_q izskaitļo virsmas amplitūdu efektīvo vērtību.

Ievērojot iepriekš aprakstīto metodiku, izveido 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeli attiecībā uz S_q . 3.5. tabulā doti eksperimenta dati, kas ietver tehnoloģiskos parametrus: padevi f , griešanas dziļumu d un griešanas ātrumu v . Iegūts šāds pirmās kārtas regresijas vienādojums:

$$S_q = -0,417 + 3,87f + 0,530d + 0,00159v. \quad (3.14)$$

Eksperimenta tehnoloģiskie parametri, izmērītais Sq un ar regresijas prognozēšanas modeli iegūtais Sq_{regr}

Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)	Sq (μm)	Sq_{regr} (μm)
1.	0,25	1,5	190	1,6000	1,6476
2.	0,25	0,5	190	0,7720	1,1176
3.	0,1	0,5	190	0,5210	0,5371
4.	0,1	1,5	190	1,2100	1,0671
5.	0,1	1,5	120	0,8080	0,9558
6.	0,25	1,5	120	1,7000	1,5363
7.	0,25	0,5	120	1,3200	1,0063
8.	0,1	0,5	120	0,5850	0,4258
9.	0,21	1	210	1,2600	1,2596
10.	0,13	1	210	1,0700	0,9500
11.	0,21	1	100	1,0000	1,0847
12.	0,13	1	100	0,5010	0,7751

Ņemot vērā iegūto regresijas prognozēšanas vienādojumu un ar to iegūtos rezultātus, kas salīdzināti ar mērījumos iegūtajiem rezultātiem, konstatēts, ka Sq prognozēšanas modeļa prognozēšanas kļūda ir 15,13%.

Izveidots arī prognozēšanas modelis 3D virsmas raupjuma parametram Sk . Prognozēšanas modeļa izstrādē izmantota iepriekš aprakstītā 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa iegūšanas metodika, izmantojot regresijas analīzi. 3.6. tabulā doti eksperimenta sākumdati (tehnoloģiskie parametri), kā arī izmērītais Sk un ar regresijas prognozēšanas vienādojumu iegūtais Sk_{regr} .

Eksperimenta tehnoloģiskie parametri, izmērītais Sk un ar regresijas prognozēšanas modeli

iegūtais Sk_{regr}

Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)	Sk (μm)	Sk_{regr} (μm)
1.	0,25	1,5	190	3,0300	2,6908
2.	0,25	0,5	190	1,0800	1,7968
3.	0,1	0,5	190	0,4790	0,7588
4.	0,1	1,5	190	2,1700	1,6528
5.	0,1	1,5	120	0,8490	1,4134
6.	0,25	1,5	120	2,0800	2,4514
7.	0,25	0,5	120	2,1600	1,5574
8.	0,1	0,5	120	0,8330	0,5194
9.	0,21	1	210	2,0300	2,0354
10.	0,13	1	210	1,6000	1,4818
11.	0,21	1	100	1,8700	1,6592
12.	0,13	1	100	0,9290	1,1056

Iegūts šāds pirmās kārtas regresijas vienādojums:

$$Sk = -1,03 + 6,92f + 0,894d + 0,00342v. \quad (3.15)$$

Ņemot vērā iegūto prognozēšanas vienādojumu un ar to iegūtos rezultātus, kas salīdzināti ar mērījumos iegūtajiem datiem, konstatēts, ka Sk prognozēšanas modeļa prognozēšanas kļūda ir 35,13%.

3.3. Eksperimentāla prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā

Papildus regresijas prognozēšanas modeļa izstrādei frēzēšanā, realizēta eksperimentāla regresijas prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā. Šajā gadījumā veikti divi eksperimenti, katrā apstrādājot dažādas markas materiālu pie atšķirīgiem griešanas režīmiem.

Par apstrādājamo materiālu tiek izmantots kalibrēts automāttērauda stieņa materiāls (11SMnPb30), kurš tiek apvirpots pie dažādiem režīmiem. Materiālam piemīt laba apstrādājamība ar griezējinstrumentiem. Atvieglotu skaidas veidošanos un līdz ar to mazu

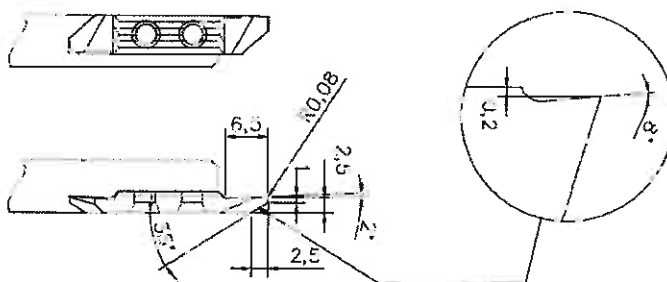
virsmas raupjumu nodrošina paaugstināts sēra, fosfora un svina saturs. Strādājot ar lieliem griešanas ātrumiem, tērauds sakarst. Lai novērstu sarkanlūztamību automātu tēraudos ir jāpalielina mangāna saturs. Automāttēraudu apstrādājamību ar griešanu var uzlabot ar svina piedevām. Svina piedevas būtiski sasmalcina skaidu, samazina berzi starp instrumentu un apstrādājamo detaļas virsmu. Materiāla ķīmiskais sastāvs ir uzradīts 3.7. tabulā:

3.7. tabula

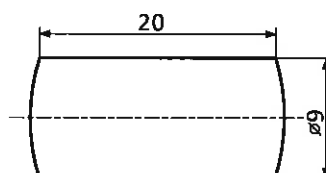
Materiāla ķīmiskais sastāvs

Materiāls	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Pb %
11SMnPb30	0,080	0,040	1,280	0,067	0,322	0,240

Vienlaicīgi ar materiāla izvēli tiek izveidota tabula (skatīt tabulu Nr. 3.8.) ar apstrādes jeb tehnoloģiskajiem režīmiem. Ir publikācijas, kur papildus padevei, griešanas ātrumam un griešanas dziļumam tiek ņemts vērā arī apstrādājamais materiāls un griežņa ģeometrija. Šajā darbā kā tehnoloģiskie parametri tika ņemti: v – griešanās ātrums (m/min); f – padeve (mm/apgr.); d – griešanas dziļums (mm). Apstrādājamais materiāls un griežņa ģeometrija tika ņemta tik daudz vērā, lai to pielāgotu jau izvēlēto tehnoloģisko parametru robežas.



3.15. att. Virpošanas griezējinstrumentis ar plāksnīti



3.16. att. Apstrādājamā detaļa

Apstrādājamo materiālu parasti nosaka projektētājs jeb konstruktors un no tehnologa puses to praktiski nav iespējams ietekmēt. Teorētiski un arī praktiski tehnologs var ietekmēt griežņa ģeometriju (patiesībā to izvēlās tehnologs). Taču tas tiek izdarīts apstrādes operācijas sākumā un veikt kaut kādas izmaiņas procesa gaitā var būt ekonomiski nelietderīgi. Taču ļoti

elastīgi apstrādes gaitā ir iespējams mainīt tādus parametrus kā f , d un v . Tas nozīmē, ka pie nelabvēlīga virsmas raupjuma iegūšanas, operators vai tehnologs var elastīgi mainīt šos parametrus, tādējādi panākot optimālu virsmas profila raupjumu (virsmas profila raupjums, kas ir uzdots tehnoloģiskajā kartē). Tāpēc arī šie parametri tika izvēlēti.

3.8. tabula

Tehnoloģisko parametru izvēle

Nr.	v (m/min)	f (mm/apgr.)	d (mm)	vf	vd	fd	vv	ff	dd
1	130	0,1	0,5	13	65	0,05	16900	0,01	0,25
2	130	0,1	1,5	13	195	0,15	16900	0,01	2,25
3	130	0,4	1,5	52	195	0,6	16900	0,16	2,25
4	130	0,4	0,5	52	65	0,2	16900	0,16	0,25
5	170	0,1	0,5	17	85	0,05	28900	0,01	0,25
6	170	0,1	1,5	17	255	0,15	28900	0,01	2,25
7	170	0,4	0,5	68	85	0,2	28900	0,16	0,25
8	170	0,4	1,5	68	255	0,6	28900	0,16	2,25
9	200	0,1	0,5	20	100	0,05	40000	0,01	0,25
10	200	0,1	1,5	20	300	0,15	40000	0,01	2,25
11	200	0,4	0,5	80	100	0,2	40000	0,16	0,25
12	200	0,4	1,5	80	300	0,6	40000	0,16	2,25

Kā redzams no 3.8. tabulas, tad griešanas režīmi tika izvēlēti šādās robežās:

- griešanās ātrums v : $130 \leq v \leq 200$ m/min.;
- padeve f : $0,1 \leq f \leq 0,4$ mm/apgr.;
- griešanas dziļums d : $0,5 \leq d \leq 1,5$ mm.

Robežu noteikšana ir ļoti svarīga, jo ņemot parametrus ārpus noteiktajām robežām, var tikt izkropļoti analīzes dati un iegūtā empīriskā formula var izrādīties nepareiza, t.i., nav iespējams to lietot, lai turpmāk paredzētu virsmas raupjuma parametrus atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem.

Pēc tam, izmantojot iepriekš aprakstīto regresijas prognozēšanas modeļa metodika, tiek iegūts pirmās kārtas regresijas vienādojums:

$$Sa_1 = -0,806 + 0,00234v + 9,47f + 0,195d \quad (3.16)$$

Sekojoši tiek izveidots otrās kārtas regresijas vienādojums:

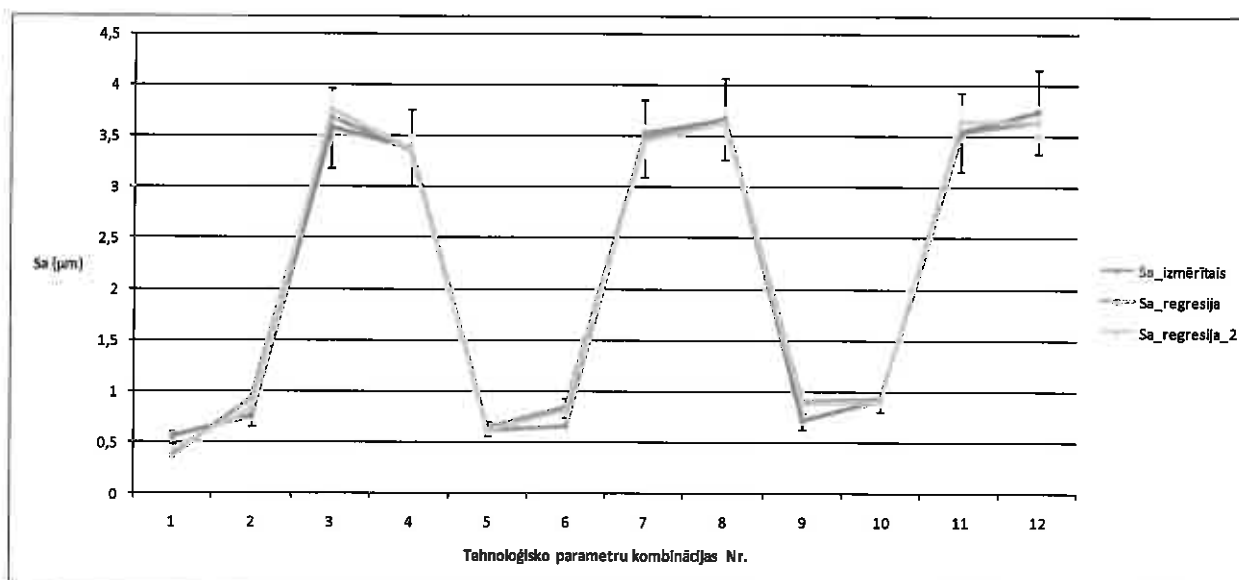
$$Sa_2 = -0,71 - 0,0076v + 11,0f + 1,15d - 0,00863vf - 0,00561vd - 0,078fd + 0,000054vv \quad (3.17)$$

3.9. tabula

11SMnPb30 virpošanas eksperimenta rezultāti

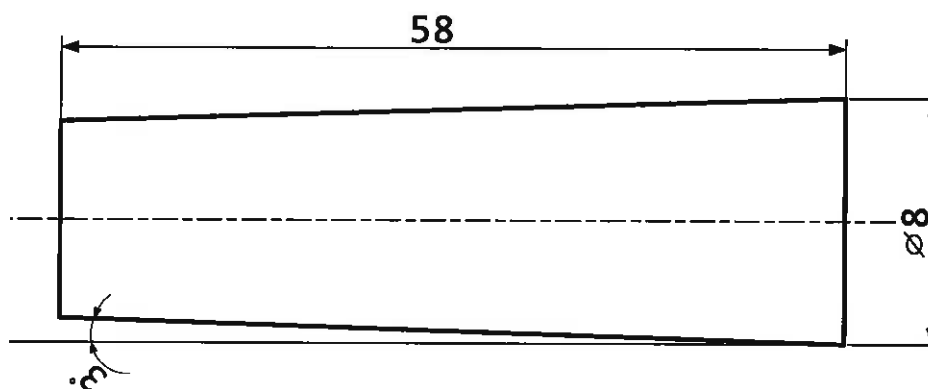
Nr.	Sa (μm)	Sa _{apr_1}	Sa _{apr_2}	ΔSa_{apr_1}	ΔSa_{apr_2}	$\Delta Sa_{apr_1}\%$	$\Delta Sa_{apr_2}\%$
1	0,36	0,5427	0,40951	-0,1827	-0,04951	50,75	13,75278
2	0,92	0,7377	0,82371	0,1823	0,09629	19,81522	10,4663
3	3,68	3,5787	3,75204	0,1013	-0,07204	2,752717	1,957609
4	3,36	3,3837	3,36124	-0,0237	-0,00124	0,705357	0,036905
5	0,61	0,6363	0,60699	-0,0263	0,00301	4,311475	0,493443
6	0,65	0,8313	0,79719	-0,1813	-0,14719	27,89231	22,64462
7	3,53	3,4773	3,45516	0,0527	0,07484	1,492918	2,120113
8	3,66	3,6723	3,62196	-0,0123	0,03804	0,336066	1,039344
9	0,90	0,7065	0,8685	0,1935	0,0315	21,5	3,5
10	0,92	0,9015	0,8907	0,0185	0,0293	2,01087	3,184783
11	3,54	3,5475	3,639	-0,0075	-0,099	0,211864	2,79661
12	3,64	3,7425	3,6378	-0,1025	0,0022	2,815934	0,06044

Pirmās kārtas vienādojuma prognozēšanas precizitāte ir 89% (88,79%) jeb prognozēšanas kļūda ir 11% (11,21%). Savukārt, otrās kārtas vienādojuma prognozēšanas precizitāte ir 95% (94,83%) jeb prognozēšanas kļūda ir 5% (5,17%). 3.17. attēlā ir ilustrēti ar regresijas modeli iegūtie dati un izmērītie 3D virsmas raupjuma parametri.



3.17. att. Ar regresijas prognozēšanas modeli iegūto 3D virsmas raupjuma parametru Sa salīdzinošā analīze ar izmērītajiem 3D virsmas raupjuma parametriem Sa

Kā otra materiāla marka tiek izmantota šajā darbā nerūsējošais tērauds X8CrNi18 – 9, kurš tiek apvirpots pie dažādiem apstrādes režīmiem. Lai iegūtu tēraudu ar noteiktām mehāniskām īpašībām, tam pievieno speciālus piemaisījumus, tie ir legējošie elementi, hromu (Cr), niķeli (Ni), varu (Cu) un citus. Tēraudu, kurš satur vienu vai vairākus legējošos elementus, sauc par legētu tēraudu. Nerūsējošais tērauds ir kopīgs apzīmējums tiem tērauda veidiem, kas satur vismaz 12% hroma (Cr). Citas svarīgas legējošās piedevas ietver niķeli un korozijizturības iegūšanai – molibdēns. Kopīga pazīme šiem tērauda tiptiem, salīdzinot ar citiem tērauda veidiem ir tāda, ka tiem piemīt izcila korozijas izturība oksidēšanas vidē.



3.18. att. Apstrādājamā sagatave

Nerūsējošo tēraudu sāka pielietot tikai ap Pirmā pasaules kara beigām, un to izmantoja galvenokārt mašīnbūves un ķīmiskās industrijas nozarēs. Mūsdienu nerūsējošo tēraudu izmanto vairākiem nolūkiem, sākot ar galda piederumiem mājturībā un līdz lielai virknei komponentu pārtikas produktu ražošanā, mašīnbūvē un automobiļu ražošanā. Materiāla ķīmiskais sastāvs, kas tiek izmantots eksperimentā ir parādīts 3.10. tabulā.

3.10. tabula

Materiāla ķīmiskais sastāvs

Materiāls	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Cu%	N%
X8CrNi18 - 9	≤0,1	≤1,0	≤2,0	≤0,045	≤0,15 - 0,35	17,00 - 19,00	8,00 - 10,0	≤1,0	≤0,11

Pēc materiāla izvēles tiek izveidota tabula ar apstrādes jeb tehnoloģiskiem režīmiem. Šeit kā tehnoloģiskie parametri tiek ņemti: v – griešanās ātrums (m/min); f – padeve (mm/apgr.); d – griešanas dziļums (mm).

3.11. tabulā ir doti nerūsējošā tērauda (X8CrNi18 – 9) apvirpošanai iestatāmie tehnoloģiskie parametri un to reizinājumi, lai sastādītu otrās kārtas prognozēšanas vienādojumu.

Tehnoloģisko parametru izvēle

Nr.	v (m/min)	f (mm/apgr.)	d (mm)	vf	vd	fd	vv	ff	dd
1	80	0,05	0,5	4	40	0,025	6400	0,0025	0,25
2	80	0,05	1,5	4	120	0,075	6400	0,0025	2,25
3	80	0,10	1,5	8	120	0,15	6400	0,01	2,25
4	80	0,10	0,5	8	40	0,05	6400	0,01	0,25
5	90	0,05	0,5	4,5	45	0,025	8100	0,0025	0,25
6	90	0,05	1,5	4,5	135	0,075	8100	0,0025	2,25
7	90	0,10	0,5	9	45	0,05	8100	0,01	0,25
8	90	0,10	1,5	9	135	0,15	8100	0,01	2,25
9	100	0,05	0,5	5	50	0,025	10000	0,0025	0,25
10	100	0,05	1,5	5	150	0,075	10000	0,0025	2,25
11	100	0,10	0,5	10	50	0,05	10000	0,01	0,25
12	100	0,10	1,5	10	150	0,15	10000	0,01	2,25

Kā redzams no 3.9. tabulas, tad griešanas režīmi tika izvēlēti šādās robežās:

- griešanās ātrums v : $80 \leq v \leq 100$ (m/min.);
- padeve f : $0,05 \leq f \leq 0,1$ (mm/apgr.);
- griešanas dziļums d : $0,5 \leq d \leq 1,5$ (mm).

Robežu noteikšana ir ļoti svarīga lieta, jo lietojot parametru vērtības ārpus noteiktajām robežām, analīzes dati var tikt iegūti izkropļoti, kas vēlāk ar izveidot nepatiesu prognozēšanas vienādojumu, t.i., praksē nepielietojamu regresijas vienādojumu. Parasti tehnoloģisko parametru vērtības tiek ņemtas no tehnologa rokasgrāmatas vai griezējinstrumenta kataloga.

Pēc tam, izmantojot iepriekš aprakstīto regresijas prognozēšanas modeļa metodika, tiek iegūts pirmās kārtas regresijas vienādojums (3.18):

$$Sa_1 = -0,970 + 0,0191v + 2,23f + 0,0817d \quad (3.18)$$

Attiecīgi tiek izveidots otrās kārtas regresijas vienādojums (3.19):

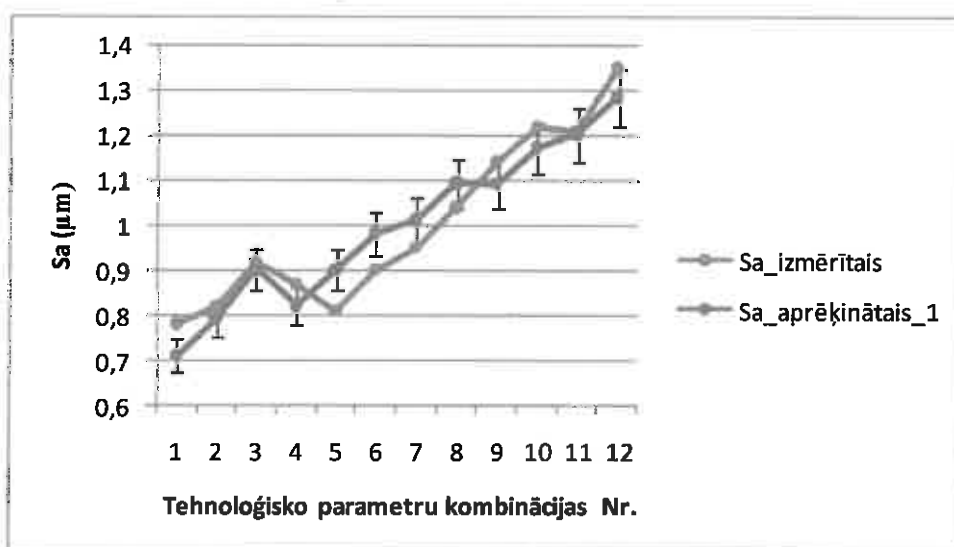
$$Sa_2 = 8,53 - 0,189v + 1,32f - 0,246d + 0,0050vf + 0,00325vd + 0,467fd + 0,00114vv \quad (3.19)$$

3.12. tabula

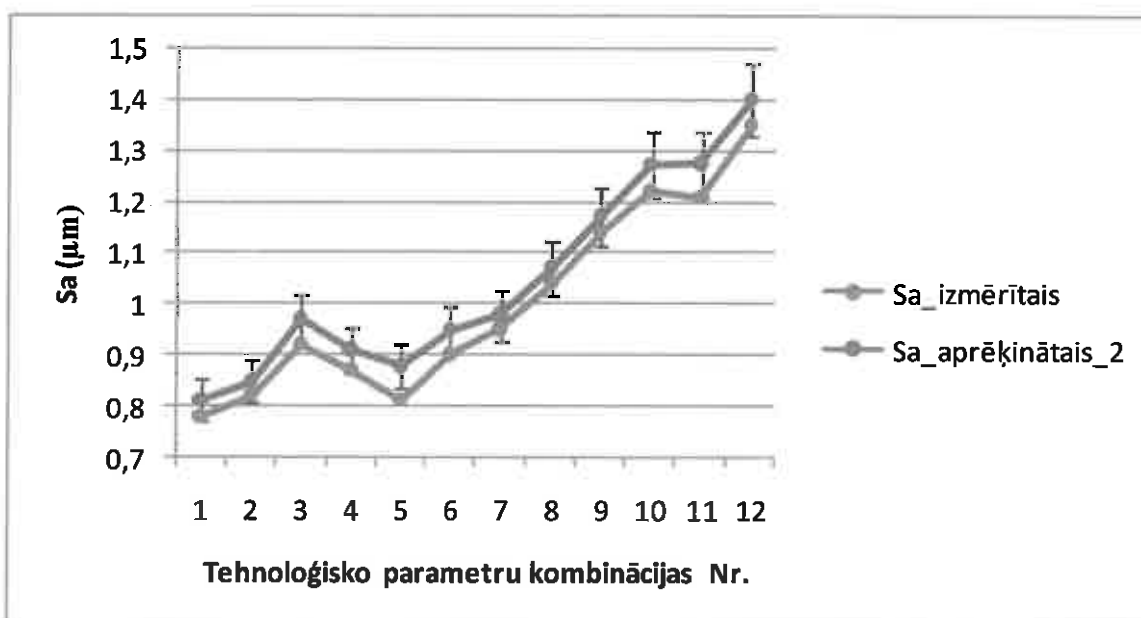
Ekspierimenta rezultāti

Nr.	$Sa_{izm\bar{e}r}$ (μm)	Sa_{apr_1}	Sa_{apr_2}	ΔSa_{apr_1}	ΔSa_{apr_2}	$\Delta Sa_{apr_1}\%$	$\Delta Sa_{apr_2}\%$
1	0,78	0,71035	0,810675	0,06965	-0,030675	8,929487	3,783884
2	0,82	0,79205	0,848025	0,02795	-0,028025	3,408537	3,304737
3	0,92	0,90355	0,96905	0,01645	-0,04905	1,788043	5,061658
4	0,87	0,82185	0,90835	0,04815	-0,03835	5,534483	4,221941
5	0,81	0,90135	0,877425	-0,09135	-0,067425	11,27778	7,684417
6	0,90	0,98305	0,947275	-0,08305	-0,047275	9,227778	4,990631
7	0,95	1,01285	0,9776	-0,06285	-0,0276	6,615789	2,823241
8	1,04	1,09455	1,0708	-0,05455	-0,0308	5,245192	2,876354
9	1,14	1,09235	1,172175	0,04765	-0,032175	4,179825	2,744897
10	1,22	1,17405	1,274525	0,04595	-0,054525	3,766393	4,278064
11	1,21	1,20385	1,27485	0,00615	-0,06485	0,508264	5,086873
12	1,35	1,28555	1,40055	0,06445	-0,05055	4,774074	3,609296

Pēc 5. nodaļās dotās kļūdas aprēķina metodikas tiek iegūts, ka pirmās kārtas vienādojuma precizitāte ir 95% (94,57%) jeb prognozēšanas kļūda ir 5% (5,43%). Savukārt, otrās kārtas vienādojuma precizitāte ir 96% (95,79%) jeb prognozēšanas kļūda ir 4% (4,21%).



3.19. att. Ar pirmās pakāpes regresijas prognozēšanas modeli iegūto 3D virsmas raupjuma parametru Sa salīdzinošā analīze ar izmērītajiem 3D virsmas raupjuma parametriem Sa



3.20. att. Ar otrās pakāpes regresijas prognozēšanas modeli iegūto 3D virsmas raupjuma parametru Sa salīdzinošā analīze ar izmērītajiem 3D virsmas raupjuma parametriem Sa

Ņemot vērā šajā nodaļā aprakstīto regresijas analīzi un veikto eksperimentu rezultātus tiek iegūti šādi secinājumi:

- 1) Regresijas analīze ir izmantojama, lai iegūtu 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļus.
- 2) Pirmās pakāpes regresijas vienādojuma prognozēšanas kļūda frēzēšanā ir 19%. Pirmās kārtas regresijas vienādojuma prognozēšanas kļūda virpojot X8CrNi18 – 9 ir 5%, bet virpojot 11SMnPb30 ir 11%.

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

4.1. Fazilōģikas jēdziens, tā vēsture un attīstība

Tradicionālā Aristoteļa divu vērtību loģika (paties, nepaties) ir dominējusi gandrīz visā zinātnes attīstības gaitā. Šajā loģikā, apskatot kādu kopu, tiek noteikts, vai kāds elements tai pieder vai nepieder. Tomēr šāda pieeja ne vienmēr ļāva pilnvērtīgi attēlot reālo situāciju un laika gaitā tika izstrādātas dažādas loģikas teorijas, kurās tiek paredzētas vērtības arī starp patieso un nepatieso.

1965. gadā elektronikas un datorzinību profesors Zadehs (L.A. Zadeh) no Berkeley universitātes publicēja savu darbu "Fuzzy sets" (neskaidrās vai fazi- kopas), kurā aprakstīja neskaidro kopu matemātiku, kā arī fazilōģiku [23]. No turienes arī šī neskaidrības loģikas teorija ieguva savu nosaukumu – fazilōģika. Fazilōģika ir uzskatāma par tradicionālās loģikas papildinājumu, lai būtu iespējama daļējas patiesības vērtību apstrāde – patiesuma vērtības starp "pilnīgi paties" (*completely true*) un "pilnīgi nepaties" (*completely false*). Šī teorija piedāvāja izmantot piederības funkcijas, kuras darbojas robežās no 0 (nepaties) līdz 1 (paties). Fazilōģikai piemīt izcilas spējas definēt cilvēka veselā saprāta domāšanas veidu, lēmumu pieņemšanu un citus tikai cilvēkam piemītošos domāšanas veidus [2].

Fazilōģika ir matemātiskās loģikas novirziens, kas darbojas ar neskaidriem jēdzieniem, bet neskatoties uz to tā ir matemātiski formāla. Fazilōģika ir neskaidrības loģika, nevis loģika, kura ir neskaidra – fazilōģika palīdz ar loģiskām metodēm apstrādāt situācijas un informāciju, kuras nav iespējams precīzi nodefinēt, izmērīt, klasificēt un noteikt precīzas likumsakarības. LZA Terminoloģijas komisija attiecībā uz fazilōģiku ir akceptējusi sekojošu skaidrojumu: Fazilōģika (*Fuzzy logic*) – loģika, kas speciāli izveidota zināšanu un cilvēka domāšanas procesu attēlošanai. Fazilōģika tiek plaši izmantota ekspert- un mākslīgā intelekta sistēmās. Atšķirībā no binārās loģikas vērtību „aplams” un „paties” vietā fazilōģika operē ar loģiskiem mainīgajiem, kas pieņem veselu virkni dažādu vērtību, piemēram, „pareizi”, „nepareizi”, „ne gluži pareizi”, „vairāk vai mazāk pareizi”, „pavisam pareizi”, „kļūdaini”, „ne pārāk kļūdaini”, „visai kļūdaini”, „augstākā mērā kļūdaini”, kas to padara tuvāku cilvēka domāšanas veidam [114]. Tātad tradicionālā loģikā tiek izmantoti 0 vai 1 jeb „aplams” un „paties”. Pārējās vērtības ir izslēgtas. Turpretī fazilōģika darbojas visās vērtībās sākot no 0 beidzot ar 1. Fazilōģikas izpratnē ir iespējams arī 0,9 vērtība, kas attiecībā uz fazilōģiku būtu traktējams kā „gandrīz paties”.

Fazilōģika ir elements, kam ir svarīga nozīme tā pielietošanai vadības sistēmās un tēlu pazīšanā. Tā ir balstīta uz novērojuma, ka cilvēki var pieņemt labus lēmumus, pamatojoties uz neskaitlisku informāciju. Fazi modeļi ir matemātiski līdzekļi, lai reprezentētu neskaidru un neprecīzu informāciju. No turienes cēlies termins fazi, angļu valodā „fuzzy“, kas tulkojams kā neskaidrs. Šādi modeļi spēj atpazīt, manipulēt, interpretēt un lietot datus un informāciju, kas ir neskaidrai vai kurai trūkst precizitātes. Fazilōģikas paņēmieni ietver lielāku spriestspēju un lēmumu risināšanas spēju nekā ANN (*Artificial Neuro Network* - mākslīgie neirotikli) [30].

Fazilōģikas tehnoloģijas un iekārtas ir attīstītas un veiksmīgi pielietotas tādās nozarēs kā robotika, kustību vadība, attēlu apstrāde un mašīnredze, mašīnmācība un inteligēnto sistēmu izstrādē. Daži fazi loģikas risinājumi ir ietverti automašīnu automātiskajās pārnesumu kārbās, automātiskās veļas mazgāšanas mašīnās un helikopteros, kas paklausā balsis komandām [35]. Mūsdienās fazilōģika jeb vairāklīmeņu loģika tiek lietota dažādās sfērās sākot no autobūvēs (ABS un stabilitātes kontroles sistēmu vadība), aviācijas (datu kontrole un apstrāde) līdz mājsaimniecībai (sadzīves elektronikas vadībā) u.c. tautsaimniecības nozarēm. Fazilōģika nav balstīta uz noteiktām matemātiskām formulām, kas dažreiz izraisa diskusijas par tās lietderību eksaktajā zinātnē. Taču fazilōģikas praktiskie pielietojumi ir parādījuši pretējo. Fazilōģika ļauj vizualizēt esošos procesus un pārņests šo procesu īpašības lingvistiskā formā. Tiek lietoti tādi termini kā „ja - tad”, tādējādi ļaujot sasniegt vēlamu rezultātu. Fazilōģika ļauj vizualizēt doto risinājumu. Ir zināms, ka virsmas raupjuma paredzēšana atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem un to vadība vēlamā virsmas raupjuma sasniegšana ietver sarežģītu un ne vienmēr paredzamus aprēķinus. Tieši šādu problēmu risināšanai varētu būt noderīga fazilōģika. Daļēji var teikt, ka fazilōģika mēģina simulēt vai atdarināt cilvēka veselā saprāta darbību. Fazilōģikas sistēma ietver pieredzi, loģisko lēmumus un tādējādi ir ļoti noderīga tādās sistēmās, kuru vadībā tika likts uzsvars uz cilvēku-operatoru. Tāpēc lai arī pēdējos gados ražošana ir attīstījies un ir parādījušies jauni, uzlaboti CNC apstrādes centri, tomēr to vadība bez cilvēka-operatora vēl nav iedomājama. Griešanas režīmu iestatīšanai un korekcijai liela vērtība tiek piešķirta tieši operatora pieredzei un dedukcijas spējām (loģikai). Ar šo darbu ir mēģinājums cilvēka-operatora spriešanas sistēmu ieviest CNC darba galdu sistēmās, tādējādi vēl vairāk automatizējot apstrādes centrus un paaugstinot to ražību kā arī apstrādāto detaļu kvalitāti (jo īpaši, virsmas raupjumu).

Galvenie ieguvumi no fazilōģikas izmantošanas dažādās sistēmās ir: vienkāršots un saīsināts izstrādes process; vienkāršāka ieviešana un iespējama “lietotājam draudzīgāka” (*user-friendly*) un efektīvāka darbība

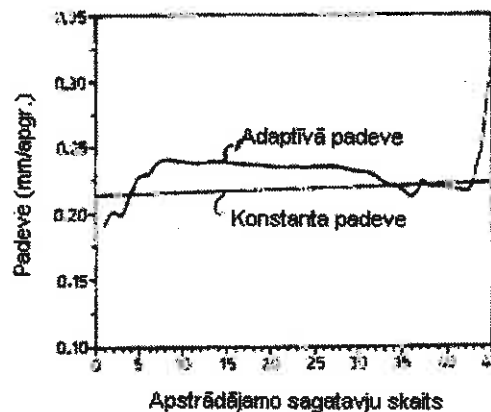
Novērtējot faziloģikas samērā plašo pielietojumu dažādās tehniskās, kā arī biznesa jomās, var secināt, ka tā daudzos gadījumos ir pamatota alternatīva tradicionālās loģikas sistēmām, taču nereti tā ir arī vienīgā iespēja, lai atrisinātu kādu problēmu.

Faziloģikas izmantošanas iespējas kādā noteiktā sfērā nosaka vairāki aspekti. Pastāv sfēras, kurās priekšroka dodama tradicionālās loģikas sistēmām, un sfēras, kurās priekšroka dodama faziloģikas sistēmām. Taču ir virkne sfēru, kurās atkarībā no apstākļiem, vienas un tās pašas problēmas risināšanai sekmīgi var izmantot gan faziloģikas, gan arī tradicionālās loģikas sistēmas. Faziloģikas izmantošanai ir priekšrocības situācijās: kad jāapskata kompleksi procesi, kuriem ir sarežģīts vai arī nav izstrādāts matemātiskais modelis. Lai gan faziloģikas sistēma varētu nebūt tik precīza kā sistēma, kura balstīta uz precīza matemātiskā modeļa, bieži vien tā ir vienīgā iespēja ar pieņemamu precizitāti apskatīt sarežģītus procesus – papildus darba ieguldījumi, lai izstrādātu precīzu, matemātiski pamatotu procesa aprakstu būs pārāk lieli, attiecībā pret nelielo precizitātes pieaugumu salīdzinājumā ar faziloģikas sistēmām. Kad jāapskata procesi, kuriem ir izteikti nelineārs raksturs – šādos gadījumos tradicionālās loģikas sistēmai būtu jāietver ļoti liels skaits dažādu nosacījumu, kas precīzi aprakstītu katru faktoru kombināciju un rezultātu atkarībā no tiem. Faziloģika ļauj vispārināt šos nosacījumus un būtiski samazināt nosacījumu skaitu. Faziloģika noder, ja ir jāapraksta procesi, par kuriem pieejamās ekspertu zināšanas ir tikai vārdiski formulētas – piemēram, eksperts, raksturojot savu rīcību, dažādās situācijās, to apraksta ar izteikumiem: ja raupjums ir diezgan raupjš, tad jāsamazina padeve. Šādā veidā eksperts apraksta savas zināšanas par to, kā rīkoties dažādu faktoru kombināciju gadījumā un faziloģikas sistēma dod iespēju uzkrāt šīs zināšanas tieši tādā formā, nezaudējot tajās ietvertu jēgu.

Mēģinājumus izstrādāt adaptīvu tehnoloģisko procesu vadību, izmantojot faziloģiku, ir veikušas ne tikai zinātniskas institūcijas, bet arī tādi autobūves līderi kā Ford un Peugeot. Tas vien norāda, ka materiālu apstrāde, balstoties uz adaptīvo vadību, tiek vērtēta ļoti augstu.

Viens no šādiem adaptīvās vadības risinājumiem ir aprakstīts patentā US4926309 [92] (Ford Motor Company, 1990) ar nosaukumu „Mākslīgais intelekts virsmas raupjuma adaptīvās apstrādes vadībai“. Šajā izgudrojumā tehnoloģisko parametru ietekme uz virsmas raupjumu tiek novērtēta ar matemātiskā modeļa palīdzību, konkrēti $R=[1262,79] \cdot f^2/r$, kur R ir virsmas profila raupjums mikrocollās, f ir darba padeve un r ir griezējinstrumenta virsotnes rādiuss. Šāds sakarību modelis ir balstīts uz ģeometriskiem aprēķiniem un neņem vērā daudzus reālā apstrādē sastopamus faktorus kā mašīnas vibrācijas, EDzV klātbūtni, apstrādes un citus faktorus. Šajā patentā ir ļoti uzskatāmi parādīts kā adaptīvie griešanas režīmi atšķiras

no konstantiem griešanas režīmiem (režīmi, kas iestatīti griešanas sākumā un darba gaitā netiek mainīti). Dotajā 4.1. att. ir parādīta adaptīvās padeve attiecībā pret konstantu padevi.



4.1. att. Konstantās un adaptīvās padeves salīdzinājums. Pārpublicēts no US4926309 [92]

Ir zināms arī Eiropas patents EP0562632B1 [96] (Toyodā Koki Kabushiki Kaisha) ar nosaukumu „Metode un aparāts sagataves slīpēšanai“. Izgudrojumā tiek lietota adaptīvā vadība un vienā no adaptīvās vadības variantiem tiek izmantota fazilōģika. Šī metode un aparāts tiek lietota, lai kontrolētu detaļas ārējos izmērus jeb makro izmērus. Līdz ar to, pati sistēma tiek izmantota makro izmērus adaptīvai vadībai un nenodrošina virsmas raupjuma adaptīvu vadību. Taču šāda sistēma parāda to, ka fazilōģika var tikt izmantota apstrādes tehnolōģijās.

Kāpēc tika izvēlēta tieši fazilōģika? Kā zināms, tad sistēmas virsmas raupjuma paredzēšanai atkarībā no tehnolōģiskajiem parametriem vienmēr ir bijušas sarežģītu matemātisko vienādojumu kompleksi. Šo sistēmu aprakstīšana ir kompleksa un ne vienmēr ir iespējams sasniegt gaidāmo rezultātu. Vēl vairāk, kad nonāk līdz šo sistēmu vadībai, tad vairums procesu aprakstošās formulas nav spējīgas pildīt savu uzdevumu.

Kā viens no risinājumiem šādu kompleksu problēmu risināšanai (virsmas raupjuma prognozēšana atkarībā no tehnolōģiskajiem parametriem un to adaptīvā vadība) ir fazilōģikas izmantošana.

4.2. Fazilōģikas ekspertu sistēma

Kā zināms, tad apstrādes tehnolōģisko parametru iestatīšana ir atkarīga no tehnologa vai CNC darba galda operatora, kas bieži vien neskaidrā (*fuzzy*) un intuitīvā veidā, kur operators balstoties uz savu pieredzi un zināšanām, iestata nepieciešamos tehnolōģiskos parametrus, lai sasniegtu vēlamu virsmas raupjumu. Tieši šādos gadījumos var kalpot fazilōģikas ekspertu sistēma, jo tā apvieno cilvēku lingvistisko domāšanu ar datoru precizitāti

un ātrumu. No informācijas tehnoloģiju skatupunkta, Fazi vadība ir uz likumiem balstīta ekspertu sistēma. Taču skatoties no vadības sistēmu tehnoloģiju skatupunkta tā galvenokārt ir nelineāru raksturlielumu lauku kontrolleris.

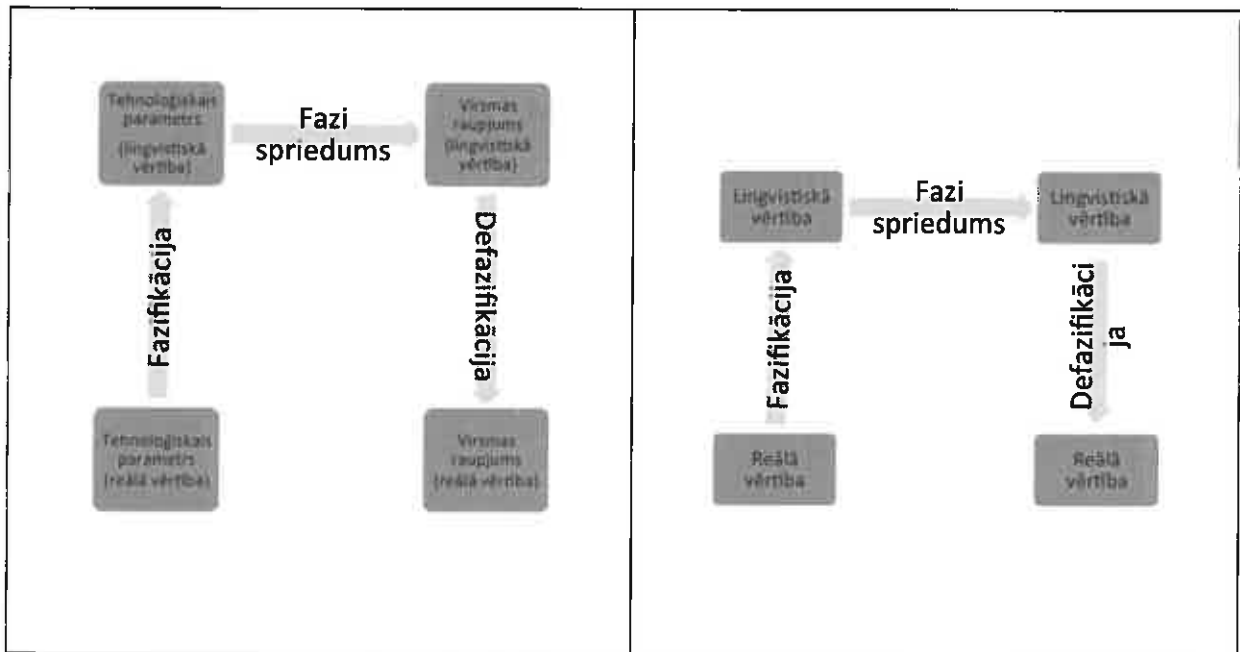
Promocijas darba mērķis ir izveidot metodiku virsmas raupjuma prognozēšanai atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem un salīdzināt fazilōģikas un regresijas metodikas ceļā iegūtos modeļus.

4.3. Fazilōģikas ekspertu sistēmas darbības posmi

Lai izveidotu prognozēšanas sistēmu ir jāievēro fazilōģikas sistēmas darbības posmi jeb fāzes. Fazilōģikas sistēmu darbību var izdalīt 3 fāzes (skatīt 4.2. att.):

- fazifikācija, kuras laikā reālās vērtības (piemēram – griešanas ātrums un padeve), izmantojot piederības funkcijas tiek izteiktas lingvistiskā veidā – ļoti ātrs, ātrs, vidējs, lēns un ļoti lēns, utt.
- fazi spriedums - izmantojot iepriekšējā posmā iegūtās fazi kopa ar lingvistiskām vērtībām, situācija tiek novērtēta izmantojot fazi nosacījumus jeb likumus. Iegūtais rezultāts ir izejas vērtība ar lingvistisko vērtību (liels, mazs virsmas raupjums)
- defazifikācija – tiek iegūts rezultāts, lingvistiskās vērtības izsakot skaitliskā formā, piemēram, virsmas raupjums tiks izteikts kā vērtība μ_m , nevis „liels” vai „ļoti liels”.

Tāpat kā citu veidu ekspertu sistēmu izstrādei, arī fazilōģikas ekspertu sistēmu izstrādei ir izveidotas čaulas jeb vides, kuras ļauj visu uzmanību veltīt zināšanu uzkrāšanai un sprieduma mehānisma izveidei, neveicot lielus programmēšanas darbus. Kā vienu no labākajām vidēm fazilōģikas ekspertu sistēmu izveidei varētu minēt firmas Inform GmbH izstrādāto *fuzzyTECH* programmu. Uz šīs programmas bāzes izveidotās ekspertu sistēmas tiek izmantotas daudzos pasaules lielākajos uzņēmumos, kā, piemēram, Adam Opel, AEG, Audi, BASF, Daimler Benz Aerospace, Mannesmann, Michelin, Nokia, Renault, Siemens, Volkswagen, Volvo u.c. Turpmākais fazilōģikas sistēmas darbības apskats būs balstīts uz *fuzzyTECH* programmā pieejamiem rīkiem.

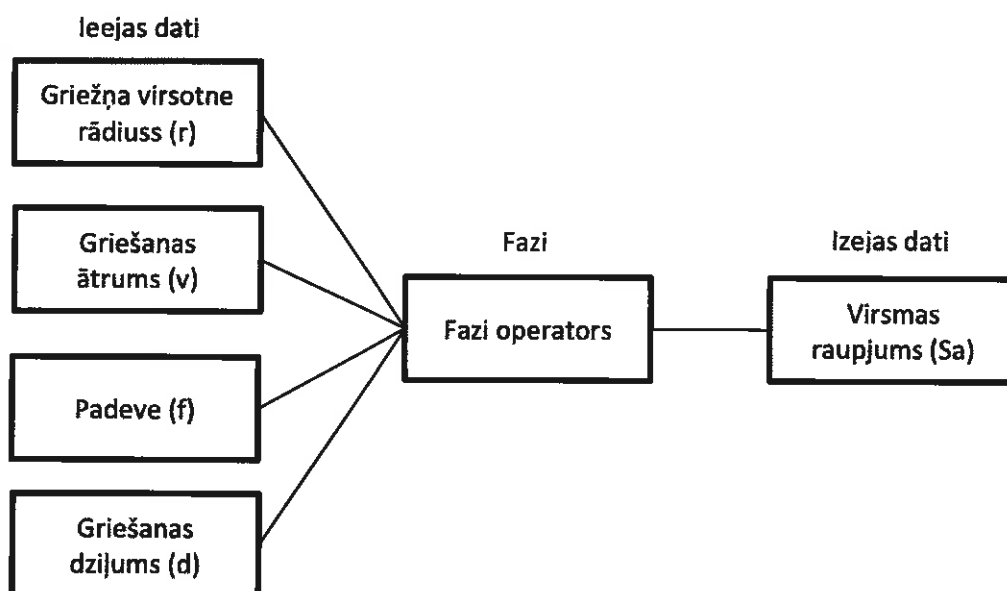


4.2. att. Faziloģikas sistēmas darbības posmi

Pirmais uzdevums, kas ir jāveic, veidojot faziloģikas sistēmu ir jādefinē sistēmas lielumu savstarpējās sakarības. Kādi būs ieejas lielumi un kādi būs izejas lielumi. Promocijas darba gadījumā faziloģikas sistēma tiek adaptēta virsmas raupjuma prognozēšanas nepieciešamībai. Tātad visi ieejas lielumi būs tehnoloģiskie parametri, bet kā izejas lielums kalpos virsmas raupjums (S_a) vai jebkurš cits virsmas raupjuma parametrs.

Faziloģikas sistēma parasti tiek izmantota kādu parametru vadībai atkarībā no ievades parametru vērtībām. Šajā gadījumā termins „vadīt“ tiek aizstāts ar terminu „prognozēt“. Taču uz šīs sistēmas pamata faziloģikas virsmas raupjuma prognozēšanas modeli viegli var pārveidot par faziloģikas virsmas raupjuma adaptīvās vadības modeli.

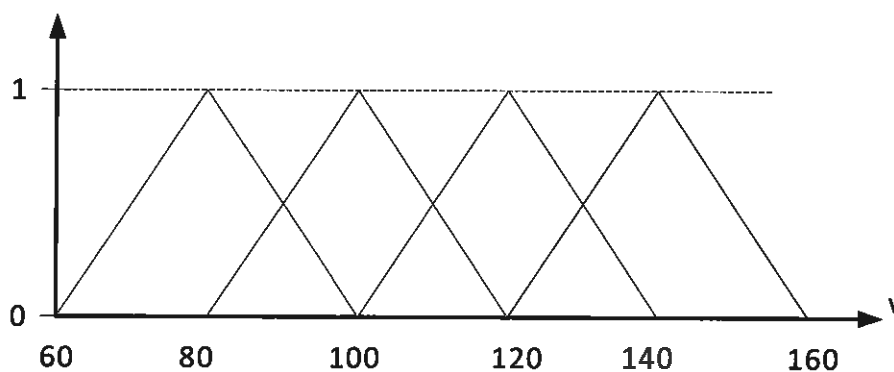
Attiecīgi starp ieejas un izejas vērtībām būs fazi operators, kurā norisināsies datu apstrāde, t.i. kāds virsmas raupjums būs pie ievadītajiem tehnoloģiskajiem parametriem.



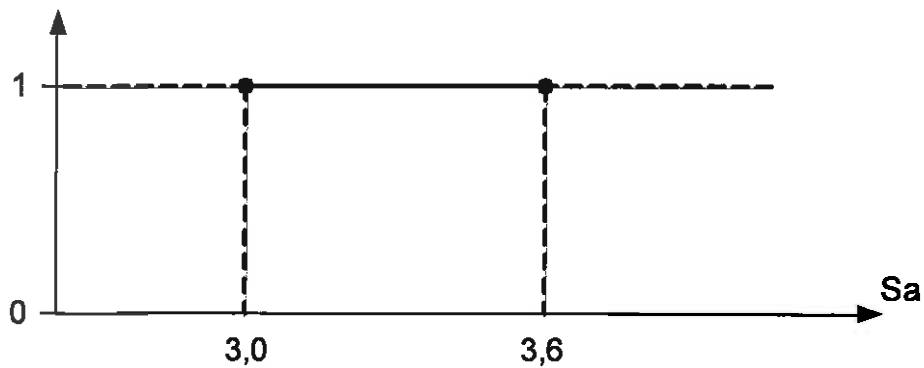
4.3. att. Uzdevuma definēšana fazilōģikas sistēmā

4.3.1. Fazifikācija

Kad ir izvēlēti parametri, kas kalpos par ieejas un izejas vērtībām, piemēram, griešanas ātrums v , padeve f , griešanas dziļums d un 3D virsmas raupjums Sa , tad ir jāizveido šo vērtību vai mainīgo lielumu piederības funkcijas. Šādu procesu (fazifikācija) var uzskatīt par operatora zināšanu pārnesei fazilōģikas sistēmā. Ieejas dati v, f, t , kā arī izejas dati (Sa) no to reālajām vērtībām ir jāpārvērš lingvistiskās vērtībās jeb jāveic tā sauktā fazifikācija. Katrai ieejas vērtībai tiek izveidota fazilōģikas kopa ar tajā esošām piederības funkcijām, kur tās vērtība ir robežās no 0 (nepatiess) līdz 1 (pilnīgi patiess). Līdzīgu fazifikāciju ir jāveic arī izejas vērtībām – virsmas raupjumam Sa . 4.4. att. ir parādīta griešanas ātruma kopa ar 4 piederības funkcijām. Klasiskajā matemātikā ir zināmas “precīzās” kopas. Tā piemēram mēs varam nodefinēt kopu, kurā virsmas raupjums tiek definēts no 3,0 līdz 3,6 kā raupjš (skat 4.5. att.). Taču šāda kopa tiek uzskatīta par tradicionālu loģikas kopu.

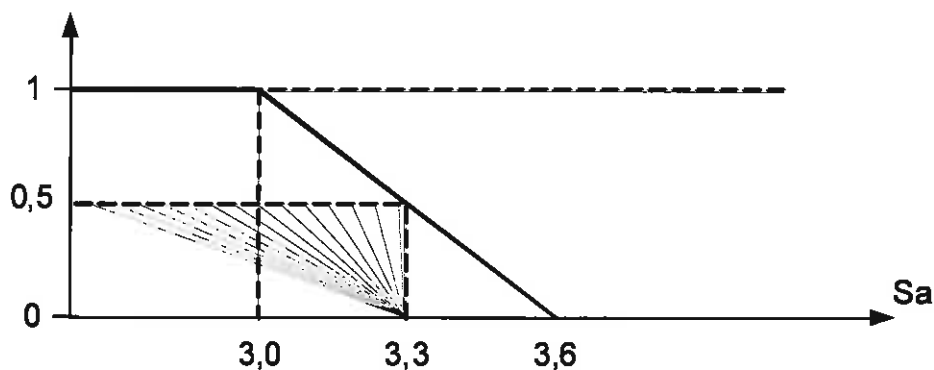


4.4. att. Griešanas ātruma v kopa ar 4 piederības funkcijām



4.5 att. Raupjuma S_a attēlojums tradicionālās loģikas kopā

Elementiem, kuri pieder šai kopai tiek piešķirta vērtība 1 (paties), bet elementiem, kuri nepieder pie šīs kopas, piešķir vērtību 0 (nepaties). Šāda pieceja ir pietiekama daudzās pielietojuma jomās, taču nav grūti atrast situācijas, kurās šādai piecejai trūkst elastīguma. Piemēram, lai aprakstītu kopu “virsmas ar mazu raupjumu”, mums jānosaka cik mazas raupjuma vērtības piederēs pie šīs kopas. Izvēloties kā robežu 3,0 μm , mēs nosakām, ka raupjums, kuram ir 3,0 μm un mazāk μm pieder pie grupas „virsmas ar mazu raupjumu”, bet tas, kurš ir lielāks nekā 3,0 μm , vairs nav virsmas ar mazu raupjumu. Rodas jautājums, kāpēc vērtība, kas ir 3,1 (3,0 + 0,1) nākamajā brīdī vairs nepieder pie grupas ar mazu raupjumu? Tas pats jautājums saglabāsies, ja mēs robežu pārvietosim uz 3,2, 3,3 utt. μm . Tātad šajā gadījumā ir nepieciešams nodefinēt jauno virsmas raupjuma kopu ar ne tik stingrām robežām.

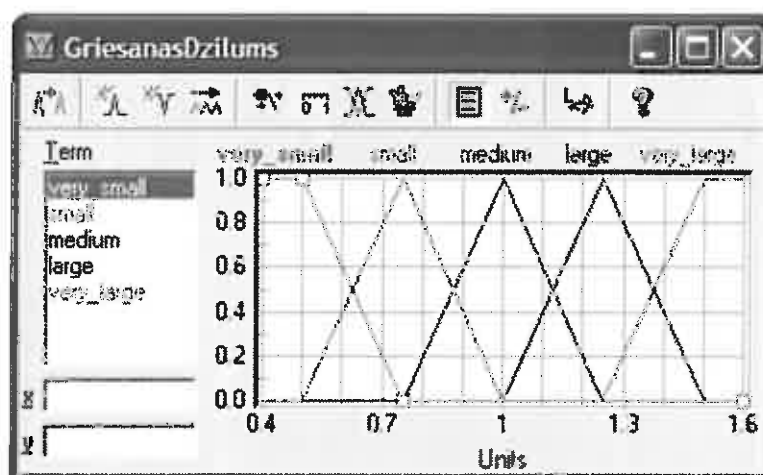


4.6. att. Faziloģikas kopa

Nodefinējot virsmas raupjuma kopu kā parādīts 4.6. att. mēs iegūstam izplūdušāku robežu, kas ļauj attēlot jēdziena “mazs raupjums” saturu. Virsmas raupjumam ar 3,0 μm vai mazāku vērtību piešķir vērtību 1 (pilnīgi paties), bet virsmas raupjuma ar 3,6 un vairāk μm – 0 (pilnīgi nepaties). Taču starp 3,0 μm un 3,6 μm virsmas raupjums pieder šai kopai dažādā pakāpēs – 3,3 μm raupjš būs “pa pusei mazs raupjums” vai „pa pusei liels raupjums”.

Jāpiebilst, ka svarīgi ir izprast atšķirību starp faziloģiku un varbūtību teoriju. Abos gadījumos tiek izmantots viens un tas pats vērtību diapazons un varētu likties, ka to nozīme ir līdzīga. Taču ir jāizšķir atšķirība starp diviem apgalvojumiem. Piemēram, varbūtības interpretācija būtu: “varbūtība, ka raupjums ir mazs ir 0,7”, bet faziloģikas terminoloģijā tas nozīmētu “raupjuma piederības pakāpe pie maza raupjuma virsmas kopas ir 0,7”. Semantiskā atšķirība ir būtiska – pirmais gadījums norāda, ka raupjums ar lielāku vai mazāku varbūtību varētu būt gan mazs, gan arī liels. Turpretī faziloģikas terminoloģija norāda, ka raupjums ir “vairāk vai mazāk” mazs raupjums.

Faziloģikas ekspertu sistēmu čaula *FuzzyTECH* piedāvā iespēju šīs piederības funkcijas definēt un apskatīt vizuāli, vajadzības gadījumā iespējams arī norādīt precīzas punktu vērtības vai ierakstīt piederības funkcijas matemātisko izteiksmi. 4.7. att. ir redzamas šo lielumu piederības funkcijas, kādas tās izskatās *fuzzyTECH* programmas vidē.



4.7. att. Piederības funkcijas griešanas dziļumam

Vēlreiz jāatgādina, ka šīs piederības funkcijas tiek veidotas, balstoties uz eksperta (dotajā gadījumā CNC operatora vai tehnologa) zināšanām un pieredzi.

4.3.2. Fazi likumu definēšana

Kā nākamais solis faziloģikas sistēmas izstrādē ir sprieduma mehānisma jeb fazi likumu (*fuzzy rules*) definēšana.

Atšķirībā no tradicionālajām sistēmām, kurās nosacījumos tiktu norādītas konkrētās mainīgo vērtības un precīzs rezultāts, šajā gadījumā tiek norādīti 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 ka loģiskie operatori. Papildus tiek lietoti tādi loģiskie operatori kā AND (un) un OR (vai). Lingvistiskie likumi attēlo sistēmā ieliktās zināšanas.

Pēc tam, kad ir izveidoti likumi, definējot savstarpējās sakarības starp ieejas lielumiem un izejas lielumiem, tad lietojot fazi operatoru tiek atrasta izejas piederības kopa. Ka fazi operators tiek izmantota *fuzzyTECH* programma, kas ietver Fazi vadības valodu (*Fuzzy Control Language* (FCL)).

4.3.3. Defazifikācija

Defazifikācija būtībā ir pretējs process fazifikācijai. Ja ar fazifikāciju skaitliskās vērtības pārnes lingvistiskās vērtībās, tad ar defazifikāciju lingvistiskās vērtības pārvērš skaitliskās vērtībās. Šajā posmā tiek iegūti faziloģikas sistēmas izejas dati. Pēc tam kad tiek izdota izejas vērtības piederības funkcija, tiek veikta tās defazifikācija.

Defazifikācija var veikt ar dažādiem instrumentiem. Viens no defazifikācijas veidiem ir vērtības noteikšana pēc smaguma centra metodes (*Centre of Gravity*), ko izsaka sekojoši:

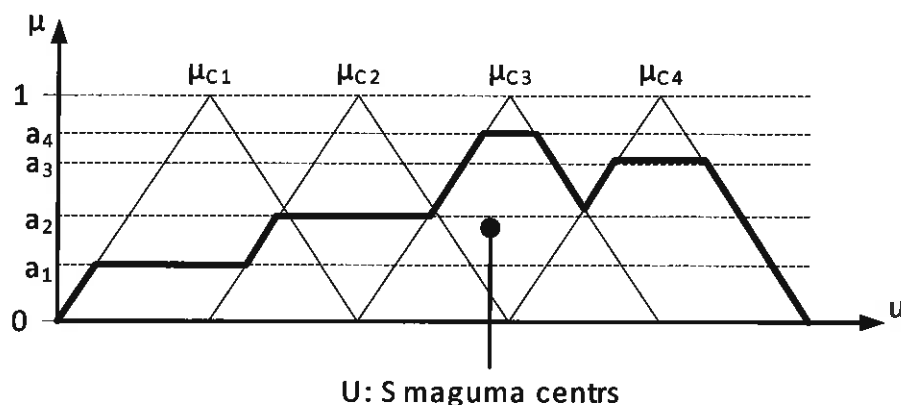
$$U = \frac{\int_{Min}^{Max} u\mu(u)du}{\int_{Min}^{Max} \mu(u)du}, \quad (4.1)$$

kur U = defazifikācijas rezultāts; u = izejas mainīgais; μ = piederības funkcija pēc akumulācijas.

Defazifikācija pēc laukuma centra metodes (*Centre of Area*) izsaka šādi:

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

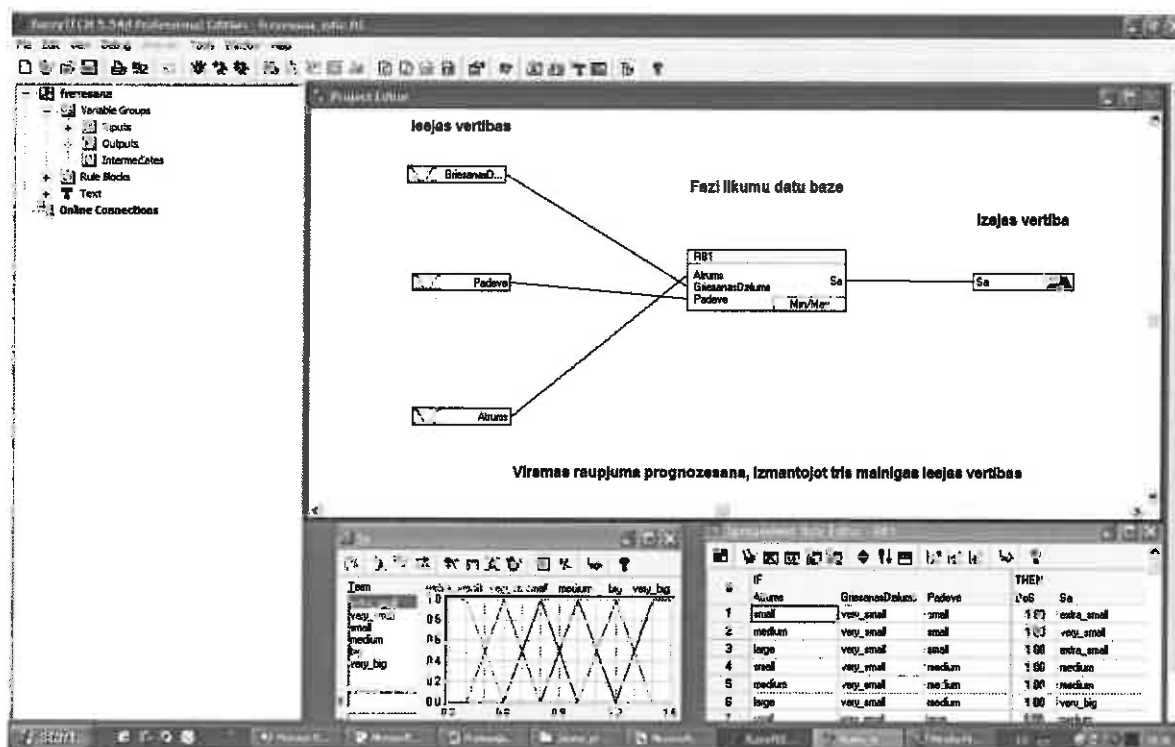
Šīs divas metodes ir vispopulārākās defazifikācijas realizācijai un izejas vērtību iegūšanai. 4.8. att. ir parādīta izejas kopa un tās defazifikācija, kuras rezultātā tiek izgūta izejas vērtība. *FuzzyTECH* programma ļauj iestatīt vēlamo defazifikācijas metodi, kā rezultātā bez īpašiem aprēķiniem ir iespējams iegūt nepieciešamo izejas vērtību, kas promocijas darbā ir virsmas raupjuma vērtības.



4.8. att. Defazifikācijas paņēmieni

4.4. Fazilōģikas prognozēšanas metodikas izstrāde *FuzzyTECH* vidē

Fazilōģikas modeļa izveidei tika izmantota *FuzzyTECH* datorprogramma, kur 4.9. att. ir redzams šīs programmas galvenā loga ekrānšāviņš. Minētā *FuzzyTECH* programma ietver grafiskos rīkus, kas ļauj strādāt ar fazilōģikas blokiem grafiskā formā, kā arī ļauj interaktīvi mainīt ieejas un izejas vērtības, kā arī darba gaitā elastīgi mainīt fazi likumu datu bāzē ievadītās sakarības. Ir iespējams iegūt 3D grafikus, kur uzskatāmi ir redzama tehnoloģisko parametru ietekme uz virsmas raupjuma parametru. Šādi grafiki vizualizē fazilōģikas prognozēšanas modeli un uzskatāmi parāda tehnoloģisko parametru savstarpējo mijiedarbību.



4.9. att. *FuzzyTECH* programmas galvenā loga ekrānšāviņš

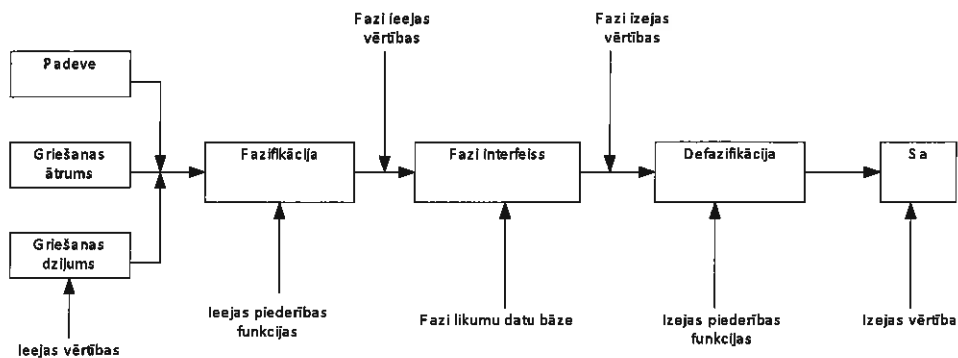
FuzzyTECH programma iekļauj visus nepieciešamos rīkus, lai veidotu un testētu izveidotās fazilōģikas sistēmas. Kad ir izveidota fazilōģikas sistēma, tad tā tiek saglabāta FTL formāta failā. FTL nozīmē „*Fuzzy Technology Language*” (Fazi tehnoloģijas valoda). Šis formāts var tikt uzskatīts par fazilōģikas programmēšanas valodu. *FuzzyTECH* priekšrocība ir iespējā nodrošināt grafisku fazilōģikas programmēšanu. Veidojamā sistēma ir daudz uzskatāmāka un vieglāk analizējama. Programma sniedz iespēju *.ftl formāta failu konvertēt citās programmēšanas valodās, lai fazilōģikas programma varētu iet arī uz iekārtām, kas neatpazīst FLT valodu. *.ftl failu ir iespējams konvertēt tādos formātos kā *.c, *.java, *.cob un *.fr.

4.5. Eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izstrāde frēzēšanā, izmantojot fazilōģiku

Promocijas mērķis ir izstrādāt virsmas raupjuma prognozēšanas metodiku, izmantojot fazilōģiku. Minētā mērķa realizācijai tika veikti eksperimenti, kura rezultātā tika iegūti fazilōģikas prognozēšanas modeļi. Ņemot vērā minēto prognozēšanas modeļu ticamību un eksperimentos iegūtos secinājumus, tika izveidota virsmas raupjuma prognozēšanas metodika. Jāņem vērā, ka iepriekš fazilōģika ir tikusi samērā maz izmantota virsmas raupjuma tehnoloģiskā nodrošinājuma pētījumos, tādējādi iegūtā metodika var tikt uzskatīta par novitāti. Izstrādātā metodika ļautu ieviest virsmas raupjuma prognozēšanas tehniku ražošanas cehā vai tehnologa darba kārtībā. Izpildot tālāk dotos metodikas norādījumus ir iespējams iegūt nepieciešamo virsmas raupjuma tehnoloģiskā nodrošinājuma modeli ceha apstākļos.

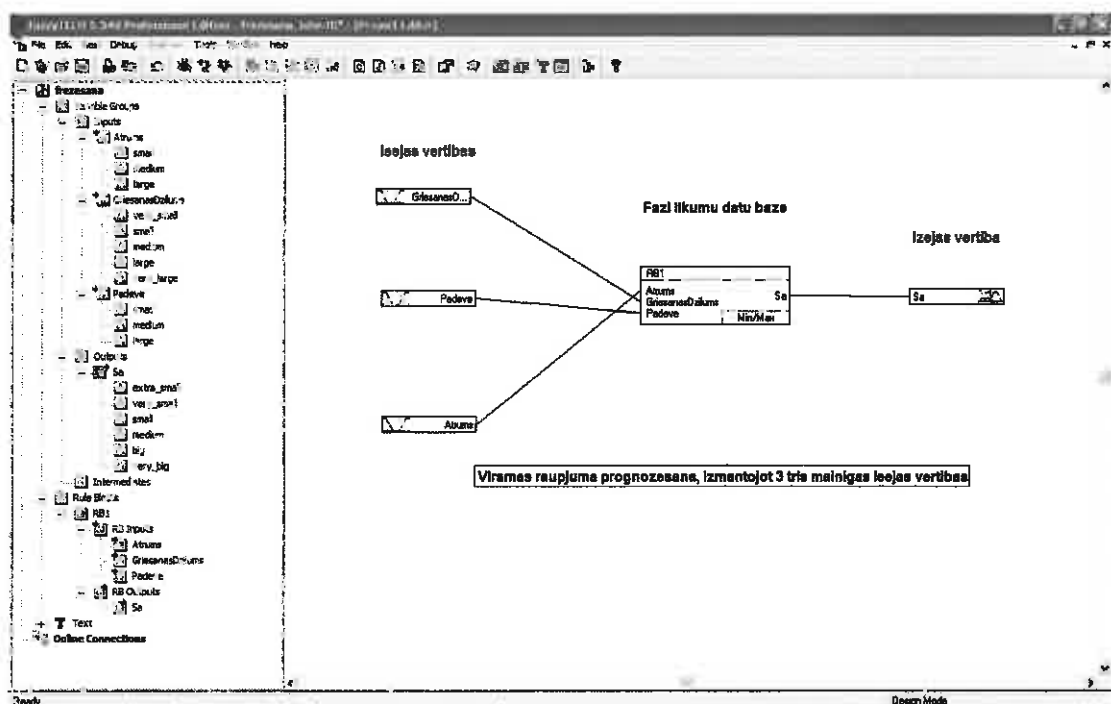
Kā eksperimenta sākumdati tiek izmantoti 3. nodaļā iegūtie eksperimenta dati, jo īpaši iegūtais regresijas modelis, un 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modelis un tā ieguves metodika tiek izstrādāta, ņemot vērā šajā nodaļā aprakstītās fazilōģikas tehnoloģijas.

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 f (padevi), v (griešanas ātrumu) un d (griešanas dziļumu). Fazi algoritmam ir trīs ieejas vērtības un viena izejas vērtība. Trīs ieejas vērtības ir f , v un d , un viena izejas vērtības Sa . Fazi algoritma pamatstruktūra ir attēlota zemāk esošajā attēlā (4.10. att.). Vispirms tiek definētas ieejas vērtības (v ; f ; d). Pēc tam dotās ieejas vērtības tiek pakļautas fazifikācijai jeb definētas fazilōģikai saprotamā valodā. Tālāk fazi interfeiss ģenerē izejas vērtības, ņemot vērā iepriekš datu bāzē ievadītos fazi likumus. Visbeidzot defazifikācijas interfeiss definē izejas vērtību, kas dotajā gadījumā ir 3D virsmas raupjuma parametrs, konkrēti Sa .



4.10. att. Fazi darbības blokhēma

Lai izstrādātu prognozēšanas metodiku, kas balstīta uz faziloģiku, tika izmantota datorprogramma, kas paredzēta faziloģikas problēmu risināšanai. Tās nosaukums ir *fuzzyTECH* 5.54. Minētā programma tiek lietota, lai veidotu mikrokontrolleru ierīču programmatūru, kas izmantojot faziloģiku varētu vadīt kādu procesu. Dotajā promocijas darbā izstrādātais faziloģikas modelis un metodika var tikt izmantots, lai vadītu CNC darba galda griešanas procesu, ņemot vērā virsmas raupjuma atkarību no tehnoloģiskajiem parametriem. 4.11. att. ir attēlots *fuzzyTECH* programmas galvenais logs, kurā tiek izveidots faziloģikas projekts. Tiek definētas ieejas vērtības, fazi likumu datu bāze, kas saistīta ar visām trim ieejas vērtībām, un izejas vērtība. 4.11. att. redzamais attēlojums būtiski atvieglo sistēmas izveidi, jo dot ļoti saprotamu priekšstatu par sistēmas elementiem un to saistību (vizualizācija).



4.11. att. *fuzzyTECH* programmas galvenais logs, kur attēlota prognozēšanas fazi sistēma

4.5.1. Datu fazifikācija un to piederības funkcijas

Ņemot vērā 4.10. att. doto fazi algoritma blokshēmu, definējam ieejas vērtības un šo ieejas vērtību piederības funkcijas. Jāpiebilst, ka liela nozīme piederības funkciju vērtību un dalījumu izvērtēšanā ir tieši paša sistēmas izstrādātāja pieredze un kompetence. Sistēmas izstrādātājam ir jāpārzina griešanas procesi un to radītā ietekme uz virsmas raupjumu. Daļēji šo darbu atvieglo 3. nodaļā iegūtie eksperimenta dati un secinājumi, kas var tikt uzskatīti par sākotnējo informācijas datu bāzi. Pareizi izmantojot par procesu iekrātās zināšanas faziloģika ļauj izstrādāt ļoti precīzus procesa modeļus. Atšķirībā no regresijas, faziloģikas prognozēšanas modeļa izstrādei ir nepieciešams kvalificēts darbaspēks, 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. Šādām datu bāzēm vajadzētu saturēt datus par virsmas raupjuma tehnoloģisko nodrošinājumu, piemēram, kā mainās virsmas raupjums apstrādājot nerūsējošo tēraudu noteiktā griešanas ātruma, padeves un/vai griešanas dziļuma diapazonā. Konkrēti šajā promocijā kā zināšanu datu bāze tiek izmantoti 3. nodaļā iegūtie tehnoloģiskā nodrošinājuma dati.

Eksperimenta ieejas vērtības tiek ņemtas no 3.2. tabulas un to robežas ir šādas:

$$f = 0,1 \dots 0,25 \text{ mm/apgr.},$$

$$v = 100 \dots 210 \text{ m/min},$$

$$d = 0,5 \dots 1,5 \text{ mm}.$$

Padevei tika izvēlētas trīs piederības funkcijas, ņemot vērā 3. nodaļā iegūtos secinājumus. Padeves rindas vektors ir $f^T = \{M, V, L\}$, kur

$$M = \text{mazs jeb } \textit{small} (0,1 \text{ mm/apgr.}),$$

$$V = \text{vidējs jeb } \textit{medium} (0,175 \text{ mm/apgr.}),$$

$$L = \text{liels jeb } \textit{large} (0,25 \text{ mm/apgr.}).$$

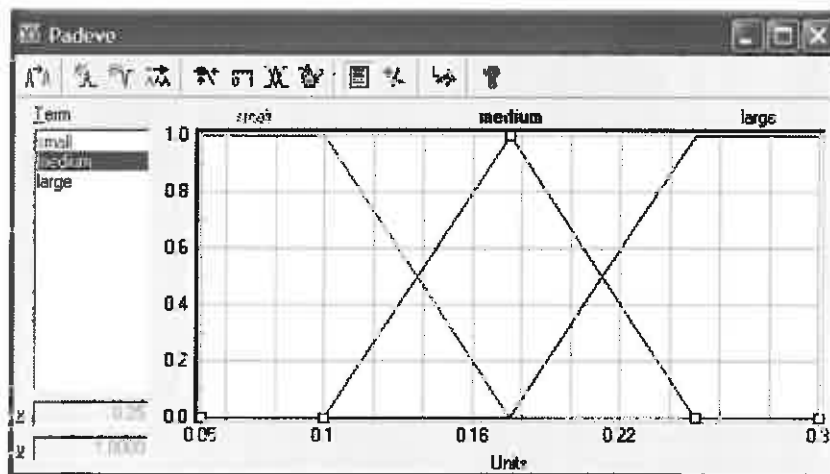
Pie dotajām vērtībām atbalsta pakāpes rādītājs (DoS) ir viens (1). Piemēram, vidējās vērtības piederības funkcijai atbalsta pakāpe viens (1) ir pie 0,175, bet 0 ir pie 0,1 un 0,25. Doto sakarību var attēlot ar šādām piederības funkcijām:

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

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

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

4.12. att. ir redzams ekrānšāviņš no *FuzzyTECH* programmas, kur augstāk minētie vienādojumi no 4.3 līdz 4.5 ir attēloti grafiski.



4.12. att. ilustrē trīs padeves piederības funkcijas, kas izveidotas *FuzzyTECH* programmā

Griešanas ātrumam v tiek izvēlētas trīs piederības funkcijas, ņemot vērā 3. nodaļā iegūtos secinājumus. Griešanas ātruma rindas vektors ir $v^T = \{M, V, L\}$, kur

M = mazs jeb *small* (120 m/min),

V = vidējs jeb *medium* (150 m/min),

L = liels jeb *large* (190 m/min).

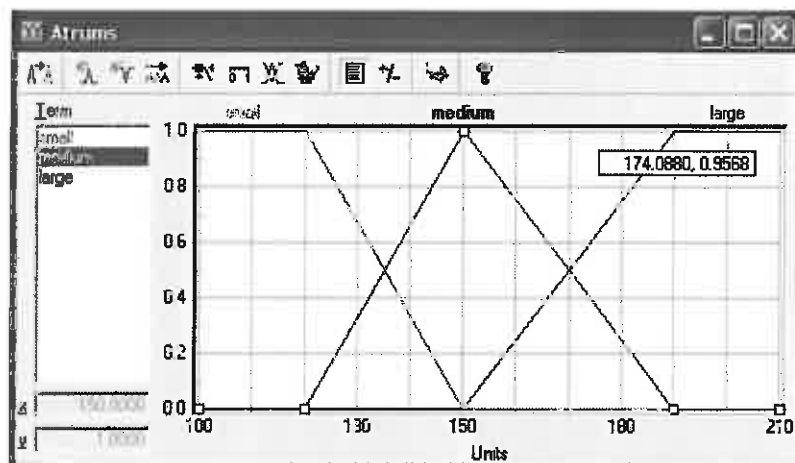
Doto fazi kopu griešanas ātrumam v raksturo šādas piederības funkcijas:

$$A_{small}(v) = \begin{cases} 1, \text{ kad } v \leq 120 \\ (150 - v)/30, \text{ kad } 120 < v < 150 \\ 0, \text{ kad } v \geq 150 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$A_{medium}(v) = \begin{cases} 0, \text{ kad } v \leq 120 \text{ vai } \geq 190 \\ (v - 120)/30, \text{ kad } 120 < v < 150 \\ (190 - v)/40, \text{ kad } 150 < v < 190 \\ 1, \text{ kad } v = 190 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$A_{large}(v) = \begin{cases} 0, & \text{kad } v \leq 150 \\ (v - 150)/40, & \text{kad } 150 < v < 190 \\ 1, & \text{kad } v \geq 190 \end{cases} \quad (4.8)$$

4.13. att. ir redzams ekrānšāviņš no *FuzzyTECH* programmas, kur augstāk minētie vienādojumi no 4.6 līdz 4.8 ir attēloti grafiski.



4.13. att. attēlo trīs griešanas ātruma v piederības funkcijas, kas izveidotas *FuzzyTECH* programmā

Griešanas dziļumam d tika izvēlētas piecas piederības funkcijas, ņemot vērā 3. nodaļā iegūtos secinājumus. Griešanas dziļuma rindas vektors ir $d^T = \{LM, M, V, L, LL\}$, kur

LM = ļoti mazs jeb *very_small* (0,5 mm),

M = mazs jeb *small* (0,75 mm),

V = vidējs jeb *medium* (1 mm),

L = liels jeb *large* (1,25 mm),

LL = ļoti liels jeb *very_large* (1,5 mm).

Doto fazi kopu griešanas dziļumam d raksturo šādas piederības funkcijas:

$$A_{very_small}(d) = \begin{cases} 1, & \text{kad } d \leq 0,5 \\ (0,75 - d)/0,25, & \text{kad } 0,5 < d < 0,75 \\ 0, & \text{kad } d \geq 0,75 \end{cases} \quad (4.9)$$

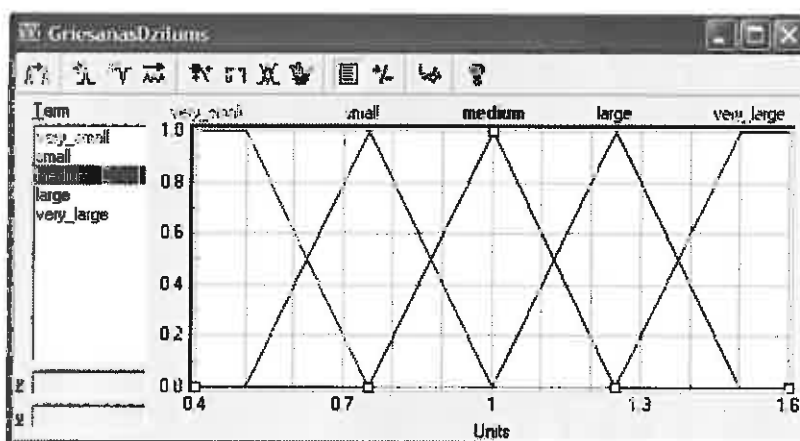
$$A_{small}(d) = \begin{cases} 0, & \text{kad } d \leq 0,5 \text{ vai } \geq 1 \\ (d - 0,5)/0,25, & \text{kad } 0,5 < d < 0,75 \\ (1 - d)/0,25, & \text{kad } 0,75 < d < 1 \\ 1, & \text{kad } d = 0,75 \end{cases} \quad (4.10)$$

$$A_{medium}(d) = \begin{cases} 0, & \text{kad } d \leq 0,75 \text{ vai } \geq 1,25 \\ (d - 0,75)/0,25, & \text{kad } 0,75 < d < 1 \\ (1,25 - d)/0,25, & \text{kad } 1 < d < 1,25 \\ 1, & \text{kad } d = 1 \end{cases} \quad (4.11)$$

$$A_{large}(d) = \begin{cases} 0, & \text{kad } d \leq 1 \text{ vai } \geq 1,5 \\ (d - 1)/0,25, & \text{kad } 1 < d < 1,25 \\ (1,5 - d)/0,25, & \text{kad } 1,25 < d < 1,5 \\ 1, & \text{kad } d = 1,25 \end{cases} \quad (4.12)$$

$$A_{very_large}(d) = \begin{cases} 0, & \text{kad } d \leq 1,25 \\ (d - 1,25)/0,25, & \text{kad } 1,25 < d < 1,5 \\ 1, & \text{kad } d \geq 1,5 \end{cases} \quad (4.13)$$

4.14. att. ir redzams ekrānšāviņš no *FuzzyTECH* programmas, kur augstāk minētie vienādojumi no 4.9 līdz 4.13 ir attēloti grafiski.



4.14. att. Piecas griešanas dziļuma d piederības funkcijas, kas izveidotas *FuzzyTECH* programmā

Virsmas raupjumam kā faziloģiskas izejas vērtībai tika izvēlētas sešas piederības funkcijas, ņemot vērā 3. nodaļā iegūtos secinājumus. Virsmas raupjuma rindas vektors ir $d^T = \{PM, LM, M, V, L, LL\}$, kur

PM = pavisam mazs jeb *extra_small* (0,4 μm),

LM = ļoti mazs jeb *very_small* (0,6 μm),

M = mazs jeb *small* (0,8 μm),

V = vidējs jeb *medium* (1 μm),

L = liels jeb *big* (1,2 μm),

LL = ļoti liels jeb *very_big* (1,4 μm).

Doto fazi kopu virsmas raupjumam Sa raksturo šādas piederības funkcijas:

$$A_{pm}(Sa) = \begin{cases} 1, & \text{kad } Sa \leq 0,4 \\ (0,6 - Sa)/0,2, & \text{kad } 0,4 < Sa < 0,6 \\ 0, & \text{kad } Sa \geq 0,6 \end{cases} \quad (4.14)$$

$$A_{im}(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 0,4 \text{ vai } \geq 0,8 \\ (Sa - 0,4)/0,2, & \text{kad } 0,4 < Sa < 0,6 \\ (0,8 - Sa)/0,2, & \text{kad } 0,6 < Sa < 0,8 \\ 1, & \text{kad } Sa = 0,6 \end{cases} \quad (4.15)$$

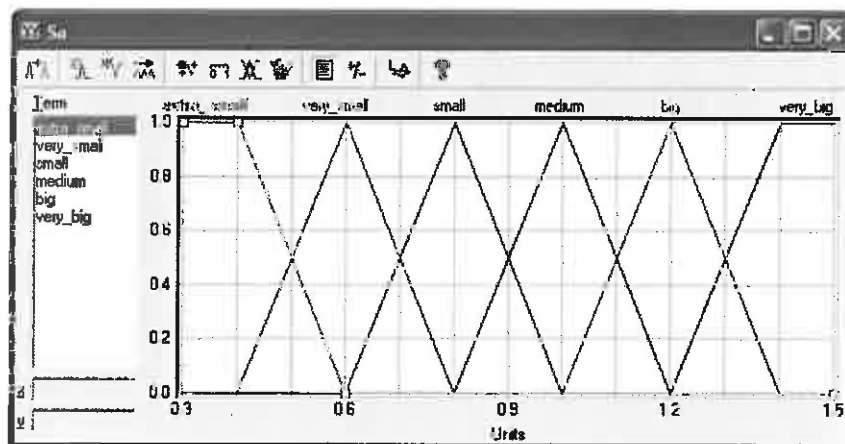
$$A_m(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 0,6 \text{ vai } \geq 1,0 \\ (Sa - 0,6)/0,2, & \text{kad } 0,6 < Sa < 0,8 \\ (1 - Sa)/0,2, & \text{kad } 0,8 < Sa < 1,0 \\ 1, & \text{kad } Sa = 0,8 \end{cases} \quad (4.16)$$

$$A_v(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 0,8 \text{ vai } \geq 1,2 \\ (Sa - 0,8)/0,2, & \text{kad } 0,8 < Sa < 1 \\ (1,2 - Sa)/0,2, & \text{kad } 1 < Sa < 1,2 \\ 1, & \text{kad } Sa = 1,0 \end{cases} \quad (4.17)$$

$$A_l(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 1 \text{ vai } \geq 1,4 \\ (Sa - 1)/0,2, & \text{kad } 1 < Sa < 1,2 \\ (1,4 - Sa)/0,2, & \text{kad } 1,2 < Sa < 1,4 \\ 1, & \text{kad } Sa = 1,2 \end{cases} \quad (4.18)$$

$$A_{ll}(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 1,2 \\ (Sa - 1,2)/0,2, & \text{kad } 1,2 < Sa < 1,4 \\ 1, & \text{kad } Sa \geq 1,4 \end{cases} \quad (4.19)$$

4.15. att. ir redzams ekrānšāviņš no *FuzzyTECH* programmas, kur augstāk minētie vienādojumi no 4.14 līdz 4.19 ir attēloti grafiski.



4.15. att. Sešas virsmas raupjuma Sa piederības funkcijas, kas izveidotas *FuzzyTECH* programmā

Ir iespējams izvēlēties arī astoņas vai pat deviņas piederības funkcijas četrū vai piecu vietā. Taču dažos gadījumos šāda izvēle neenes vēlamo rezultātu un tikai sarežģī sistēmu. Sistēma paliek sarežģītāka, taču precizitātes uzlabojams nav būtisks vai vispār nav novērojams. Papildus izveidotajām virsmas raupjuma piederības funkcijām ir jānosaka

metode, pēc kuras tiks realizēta defazifikācija izejas vērtībām jeb virsmas raupjuma S_a vērtībām. Minētajā eksperimentā tiek izvēlēta CoA (*Center of Area*) virsmas raupjuma aprēķina metodika.

4.5.2. Fazi likumu datu bāzes izveide

Pēc tam kad ir izveidotas fazilōģikas piederības funkcijas, tad ir nepieciešams izveidot fazi likumu datu bāzi. Minētā datu bāze sastāv no likumiem, kurus sistēmai ir jāievēro un uz kuru pamatu tiek izveidotas izejas vērtības. Attiecīgi likumu skaitu nosaka piederības funkciju skaits. Dotajā brīdī ir trīs padeves, trīs griešanas ātruma un piecas griešanas dziļuma piederības funkcijas. Tad kopējais likumu skaits būs $3 \times 3 \times 5 = 45$. Dotie fazi likumi diktē mijiedarbību starp ieejas un izejas mainīgajiem, kas ļauj pieņemt atbilstošos vadības procedūras, lai sistēma strādātu ar vēlamo rezultātu (kā jāmaina griešanas režīmi, lai iegūtu vēlamo virsmas raupjumu). 4.1. tabulā un 4.2. tabulā attiecīgi ir parādīta fazi likumu datu bāze matricas formā un tabulārā formā. 4.1. tabulā ir Fazi likumu datu bāze matricas formā, kur PM apzīmē pavisam mazu virsmas raupjumu, LM – ļoti mazu, M – mazu, V – vidēju, L – lielu, LL – ļoti lielu virsmas raupjumu. Pēc tajās esošajiem datiem arī darbosies fazi sistēma. 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 (S_a) ir ļoti liels. Attiecīgo likumu skatīt 4.2. tabulas 43. ailē. Pēc šāda parauga un ņemot vērā no apstrādes procesa iegūtos secinājumus, tika izveidoti visi 45 likumi.

4.1. tabula

Fazi likumu datu bāze matricas formā

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

Fazi likumu datu bāze ar atbalsta pakāpes (DoS) rādītāju

Nr.	Atrums (ātrums)	GriesanasDzilums (griešanas dzilums)	Padeve (padeve)	DoS	Sa (raupjums)
1.	mazs	ļoti mazs	maza	1.000	pavisam mazs
2.	vidējs	ļoti mazs	maza	1.000	ļoti mazs
3.	liels	ļoti mazs	maza	1.000	pavisam mazs
4.	mazs	ļoti mazs	vidēja	1.000	vidējs
5.	vidējs	ļoti mazs	vidēja	1.000	vidējs
6.	liels	ļoti mazs	vidēja	1.000	ļoti liels
7.	mazs	ļoti mazs	liela	1.000	vidējs
8.	vidējs	ļoti mazs	liela	1.000	vidējs
9.	liels	ļoti mazs	liela	1.000	ļoti mazs
10.	mazs	mazs	maza	1.000	ļoti mazs
11.	vidējs	mazs	maza	1.000	ļoti mazs
12.	liels	mazs	maza	1.000	mazs
13.	mazs	mazs	vidēja	1.000	mazs
14.	vidējs	mazs	vidēja	1.000	mazs
15.	liels	mazs	vidēja	1.000	mazs
16.	mazs	mazs	liela	1.000	vidējs
17.	vidējs	mazs	liela	1.000	mazs
18.	liels	mazs	liela	1.000	mazs
19.	mazs	vidējs	maza	1.000	pavisam mazs
20.	vidējs	vidējs	maza	1.000	ļoti mazs
21.	liels	vidējs	maza	1.000	mazs
22.	mazs	vidējs	vidēja	1.000	ļoti mazs
23.	vidējs	vidējs	vidēja	1.000	mazs
24.	liels	vidējs	vidēja	1.000	vidējs
25.	mazs	vidējs	liela	1.000	mazs
26.	vidējs	vidējs	liela	1.000	vidējs
27.	liels	vidējs	liela	1.000	vidējs

4.2. tabulas turpinājums

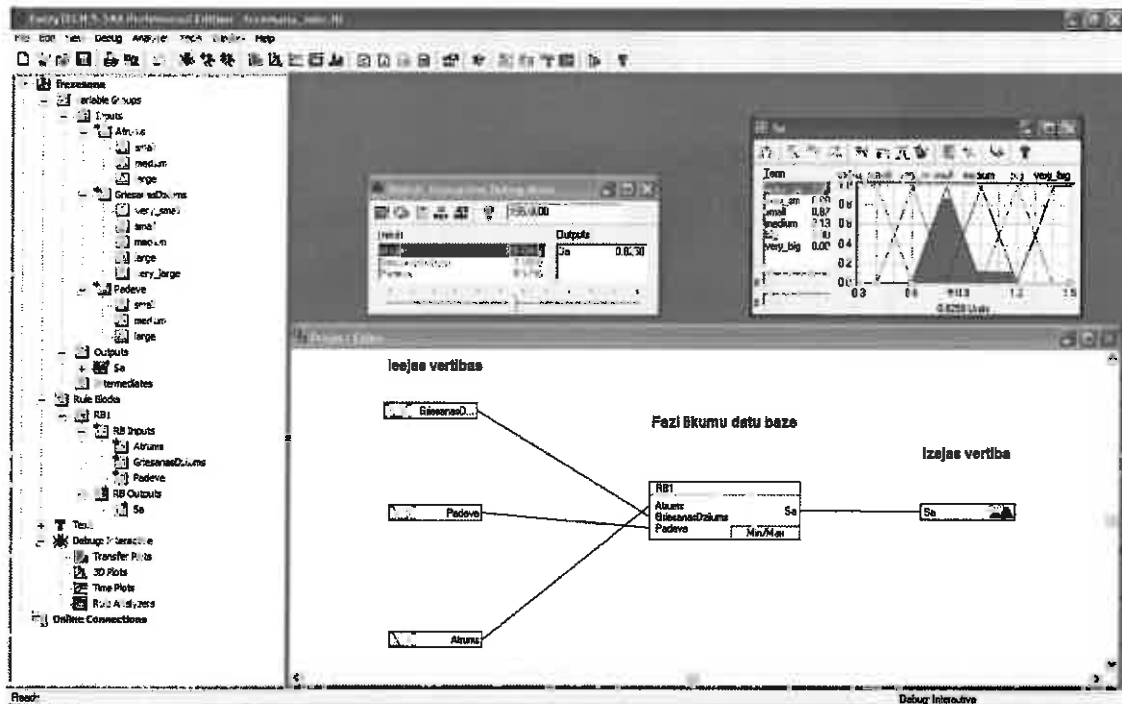
28.	mazs	liels	maza	1.000	ļoti mazs
29.	vidējs	liels	maza	1.000	mazs
30.	liels	liels	maza	1.000	vidējs
31.	mazs	liels	vidēja	1.000	vidējs
32.	vidējs	liels	vidēja	1.000	liels
33.	liels	liels	vidēja	1.000	liels
34.	mazs	liels	liela	1.000	liels
35.	vidējs	liels	liela	1.000	liels
36.	liels	liels	liela	1.000	ļoti liels
37.	mazs	ļoti liels	maza	1.000	ļoti mazs
38.	vidējs	ļoti liels	maza	1.000	mazs
39.	liels	ļoti liels	maza	1.000	vidējs
40.	mazs	ļoti liels	vidēja	1.000	vidējs
41.	vidējs	ļoti liels	vidēja	1.000	vidējs
42.	liels	ļoti liels	vidēja	1.000	liels
43.	mazs	ļoti liels	liela	1.000	ļoti liels
44.	vidējs	ļoti liels	liela	1.000	liels
45.	liels	ļoti liels	liela	1.000	ļoti liels

Pēc tam, kad ir izveidotas piederības funkcijas un fazi likumu datu bāze, var teikt, ka jau ir izstrādāts virsmas raupjuma prognozēšanas modelis atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Kā nākamais ir jāveic datu defazifikācija, lai pārbaudītu modeļa prognozējamību, kā arī jāveic minētā modeļa ticamības pārbaude.

4.5.3. Datu defazifikācija un prognozēšanas modeļa ieguve

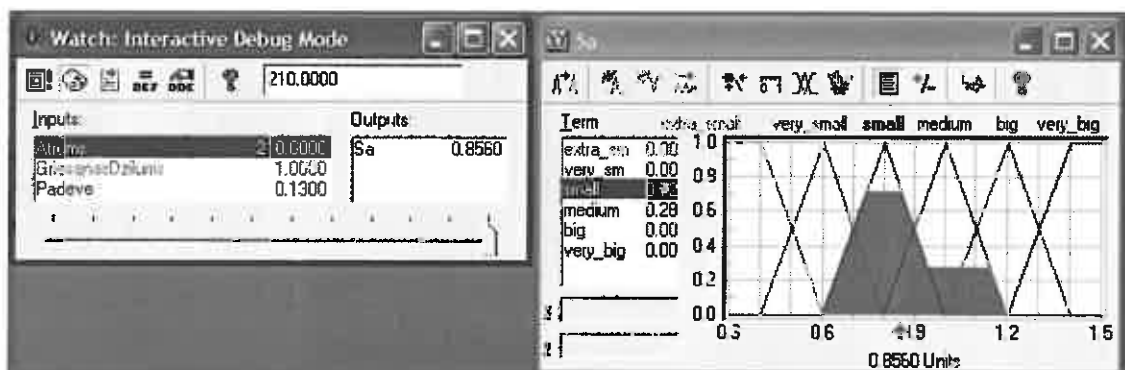
Datu defazifikācija ir lingvistisko vērtību pārvēršana skaitliskās vērtības. 4.16. att. ir redzams fazi modelis ar atvērtiem defazifikācijas logiem. Logā ar nosaukumu „*watch: interactive debug mode*” ir iespējams interaktīvi mainīt ieejas vērtības, kuras tiek apstrādātas pēc fazi likumiem un tiek izdota izejas vērtības, kas dotajā gadījumā ir virsmas raupjuma vērtības. Logā ar nosaukumu „*Sa*” tiek izdota izejas vērtība jeb virsmas raupjuma vērtība, kā arī ir redzams pats defazifikācijas process, kas tiek realizēts caur „*CoA*” metodi. „*watch: interactive debug mode*” logā neatkarīgi mainot jebkuru no trīs tehnoloģiskiem parametriem

(ātrums v , griešanas dziļums d , padeve f), tiek izgūta prognozētā izejas vērtība, kas šajā gadījumā ir 3D virsmas raupjums Sa .



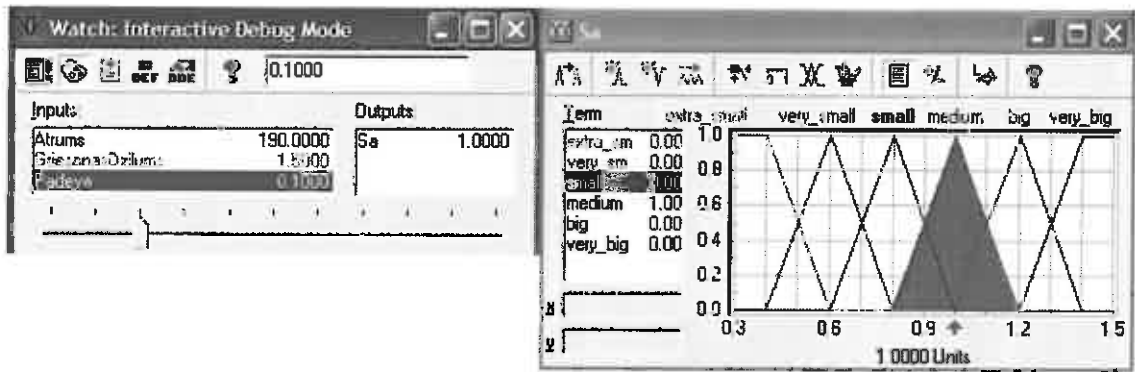
4.16. att. Fazi modelis ar defazifikācijas loģiem *FuzzyTECH* programmā

Savukārt 4.17. att. ir attēlots programmas interaktīvai logs, kurā ievadot 4.2. tabulas 10. ailes ieejas vērtības, tiek izdota prognozētā 3D virsmas raupjuma vērtība, kas iegūta izmantojot faziloģiku.



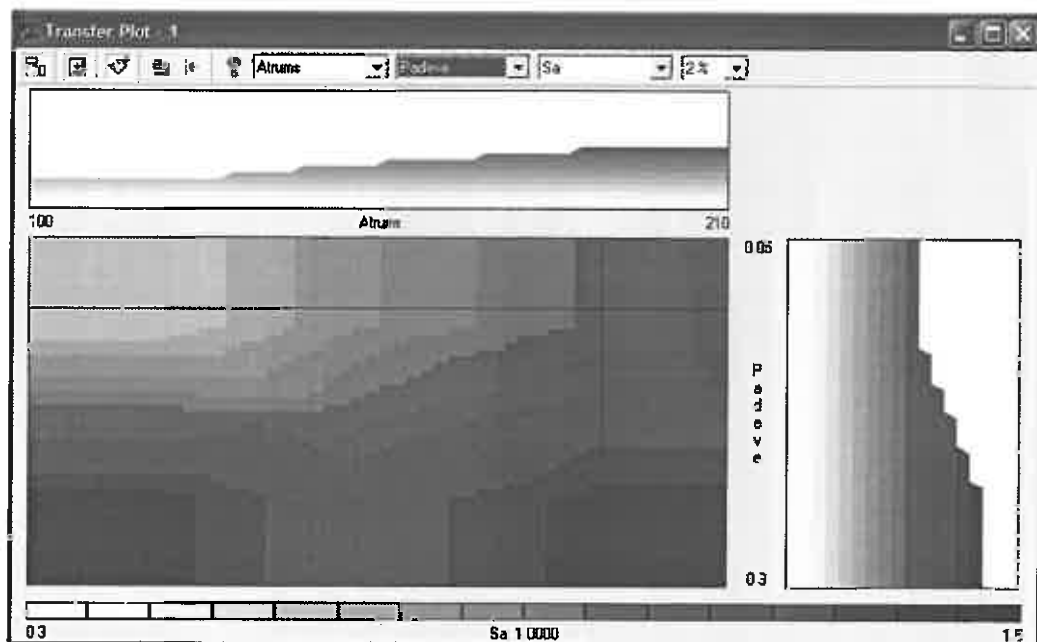
4.17. att. Fazi modeļa defazifikācija. Dotajā gadījumā defazifikācija noris pie ieejas vērtībām, kas parādītas 4.2. tabulas 10. ailē

Savukārt 4.18. att. ir attēlots programmas interaktīvai logs, kurā ievadot 4.2. tabulas 4. ailes ieejas vērtības tiek izdota virsmas raupjuma vērtība, kas iegūta izmantojot faziloģiku.



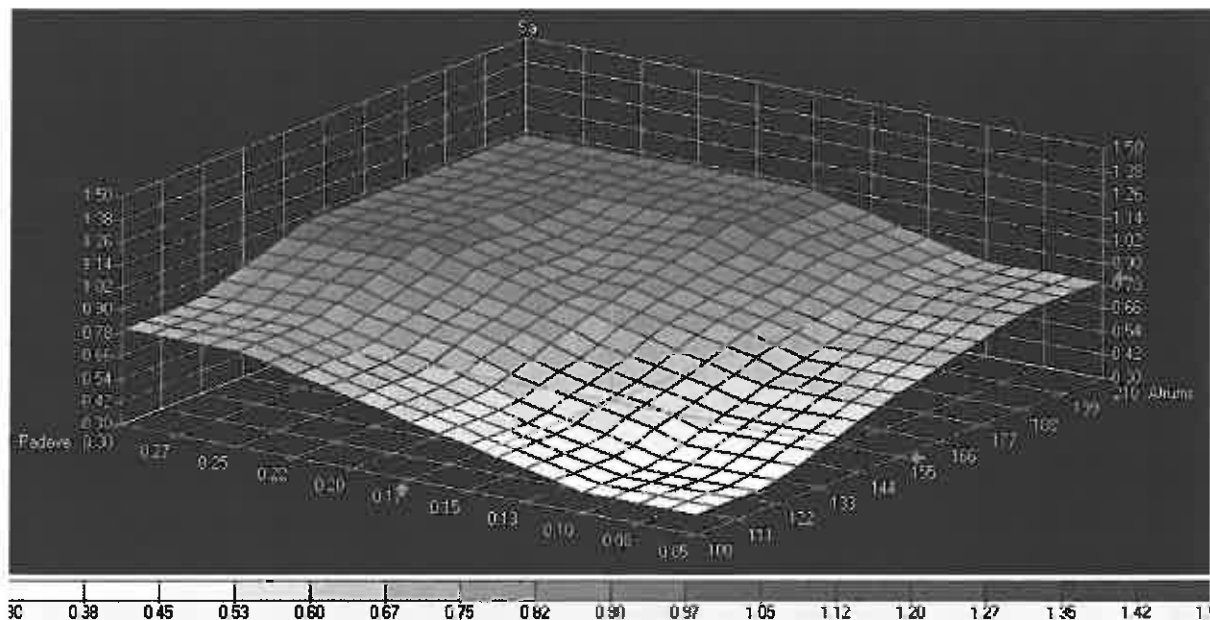
4.18. att. Fazi modeļa defazifikācija. Dotajā gadījumā defazifikācija noris pie ieejas vērtībām, kas parādītas 4.2. tabulas 4. ailē

Papildus analīzē ir iespējams izgūt grafikus, kas attēlo parametru savstarpējo atkarību, jo īpaši 3D virsmas raupjuma Sa atkarību no griešanas ātruma v , padeves f vai griešanas dziļuma d . 4.19. att. ir parādīts grafiks, kas ilustrē 3D virsmas raupjuma Sa atkarību no griešanas ātruma v un padeves f .



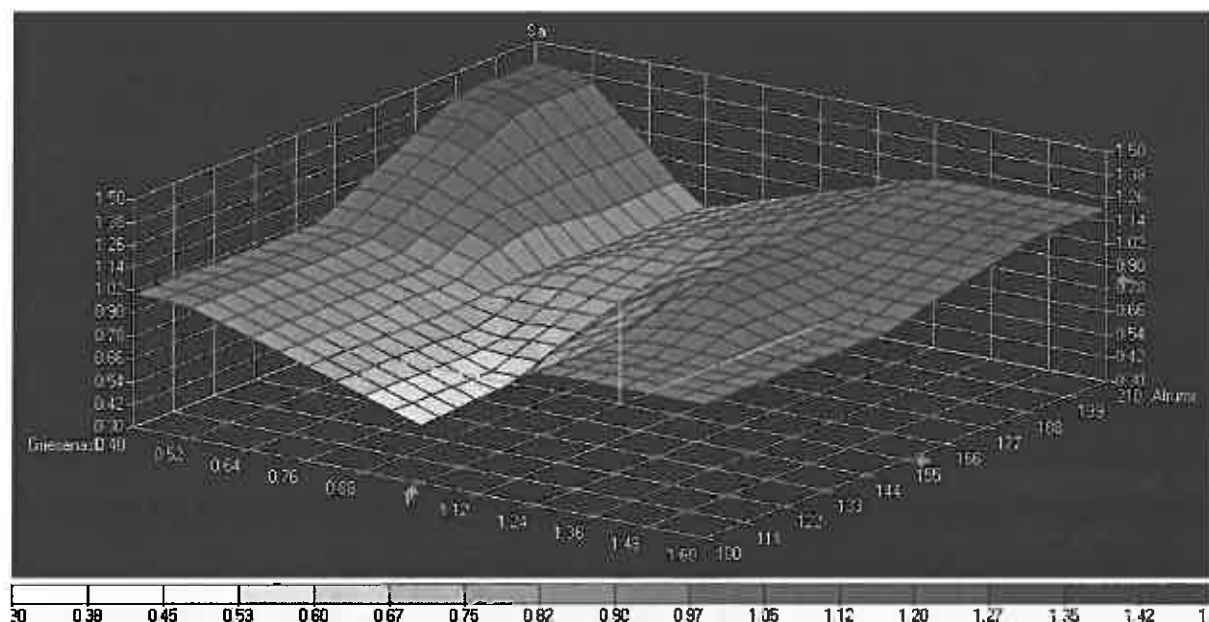
4.19. att. Grafisks attēlojums virsmas raupjuma atkarībai no griešanas ātruma v un padeves f

Šo pašu 4.19. att. ilustrēto grafiku var attēlot aksinometrijā kā parādīts 4.20. att. Dotais grafiks ir uzskatāmāks un labāk reprezentē 3D virsmas raupjuma Sa atkarību no v un padeves d , un savstarpējo tehnoloģisko parametru atkarību. No 4.19. att. un 4.20. att. ilustrētiem grafikiem var izdarīt secinājumus, ka palielinot padevi d , palielināsies arī virsmas raupjums Sa . Savukārt palielinot griešanas ātrumu v , palielināsies arī virsmas raupjums Sa .



4.20. att. Trīsdimensionāls grafiks virsmas raupjuma Sa atkarībai no griešanas ātruma v un padeves f

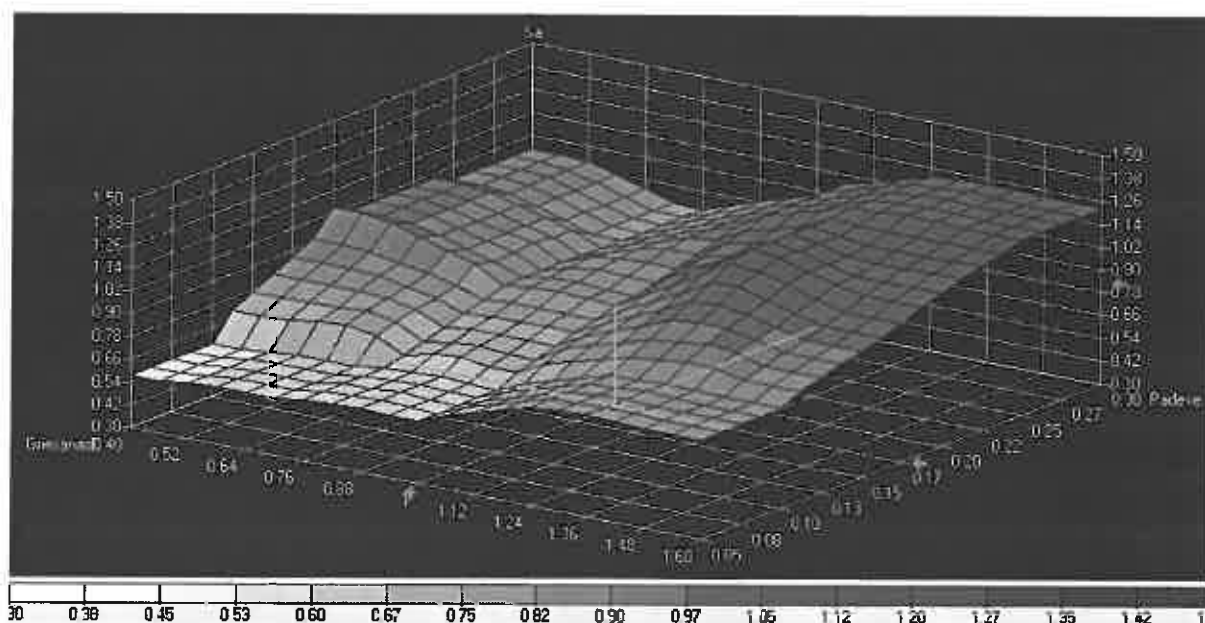
4.21. att. ir ilustrēts grafiks, kas parāda virsmas raupjuma Sa atkarību no griešanas dziļuma d un griešanas ātruma v . Kā redzams no 4.21. att. tad palielinot griešanas ātrumu v , palielinās virsmas raupjums Sa . Palielinot griešanas dziļumu d robežās no 1 līdz 1,6 mm, virsmas raupjums Sa pieaug. Taču samazinot griešanas dziļumu d robežās no 1 līdz 0,4 mm, virsmas raupjums Sa atkal pieaug. No grafika redzams, ka vismazāko virsmas raupjuma Sa vērtību, konkrēti $0,54 \mu\text{m}$ ir iespējams panākt pie griešanas dziļuma d vērtības, kas ir 1 mm. Samazinot vai palielinot griešanas dziļumu d , abos gadījumos palielinās virsmas raupjums Sa .



4.21. att. Trīsdimensionāls grafiks 3D virsmas raupjuma Sa

atkarībai no griešanas ātruma v un griešanas dziļuma d

4.22. att. ir parādīta sakarība starp virsmas raupjumu Sa un griešanas dziļumu d un padevi f . Kā jau minēts iepriekš, tad 4.22. att. ir redzams, ka palielinot padevi f , palielinās arī virsmas raupjuma Sa . Savukārt griešanas dziļums d pie iestatītās vērtības 1 mm, nodrošina vismazāko virsmas raupjumu Sa . Taču abos gadījumos, kad samazina vai palielina griešanas dziļumu d , virsmas raupjums Sa pieaug.



4.22. att. Trīsdimensionāls grafiks virsmas raupjuma Sa atkarībai no griešanas dziļuma d un padeves f

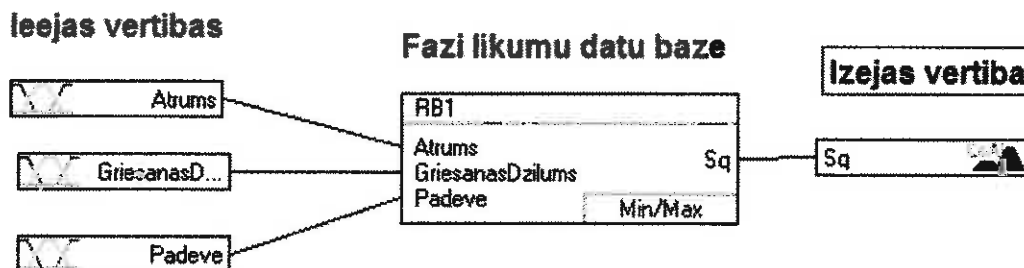
4.19., 4.20., 4.21. un 4.22. att. ilustrētie grafiki, kas norāda virsmas raupjuma Sa atkarību no tehnoloģiskiem parametriem, attiecīgi kalpo par virsmas raupjuma Sa prognozēšanas modeli raksturojošiem grafikiem.

Kā nākamais seko faziloģikas prognozēšanas modeļa ticamības vai precizitātes pārbaude. Ir zināms, kādas virsmas raupjuma vērtības ir iespējams iegūt pie noteiktiem griešanas režīmiem. Tagad ir jāveic jaunā izstrādātā prognozēšanas modeļa pārbaude, salīdzinot modeļa izdotās virsmas raupjuma vērtības ar reāli izmērītajām virsmas raupjuma vērtībām. Minētā faziloģikas prognozēšanas modeļa precizitātes pārbaudi skatīt 5. nodaļā.

Papildus jau minētajam 3D virsmas raupjuma parametram Sa tika ieviesti tādi 3D virsmas raupjuma parametri kā Sq un Sk . Ievērojot iepriekš aprakstīto 3D virsmas raupjuma

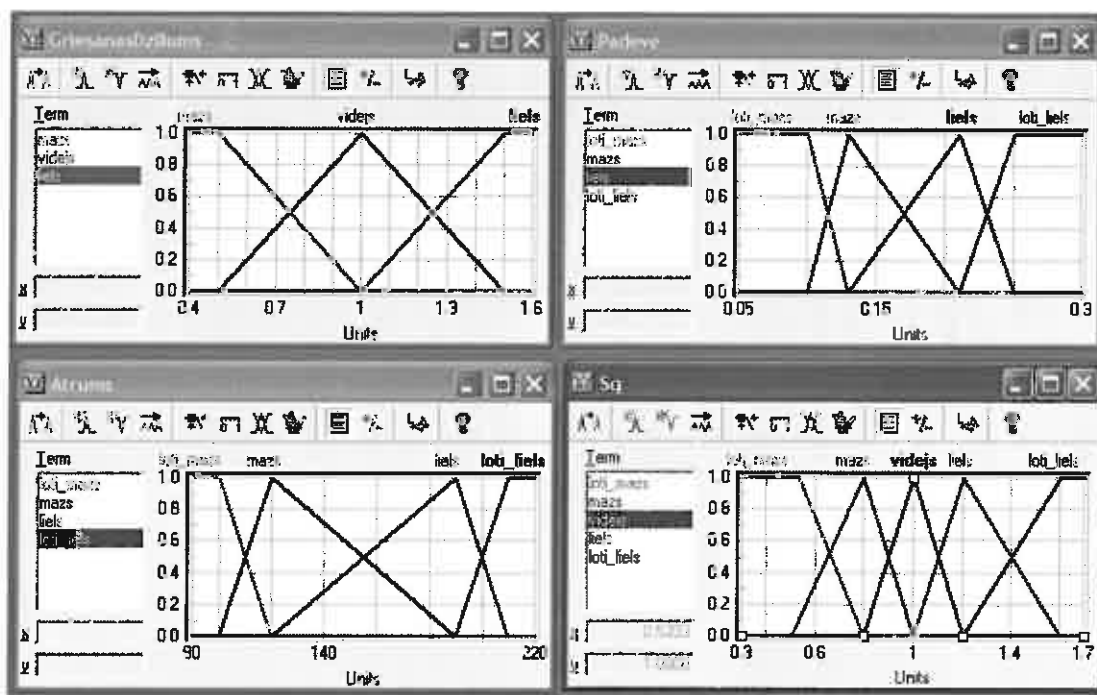
prognozēšanas modeļa izstrādes metodiku, tiek izveidots faziloģikas prognozēšanas modelis S_q .

Faziloģikas prognozēšanas modeļa izstrādi sāk ar faziloģikas sistēmas elementu blokshēmas izveidi, lai ir redzama katra iesaistītā parametra funkcija (skat. 4.23. att.).



4.23. att. Faziloģikas sistēmas elementu blokshēma

Kā nākamais solis seko tehnoloģisko parametru un 3D virsmas raupjuma parametra S_q fazifikācija. Griešanas dziļumam d veicot fazifikāciju tiek izveidotas trīs piederības funkcijas. Padeve f ir sadalīta četrās piederības funkcijās, bet griešanas ātrums v četrās piederības funkcijās. Izejas vērtība S_q fazifikācijas rezultātā iegūst piecas piederības funkcijas (skat. 4.24. att.).



4.24. att. Faziloģikas piederības funkcijas griešanas dziļumam d , griešanas ātrumam v , padevei f un 3D virsmas raupjuma parametram S_q

Pēc tehnoloģisko parametru un 3D virsmas raupjuma parametra seko faziloģikas likumu datu bāzes izveide, kur izveidotās sakarības vai likumi ir parādīti 4.3. tabulā. Uz šo nosacījumu bāzes realizē fazi spriedumu, kas izdod izejas vērtību, ko vēlāk defazificē.

4.3. tabula

Faziloģikas sistēmas likumu datu bāze

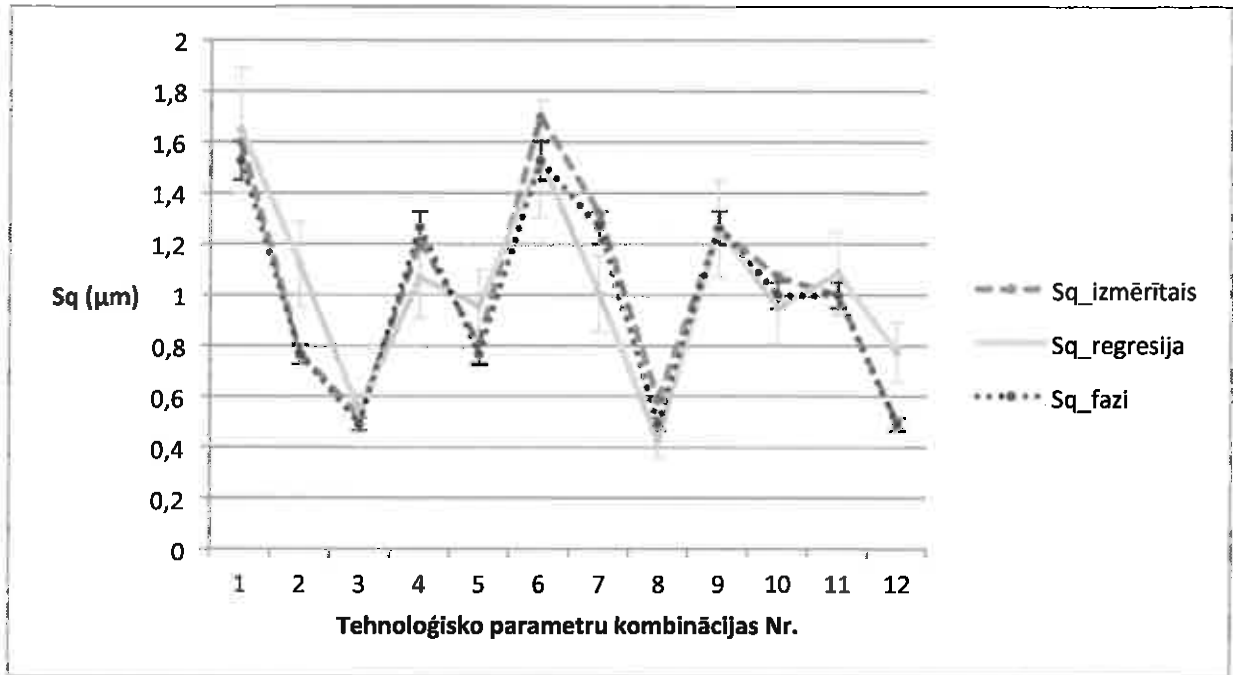
Nr.	Griešanas ātrums v	Griešanas dziļums d	Padeve f	Sq
1.	Liels	Liels	Ļoti liels	Ļoti liels
2.	Liels	Mazs	Ļoti liels	Mazs
3.	Liels	Mazs	Ļoti mazs	Ļoti mazs
4.	Liels	Liels	Ļoti mazs	Liels
5.	Mazs	Liels	Ļoti mazs	Mazs
6.	Mazs	Liels	Ļoti liels	Ļoti liels
7.	Mazs	Mazs	Ļoti liels	Liels
8.	Mazs	Mazs	Ļoti mazs	Ļoti mazs
9.	Ļoti liels	Vidējs	Liels	Liels
10.	Ļoti liels	Vidējs	Mazs	Vidējs
11.	Ļoti mazs	Vidējs	Liels	Vidējs
12.	Ļoti mazs	Vidējs	Mazs	Ļoti mazs

Kad ir ievadīti visi nepieciešamie parametri un ir veikta to fazifikācija, kā arī fazi likumu datu bāzes izveide, tad darbinot izveidoto faziloģikas sistēmu ir iespējams prognozēt 3D virsmas raupjuma parametru Sq atbilstoši ievadītajiem tehnoloģiskiem parametriem, tādiem kā griešanas ātrums v , griešanas dziļums d un padeve f . 4.4. tabulā ir doti rezultāti, kuros redzams kāds pie noteiktiem griešanas režīmiem ir izmērītais Sq , ar regresijas prognozēšanas modeli iegūtais Sq_{regr} un ar faziloģikas prognozēšanas modeli iegūtais Sq_{fazi} .

Eksperimenta tehnoloģiskie parametri f , d un v , izmērītais Sq , ar regresijas prognozēšanas modeli iegūtais Sq_{regr} un ar faziloģikas prognozēšanas modeli iegūtais Sq_{fazi}

Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)	Sq (μm)	Sq_{regr} (μm)	Sq_{fazi} (μm)
1.	0,25	1,5	190	1,6000	1,6476	1,5678
2.	0,25	0,5	190	0,7720	1,1176	0,7667
3.	0,1	0,5	190	0,5210	0,5371	0,4934
4.	0,1	1,5	190	1,2100	1,0671	1,2666
5.	0,1	1,5	120	0,8080	0,9558	0,7669
6.	0,25	1,5	120	1,7000	1,5363	1,5277
7.	0,25	0,5	120	1,3200	1,0063	1,2668
8.	0,1	0,5	120	0,5850	0,4258	0,4914
9.	0,21	1	210	1,2600	1,2596	1,2664
10.	0,13	1	210	1,0700	0,95	1,0005
11.	0,21	1	100	1,0000	1,0847	1,0001
12.	0,13	1	100	0,5010	0,7751	0,5914

Ņemot vērā no faziloģikas prognozēšanas modeļa iegūtos rezultātus un salīdzinot tos ar izmērītajām Sq vērtībām, tiek iegūts faziloģikas prognozēšanas modeļa prognozēšanas kļūda, kas ir 5,09%. 4.25. att. ir ilustrēts rezultātu salīdzinošais grafiks, kur ir redzams 12 eksperimentos iegūtais Sq , t.i., reāli izmērītais Sq . Papildus tam ir parādīti Sq vērtības, kas ir iegūtas izmantojot izveidotos regresijas ($Sq_{regresija}$) un faziloģikas (Sq_{fazi}) prognozēšanas modeļus.



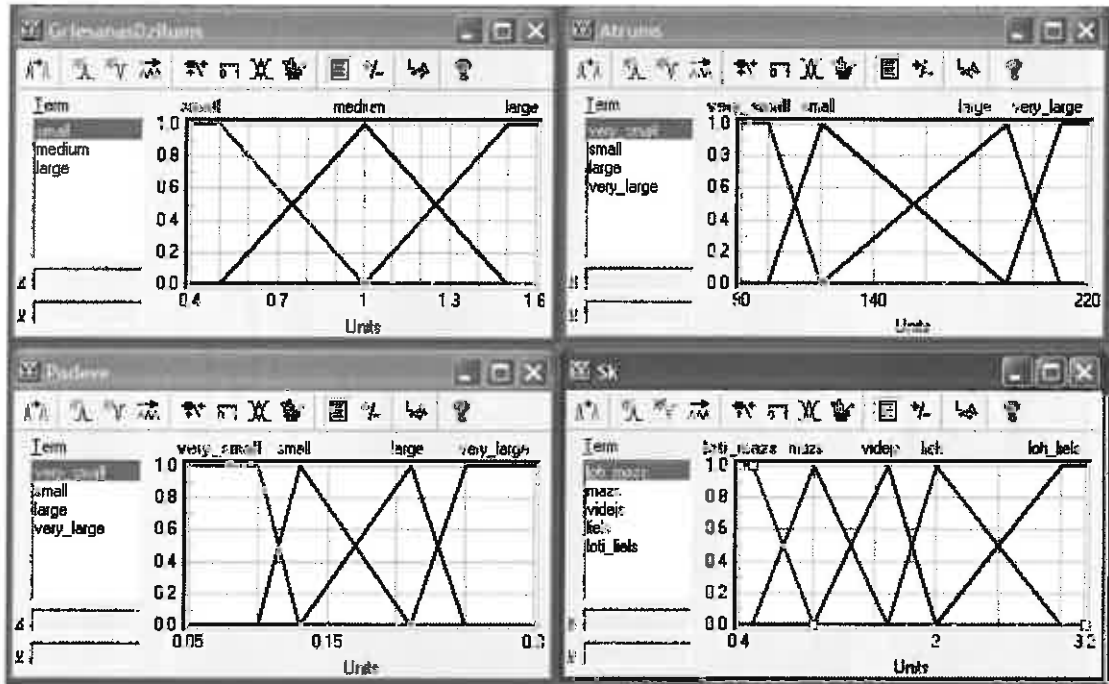
4.25. att. Rezultātu salīdzinošais grafiks

Tiek izstrādāts arī faziloģikas prognozēšanas modelis 3D virsmas raupjuma parametra Sk prognozēšanai atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Minētais faziloģikas prognozēšanas modelis tiek iegūts izmantojot iepriekš izstrādāto metodiku. Pirmais uzdevums ir izveidot faziloģikas sistēmas elementu blokskāmu, kas ilustrēta 4.26. attēlā.



4.26. att. Faziloģikas sistēmas elementu blokskāma

Kā nākamais solis seko tehnoloģisko parametru un 3D virsmas raupjuma parametra Sk fazifikācija. Griešanas dziļumam d veicot fazifikāciju tiek izveidotas trīs piederības funkcijas (skat. 4.27. att.). Padeve f ir sadalīta četrās piederības funkcijās un griešanas ātrums v četrās piederības funkcijās. Izejas vērtība Sk fazifikācijas rezultātā iegūst piecas piederības funkcijas (skat. 2.27. att.)



4.27. att. Faziloģikas piederības funkcijas griešanas dziļumam d , griešanas ātrumam v , padevei f un 3D virsmas raupjuma parametram Sq

Pēc tehnoloģisko parametru un 3D virsmas raupjuma parametra seko faziloģikas likumu datu bāzes izveide, kur izveidotās sakarības vai likumi ir parādīti 4.5. tabulā. Uz šo nosacījumu bāzes realizē fazi spriedumu, kas izdod izejas vērtību, ko vēlāk defazificē.

4.5. tabula

Faziloģikas sistēmas likumu datu bāze

Nr.	Griešanas ātrums v	Griešanas dziļums d	Padeve f	Sq
1.	Liels	Liels	Ļoti liels	Ļoti liels
2.	Liels	Mazs	Ļoti liels	Mazs
3.	Liels	Mazs	Ļoti mazs	Ļoti mazs
4.	Liels	Liels	Ļoti mazs	Liels
5.	Mazs	Liels	Ļoti mazs	Mazs
6.	Mazs	Liels	Ļoti liels	Liels
7.	Mazs	Mazs	Ļoti liels	Liels
8.	Mazs	Mazs	Ļoti mazs	Mazs
9.	Ļoti liels	Vidējs	Liels	Liels
10.	Ļoti liels	Vidējs	Mazs	Vidējs
11.	Ļoti mazs	Vidējs	Liels	Liels
12.	Ļoti mazs	Vidējs	Mazs	Mazs

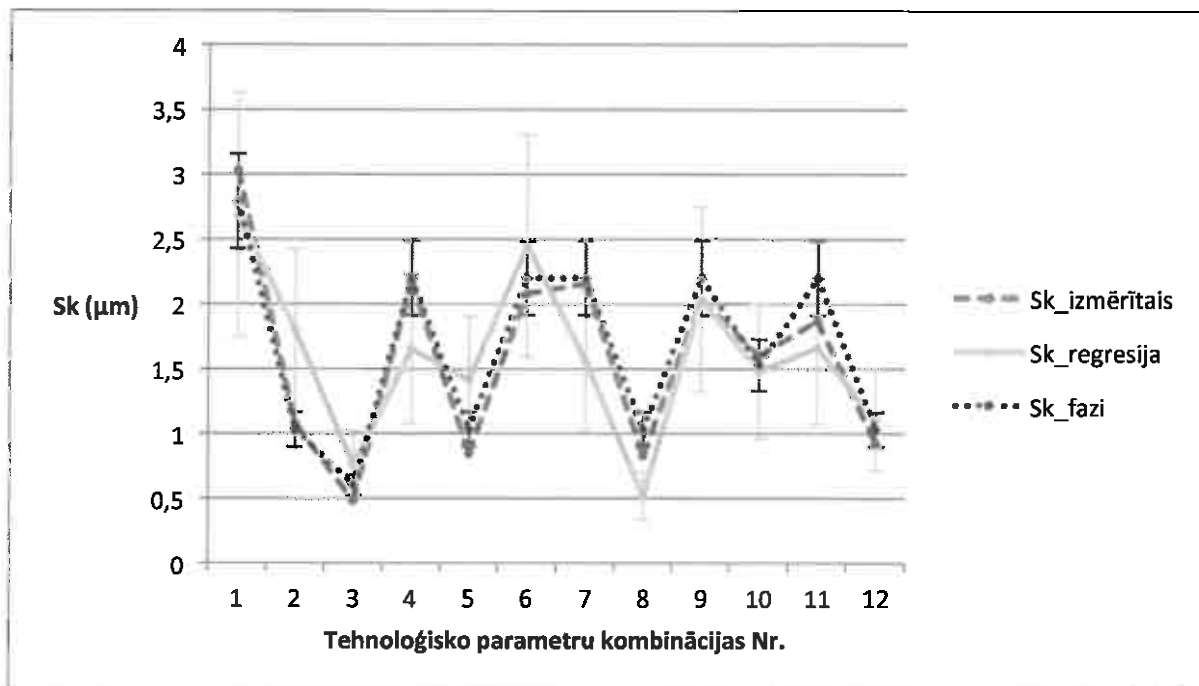
Kad ir ievadīti visi nepieciešamie parametri un ir veikta to fazifikācija, kā arī fazi likumu datu bāzes izveide, tad darbinot izveidoto faziloģikas sistēmu ir iespējams prognozēt 3D virsmas raupjuma parametru Sk atbilstoši ievadītajiem tehnoloģiskiem parametriem, tādiem kā griešanas ātrums v , griešanas dziļums d un padeve f . 4.6. tabulā ir doti rezultāti, kuros redzams kāds pie noteiktiem griešanas režīmiem ir izmērītais Sk , ar regresijas prognozēšanas modeli iegūtais Sk_{regr} un ar faziloģikas prognozēšanas modeli iegūtais Sk_{fazi}

4.6. tabula

Ekspierimenta tehnoloģiskie parametri f , d un v , izmērītais Sk , ar regresijas prognozēšanas modeli iegūtais Sk_{regr} un ar faziloģikas prognozēšanas modeli iegūtais Sk_{fazi}

Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)	Sk (μm)	Sk_{regr} (μm)	Sk_{fazi} (μm)
1.	0,25	1,5	190	3,0300	2,6908	2,7905
2.	0,25	0,5	190	1,0800	1,7968	1,1344
3.	0,1	0,5	190	0,4790	0,7588	0,6047
4.	0,1	1,5	190	2,1700	1,6528	2,2001
5.	0,1	1,5	120	0,8490	1,4134	1,2534
6.	0,25	1,5	120	2,0800	2,4514	2,3040
7.	0,25	0,5	120	2,1600	1,5574	2,1302
8.	0,1	0,5	120	0,8330	0,5194	1,0003
9.	0,21	1	210	2,0300	2,0354	2,2001
10.	0,13	1	210	1,6000	1,4818	1,5334
11.	0,21	1	100	1,8700	1,6592	2,1003
12.	0,13	1	100	0,9290	1,1056	1,0334

Ņemot vērā no faziloģikas prognozēšanas modeļa iegūtos rezultātus un salīdzinot tos ar izmērītajām Sk vērtībām, tiek iegūts faziloģikas prognozēšanas modeļa prognozēšanas kļūda, kas ir 13,82%. 4.28. att. ir ilustrēts rezultātu salīdzinošais grafiks, kur ir redzams 12 eksperimentos iegūtais Sk , t.i., reāli izmērītais Sk . Papildus tam ir parādīti Sk vērtības, kas ir iegūtas izmantojot izveidotos regresijas ($Sk_{regresija}$) un faziloģikas (Sk_{fazi}) prognozēšanas modeļus.



4.28. att. Rezultātu salīdzinošais grafiks

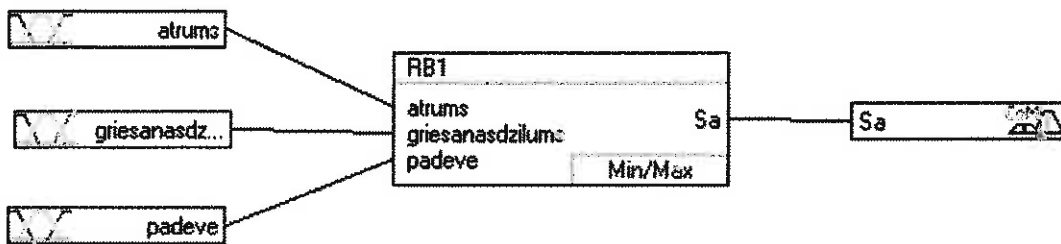
4.6. Eksperimentāla 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izstrāde virpošanā, izmantojot faziloģiku

Līdzīgi kā aprakstīts 4.5. apakšnodaļā tiek realizēta arī 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu izstrāde virpošanā, izmantojot faziloģiku. Virpošanā tika veikti divi neatkarīgi eksperimenti, lai pārliecinātos par prognozēšanas metodikas ticamību.

4.6.1. 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā, apstrādājot X8CrNi18 – 9

Eksperimenta sākumdati virpošanai tika ņemti no 3. nodaļas. No tās pašas nodaļas tika ņemts minētās apstrādes regresijas analīzes vienādojums, lai izveidotu datu bāzi faziloģikas likumiem.

Pirmkārt, tika izveidota faziloģikas sistēmas blokshēma, kas ilustrēta 4.29. att. Dotā blokshēma uzskatāmi parāda sistēmas elementu savstarpējo izvietošanu. Atbilstoši 3. nodaļā minētiem datiem kā ieejas vērtības tika izvēlēti sekojoši tehnoloģiskie parametri: griešanas ātrums v , griešanas dziļums d un padeve f . Minētās ieejas vērtības atbilstoši faziloģikas prognozēšanas modeļa metodikai tiks pakļautas fazifikācijai. Kā izejas vērtība tika definēts 3D virsmas raupjuma parametrs Sa . Arī virsmas raupjuma Sa vērtības tika pakļautas fazifikācijai.



4.29. att. Fazilōģikas sistēmas elementu blokshēma

4.6.1.1. Datu fazifikācija un to piederības funkcijas

Atbilstoši fazilōģikas prognozēšanas modeļa ieguves metodikai, tiek realizēta fazifikācija tādiem tehnolōģiskajiem parametriem kā griešanas ātrums v , griešanas dziļums d un padeve f . Dotie tehnolōģiskie parametri ir izvēlēti šādās robežās:

$$70 < v < 110 \text{ m/min},$$

$$0,025 < f < 0,125 \text{ mm/apgr.},$$

$$0,25 < d < 1,75 \text{ mm}.$$

Griešanas ātrumu v vērtības fazi kopā sadala trīs fazi funkcijās, kas grafiski attēlotas 4.30. attēla logā *atrumš*. Griešanas ātruma v fazi kopu raksturo sekojošas funkcijas:

$$A_{low}(v) = \begin{cases} 1, \text{ kad } v \leq 80 \\ (90 - v)/10, \text{ kad } 80 < v < 90 \\ 0, \text{ kad } v \geq 90 \end{cases} \quad (4.20)$$

$$A_{medium}(v) = \begin{cases} 0, \text{ kad } v \leq 80 \text{ vai } \geq 100 \\ (v - 80)/10, \text{ kad } 80 < v < 90 \\ (100 - v)/10, \text{ kad } 90 < v < 100 \\ 1, \text{ kad } v = 90 \end{cases} \quad (4.21)$$

$$A_{high}(v) = \begin{cases} 0, \text{ kad } v \leq 90 \\ (v - 90)/10, \text{ kad } 90 < v < 100 \\ 1, \text{ kad } v \geq 100 \end{cases} \quad (4.22)$$

kur A_{low} ir mazs griešanas ātrums (m/min), A_{medium} ir vidējs griešanas ātrums (m/min) un A_{high} ir liels griešanas ātrums (m/min).

Griešanas dziļuma d vērtības fazi kopā sadala divās fazi funkcijās, kas grafiski attēlotas 4.30. att. logā *griesanasdzilums*. Griešanas dziļuma d fazi kopu raksturo šādas divas funkcijas:

$$A_{small}(d) = \begin{cases} 1, \text{ kad } d \leq 0,5 \\ (1,5 - d)/1, \text{ kad } 0,5 < d < 1,5 \\ 0, \text{ kad } d \geq 1,5 \end{cases} \quad (4.23)$$

$$A_{large}(d) = \begin{cases} 0, \text{ kad } d \leq 0,5 \\ (d - 0,5)/1, \text{ kad } 0,5 < d < 1,5 \\ 1, \text{ kad } d \geq 1,5 \end{cases} \quad (4.24)$$

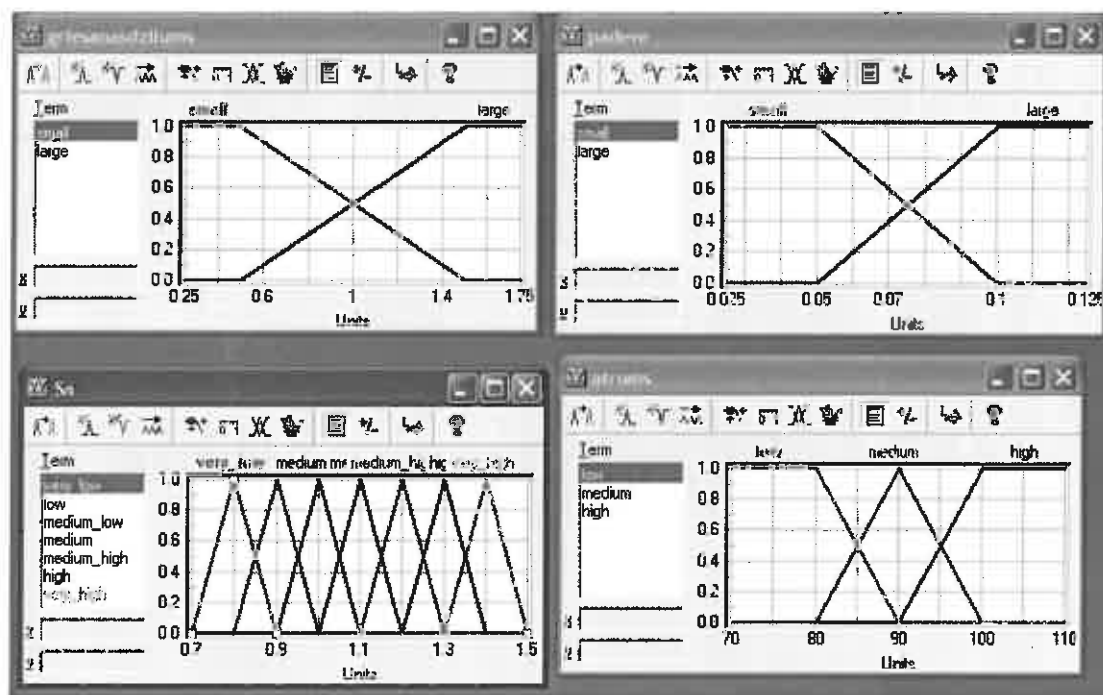
kur A_{small} ir mazs griešanas dziļums (mm), A_{large} ir liels griešanas dziļums (mm).

Padeves f vērtības fazi kopā sadala divās fazi funkcijās, kas grafiski attēlotas 4.30. att. logā padeve. Padeves f fazi kopu raksturo šādas divas funkcijas:

$$A_{small}(f) = \begin{cases} 1, & \text{kad } f \leq 0,05 \\ (0,1 - f)/1, & \text{kad } 0,05 < f < 0,1 \\ 0, & \text{kad } f \geq 0,1 \end{cases} \quad (4.25)$$

$$A_{large}(f) = \begin{cases} 0, & \text{kad } f \leq 0,05 \\ (f - 0,05)/1, & \text{kad } 0,05 < f < 0,1 \\ 1, & \text{kad } f \geq 0,1 \end{cases} \quad (4.26)$$

kur A_{small} ir maza padeve (mm/apgr.), A_{large} ir liela padeve (mm/apgr.).



4.30. att. Fazioloģikas piederības funkcijas

Virsmas raupjuma Sa (vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes - μm) vērtības fazi kopā sadala septiņās fazi funkcijās, kas grafiski attēlotas 4.30. att. logā zem nosaukuma Sa .

3D virsmas raupjuma Sa fazi kopu raksturo šādas septiņas funkcijas:

$$A_{very_low}(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 0,7 \text{ vai } \geq 0,9 \\ (Sa - 0,7)/0,1, & \text{kad } 0,7 < Sa < 0,8 \\ (0,9 - Sa)/0,1, & \text{kad } 0,8 < Sa < 0,9 \\ 1, & \text{kad } Sa = 0,8 \end{cases} \quad (4.27)$$

$$A_{low}(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 0,8 \text{ vai } \geq 1 \\ (Sa - 0,8)/0,1, & \text{kad } 0,8 < Sa < 0,9 \\ (1 - Sa)/0,1, & \text{kad } 0,9 < Sa < 1 \\ 1, & \text{kad } Sa = 0,9 \end{cases} \quad (4.28)$$

$$A_{medium_low}(Sa) = \begin{cases} 0, \text{ kad } Sa \leq 0,9 \text{ vai } \geq 1,1 \\ (Sa - 0,9)/0,1, \text{ kad } 0,9 < Sa < 1 \\ (1,1 - Sa)/0,1, \text{ kad } 1 < Sa < 1,1 \\ 1, \text{ kad } Sa = 1 \end{cases} \quad (4.29)$$

$$A_{medium}(Sa) = \begin{cases} 0, \text{ kad } Sa \leq 1 \text{ vai } \geq 1,2 \\ (Sa - 1)/0,1, \text{ kad } 1 < Sa < 1,1 \\ (1,2 - Sa)/0,1, \text{ kad } 1,1 < Sa < 1,2 \\ 1, \text{ kad } Sa = 1,1 \end{cases} \quad (4.30)$$

$$A_{medium_high}(Sa) = \begin{cases} 0, \text{ kad } Sa \leq 1,1 \text{ vai } \geq 1,3 \\ (Sa - 1,1)/0,1, \text{ kad } 1,1 < Sa < 1,2 \\ (1,3 - Sa)/0,1, \text{ kad } 1,2 < Sa < 1,3 \\ 1, \text{ kad } Sa = 1,2 \end{cases} \quad (4.31)$$

$$A_{high}(Sa) = \begin{cases} 0, \text{ kad } Sa \leq 1,2 \text{ vai } \geq 1,4 \\ (Sa - 1,2)/0,1, \text{ kad } 1,2 < Sa < 1,3 \\ (1,4 - Sa)/0,1, \text{ kad } 1,3 < Sa < 1,4 \\ 1, \text{ kad } Sa = 1,3 \end{cases} \quad (4.32)$$

$$A_{very_high}(Sa) = \begin{cases} 0, \text{ kad } Sa \leq 1,3 \text{ vai } \geq 1,5 \\ (Sa - 1,3)/0,1, \text{ kad } 1,3 < Sa < 1,4 \\ (1,5 - Sa)/0,1, \text{ kad } 1,4 < Sa < 1,5 \\ 1, \text{ kad } Sa = 1,4 \end{cases} \quad (4.33)$$

kur $A_{very_low}(Sa)$ ir funkcija ļoti mazam virsmas raupjumam (μm), $A_{low}(Sa)$ ir funkcija mazam virsmas raupjumam (μm), $A_{medium_low}(Sa)$ ir funkcija vidēji mazam virsmas raupjumam (μm), $A_{medium}(Sa)$ ir funkcija vidējam virsmas raupjumam (μm), $A_{medium_high}(Sa)$ ir funkcija vidēji lielam virsmas raupjumam (μm), $A_{high}(Sa)$ ir funkcija vidēji liam virsmas raupjumam (μm) un $A_{very_high}(Sa)$ ir funkcija ļoti lielam virsmas raupjums (μm).

4.6.1.2. Fazi likumu datu bāzes izveide

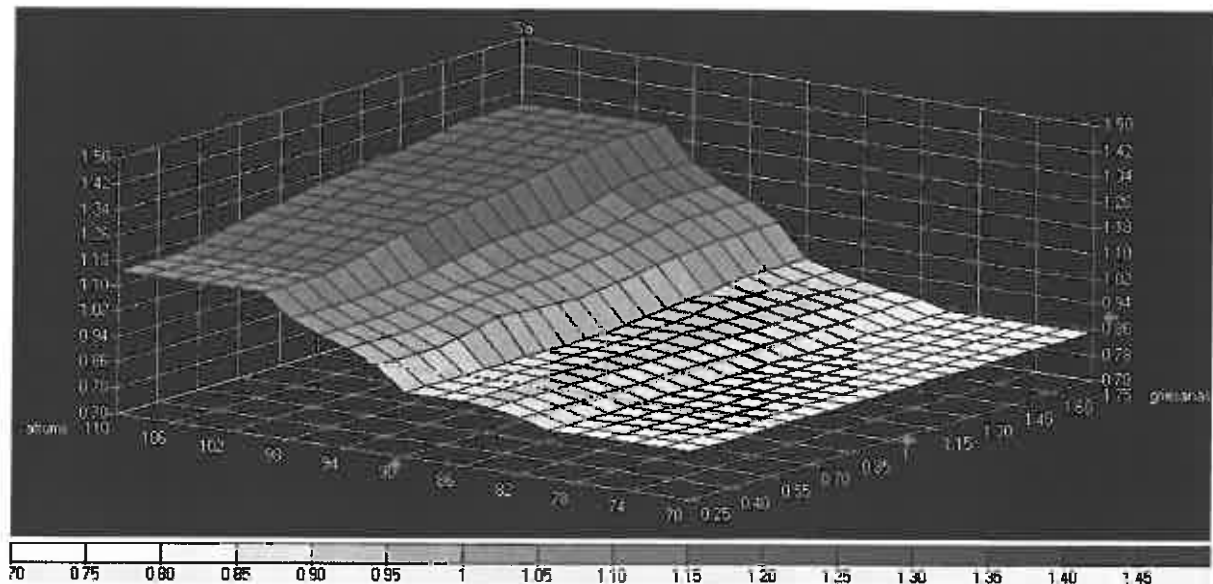
Pēc tam kad ir veikta ieejas un izejas vērtību fazifikācija, seko fazi likumu datu bāzes izveide, kas dota 4.7. tabulā. Fazi likumu datu bāze tiek veidota, balstoties uz iepriekš izveidoto 3. nodaļā atrodamo regresijas modeli, no kura var iegūt sakarības starp griešanas režīmiem un virsmas raupjumu. Tika izvēlēts, ka fazi likumu datu bāzi veidos 12 likumi jeb sakarības. Ja pēc faziloģikas prognozēšanas modeļa pārbaudes atklātos, ka modelis būtiski atšķiras no reāliem mērījumiem, tad būtu nepieciešams papildināt fazi likumu datu bāzi vai arī mainīt tajā ievadītās sakarības.

Fazi likumu datu bāze

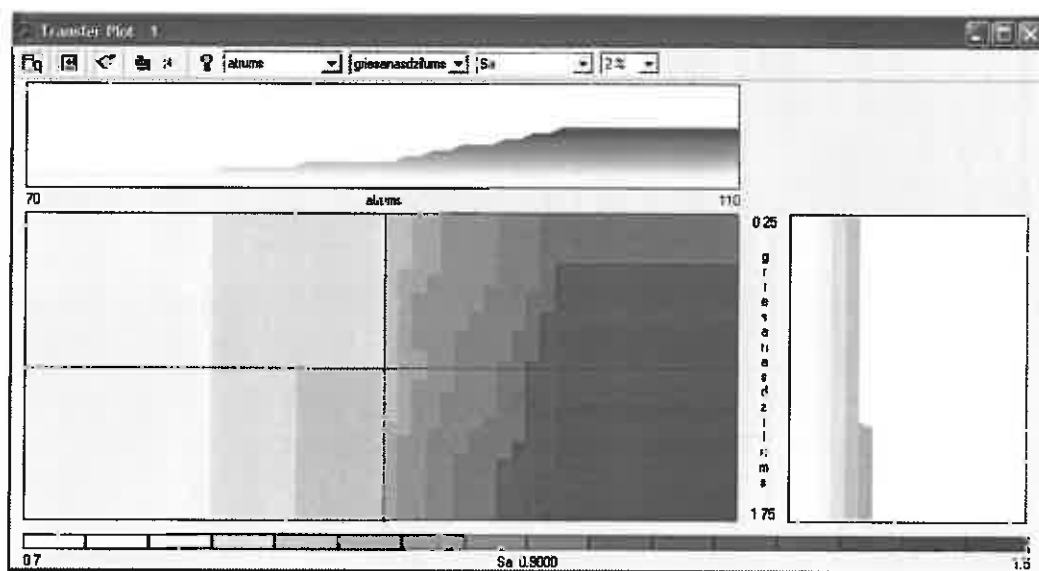
Nr.	Ātrums v (m/min)	Griešanas dziļums d (mm)	Padeve f (mm/apgr.)	Sa (μm)
1.	mazs	mazs	maza	ļoti mazs
2.	mazs	liels	maza	ļoti mazs
3.	mazs	mazs	liela	mazs
4.	mazs	liels	liela	mazs
5.	vidējs	mazs	maza	ļoti mazs
6.	vidējs	liels	maza	mazs
7.	vidējs	mazs	liela	vidēji mazs
8.	vidējs	liels	liela	vidēji mazs
9.	liels	mazs	maza	vidējs
10.	liels	liels	maza	vidēji augsts
11.	liels	mazs	liela	vidēji augsts
12.	liels	liels	liela	ļoti augsts

4.6.1.3. Datu defazifikācija un prognozēšanas modeļa ieguve

Kad ir realizēta ieejas un izejas vērtību fazifikācija un ir izstrādāta fazi likumu datu bāze (4.3. tabula), tad var uzsākt defazifikācijas procesu. Defazifikācijas procesa rezultātā iegūtās izejas vērtības Sa lingvistiskā forma (raupjš, gluds) tiek pārvērsta skaitliskā formā (μm). No 4.31. att. ilustrētā grafika var secināt, ka palielinot griešanas ātrumu v , palielinās arī virsmas raupjums Sa . Savukārt pie griešanas dziļuma palielināšanas d , virsmas raupjums Sa tikpat kā nemainās. Tikai pie palielināta griešanas ātruma v ir novērojams, ka palielinot griešanas dziļumu d , nedaudz palielinās arī virsmas raupjums Sa . 4.32. att. ir ilustrētas šīs pašas parametru vērtības nedaudz citādākā attēlojumā.

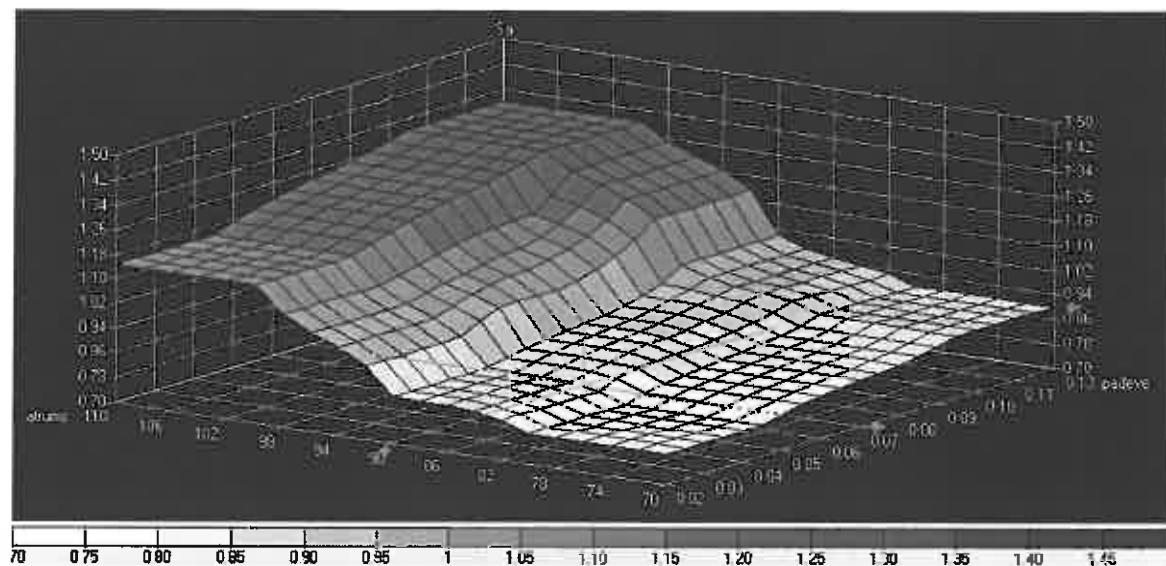


4.31. att. Trīsdimensionāls grafiks 3D virsmas raupjuma S_a atkarībai no griešanas ātruma v un griešanas dziļuma d



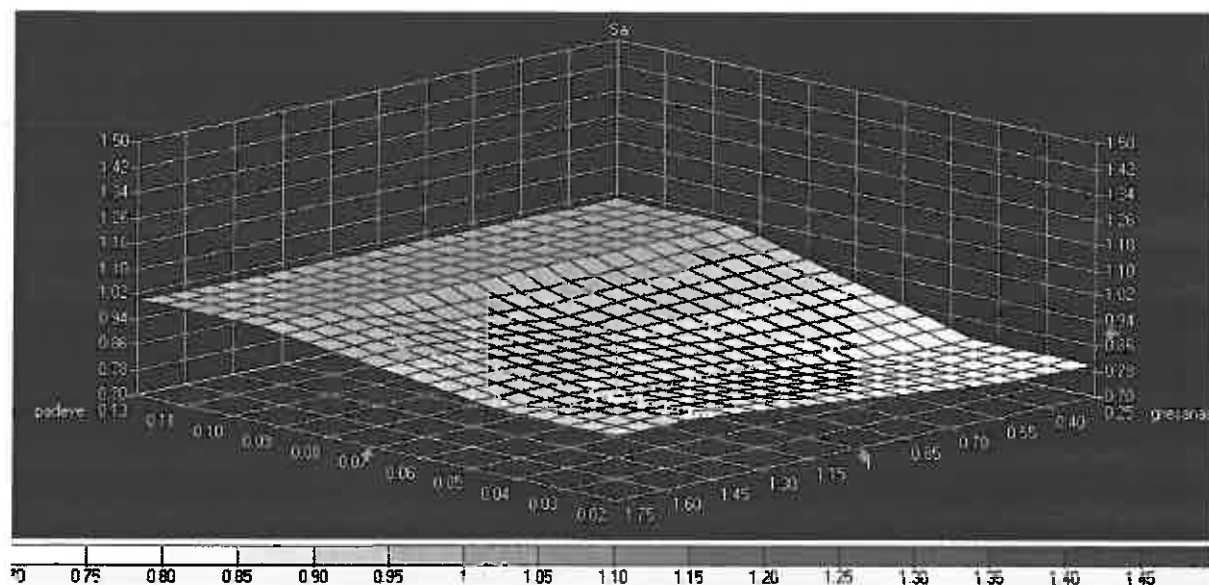
4.32. att. Grafisks attēlojums virsmas raupjuma S_a atkarībai no griešanas ātruma v un griešanas dziļuma d

4.33. att. ir ilustrēta virsmas raupjuma S_a atkarība no griešanas ātruma v un padeves f . Palielinot padevi f , virsmas raupjums S_a palielinās nebūtiski. Visas padeves f diapazonā virsmas raupjums palielinās apmēram par $0,2 \mu\text{m}$. Savukārt palielinot griešanas ātrumu v , virsmas raupjums S_a palielinās ievērojami. Pie palielināta griešanas ātruma v , asāk reagē arī virsmas raupjuma S_a izmaiņas, palielinot padevi f .



4.33. att. Trīsdimensionāls grafiks virsmas raupjuma S_a atkarībai no griešanas ātruma v un padeves f

Nemot vērā iepriekš aprakstītos faziloģikas prognozēšanas modeļa rezultātus, 4.34. att. ir grafiski attēlotas virsmas raupjuma S_a izmaiņas atkarībā no padeves f un griešanas dziļuma d . Abos gadījumos virsmas raupjuma S_a izmaiņas pret padevi f un griešanas dziļumu d nav tik lielas, kā virsmas raupjuma S_a izmaiņas pret griešanas ātrumu v . Palielinot gan padevi f , gan griešanas dziļumu d , virsmas raupjums S_a palielinās.



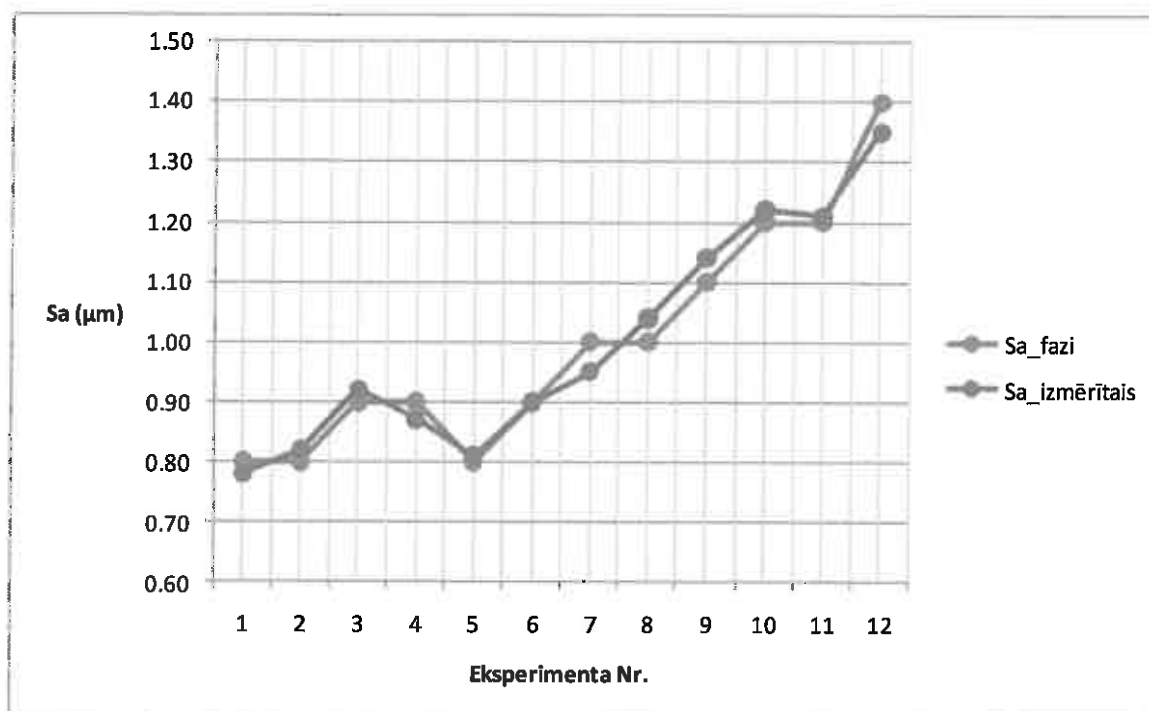
4.34. att. Trīsdimensionāls grafiks virsmas raupjuma S_a atkarībai no griešanas dziļuma d un padeves f

4.8. tabula

Eksperimenta dati ar ieejas vērtībām v, f, d un izejas vērtībām Sa , ieskaitot katra eksperimenta absolūto ΔSa_{fazi} un relatīvo $\Delta Sa\%_{fazi}$ kļūdu

Nr.	v (m/min)	f (mm/apgr.)	d (mm)	Sa_{fazi} (μm)	$Sa_{izmēr}$ (μm)	ΔSa_{fazi} (μm)	$\Delta Sa\%_{fazi}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	80	0,05	0,5	0,8	0,78	-0,02	2,56
2.	80	0,05	1,5	0,8	0,82	0,02	2,43
3.	80	0,10	1,5	0,9	0,92	0,02	2,17
4.	80	0,10	0,5	0,9	0,87	-0,03	3,44
5.	90	0,05	0,5	0,8	0,81	0,01	1,23
6.	90	0,05	1,5	0,9	0,90	0	0
7.	90	0,10	0,5	1,0	0,95	-0,05	5,26
8.	90	0,10	1,5	1,0	1,04	0,04	3,84
9.	100	0,05	0,5	1,1	1,14	0,04	3,50
10.	100	0,05	1,5	1,2	1,22	0,02	1,63
11.	100	0,10	0,5	1,2	1,21	0,01	0,82
12.	100	0,10	1,5	1,4	1,35	-0,05	3,70

Pēc 4.8. tabulā aprakstītiem datiem tiek aprēķināta faziloģikas prognozēšanas modeļa prognozēšanas kļūda, kas ir 2,55%. Var secināt, ka izveidotais prognozēšanas modelis ir ticams un izmantojams, lai veiktu 3D virsmas raupjuma prognozēšanu. Piemēram, 4.35. att. ir grafiski attēloti izmērītie un aprēķinātie (prognozētie) virsmas raupjuma Sa parametri. Kā redzams no grafika, tad faziloģikas prognozēšanas modeļa rezultāti ir tuvi izmērītajām virsmas raupjuma vērtībām.



4.35. att. Izmērītā un aprēķinātā 3D virsmas raupjuma Sa salīdzinošais grafiks pie noteiktām tehnoloģisko parametru kombinācijām

4.6.2. 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa izstrāde virpošanā, apstrādājot 11SMnPb30

Līdzīgi kā iepriekš tika realizēts vēl viens eksperiments, lai apstiprinātu faziloģikas prognozēšanas tehnikas izmantošanas pareizību. Virpošanas eksperimenta dati (iestatīto griešanas režīmu vērtības un izmērītā virsmas raupjuma Sa vērtības), apstrādājot 11SMnPb30 ir aprakstīti 3. nodaļā.

4.6.2.1. Datu fazifikācija un to piederības funkcijas

Atbilstoši faziloģikas prognozēšanas modeļa ieguves metodikai, tika realizēta fazifikācija tādiem tehnoloģiskajiem parametriem kā griešanas ātrums v , griešanas dziļums d un padeve f . Tehnoloģiskie parametri ir ņemti šādās robežās:

$$120 < v < 210 \text{ m/min,}$$

$$0,05 < f < 0,45 \text{ mm/apgr.,}$$

$$0,45 < d < 1,55 \text{ mm.}$$

Griešanas ātrumu v vērtības fazi kopā sadala trīs fazi funkcijās, kas grafiski attēlotas 4.36. att. logā „ātrums”. Griešanas ātruma v fazi kopu raksturo šādas trīs funkcijas:

$$A_{low}(v) = \begin{cases} 1, & \text{kad } v \leq 130 \\ (170 - v)/40, & \text{kad } 130 < v < 170 \\ 0, & \text{kad } v \geq 170 \end{cases} \quad (4.34)$$

$$A_{medium}(v) = \begin{cases} 0, & \text{kad } v \leq 130 \text{ vai } \geq 200 \\ (v - 130)/40, & \text{kad } 130 < v < 170 \\ (200 - v)/30, & \text{kad } 170 < v < 200 \\ 1, & \text{kad } v = 170 \end{cases} \quad (4.35)$$

$$A_{high}(v) = \begin{cases} 0, & \text{kad } v \leq 170 \\ (v - 170)/30, & \text{kad } 170 < v < 200 \\ 1, & \text{kad } v \geq 200 \end{cases} \quad (4.36)$$

kur A_{low} ir mazs griešanas ātrums (m/min), A_{medium} ir vidējs griešanas ātrums (m/min) un A_{high} ir liels griešanas ātrums (m/min).

Griešanas dziļumu d vērtības fazi kopā sadala divās fazi funkcijās, kas grafiski attēlotas 4.36. att. logā „griesanasdziļums”. Griešanas dziļuma d fazi kopu raksturo šādas divas funkcijas:

$$A_{small}(d) = \begin{cases} 1, & \text{kad } d \leq 0,5 \\ (1,5 - d)/1, & \text{kad } 0,5 < d < 1,5 \\ 0, & \text{kad } d \geq 1,5 \end{cases} \quad (4.37)$$

$$A_{large}(d) = \begin{cases} 0, & \text{kad } d \leq 0,5 \\ (d - 0,5)/1, & \text{kad } 0,5 < d < 1,5 \\ 1, & \text{kad } d \geq 1,5 \end{cases} \quad (4.38)$$

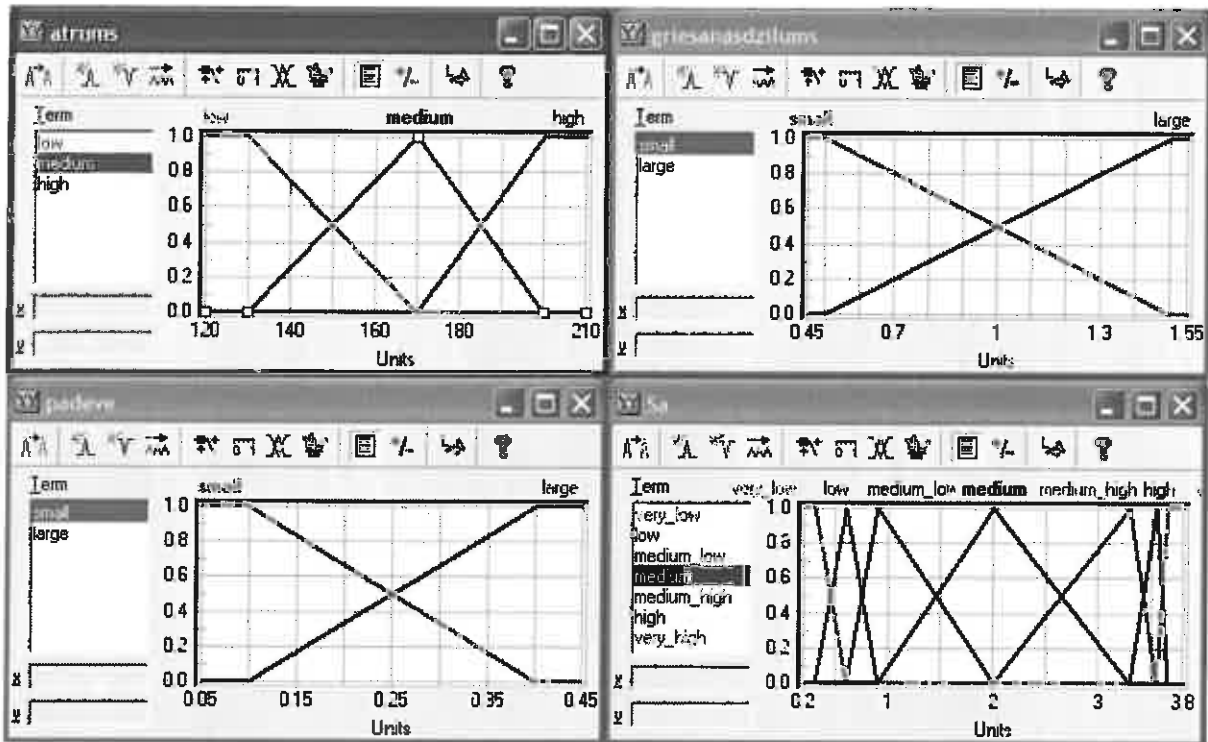
kur A_{small} ir mazs griešanas dziļums (mm), A_{large} ir liels griešanas dziļums (mm).

Padeves f vērtības fazi kopā sadala divās fazi funkcijās, kas grafiski attēlotas 4.36. att. logā „padeve”. Griešanas ātruma v fazi kopu raksturo šādas divas funkcijas:

$$A_{small}(f) = \begin{cases} 1, & \text{kad } f \leq 0,1 \\ (0,4 - f)/0,3, & \text{kad } 0,1 < f < 0,4 \\ 0, & \text{kad } f \geq 0,4 \end{cases} \quad (4.39)$$

$$A_{large}(f) = \begin{cases} 0, & \text{kad } f \leq 0,1 \\ (f - 0,1)/0,3, & \text{kad } 0,1 < f < 0,4 \\ 1, & \text{kad } f \geq 0,4 \end{cases} \quad (4.40)$$

kur A_{small} ir maza padeve (mm/apgr.), A_{large} ir liela padeve (mm/apgr.).



4.36. att. Fazilōģikas piederības funkciju attēlojums *FuzzyTECH* programmas logos

3D virsmas raupjuma Sa (vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes - μm) vērtības fazi kopā sadala septiņās fazi funkcijās, kas grafiski attēlotas 4.36. attēla logā „Sa”. Virsmas raupjuma Sa fazi kopu raksturo šādas septiņas funkcijas:

$$A_{\text{very_low}}(Sa) = \begin{cases} 1, & \text{kad } Sa \leq 0,3 \\ (0,6 - Sa)/0,3, & \text{kad } 0,3 < Sa < 0,6 \\ 0, & \text{kad } Sa \geq 0,6 \end{cases} \quad (4.41)$$

$$A_{\text{low}}(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 0,3 \text{ vai } \geq 0,9 \\ (Sa - 0,3)/0,3, & \text{kad } 0,3 < Sa < 0,6 \\ (0,9 - Sa)/0,3, & \text{kad } 0,6 < Sa < 0,9 \\ 1, & \text{kad } Sa = 0,6 \end{cases} \quad (4.42)$$

$$A_{\text{medium_low}}(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 0,6 \text{ vai } \geq 2 \\ (Sa - 0,6)/0,3, & \text{kad } 0,6 < Sa < 0,9 \\ (2 - Sa)/1,1, & \text{kad } 0,9 < Sa < 2 \\ 1, & \text{kad } Sa = 0,9 \end{cases} \quad (4.43)$$

$$A_{\text{medium}}(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 0,9 \text{ vai } \geq 3,3 \\ (Sa - 0,9)/1,1, & \text{kad } 0,9 < Sa < 2 \\ (3,3 - Sa)/1,3, & \text{kad } 2 < Sa < 3,3 \\ 1, & \text{kad } Sa = 2 \end{cases} \quad (4.44)$$

$$A_{\text{medium_high}}(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 2 \text{ vai } \geq 3,55 \\ (Sa - 2)/1,3, & \text{kad } 2 < Sa < 3,3 \\ (3,55 - Sa)/0,25, & \text{kad } 3,3 < Sa < 3,55 \\ 1, & \text{kad } Sa = 3,3 \end{cases} \quad (4.45)$$

$$A_{high}(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 3,3 \text{ vai } \geq 3,65 \\ (Sa - 3,3)/0,25, & \text{kad } 3,3 < Sa < 3,55 \\ (3,65 - Sa)/0,1, & \text{kad } 3,55 < Sa < 3,65 \\ 1, & \text{kad } Sa = 3,55 \end{cases} \quad (4.46)$$

$$A_{very_high}(Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } Sa \leq 3,55 \\ (Sa - 3,55)/0,1, & \text{kad } 3,55 < Sa < 3,65 \\ 1, & \text{kad } Sa \geq 3,65 \end{cases} \quad (4.47)$$

kur $A_{very_low}(Sa)$ ir funkcija ļoti mazam virsmas raupjumam (μm), $A_{low}(Sa)$ ir funkcija mazam virsmas raupjumam (μm), $A_{medium_low}(Sa)$ ir funkcija vidēji mazam virsmas raupjumam (μm), $A_{medium}(Sa)$ ir funkcija vidējam virsmas raupjumam (μm), $A_{medium_high}(Sa)$ ir funkcija vidēji lielam virsmas raupjumam (μm), $A_{high}(Sa)$ ir funkcija vidēji lielam virsmas raupjumam (μm) un $A_{very_high}(Sa)$ ir funkcija ļoti lielam virsmas raupjumam (μm).

4.6.2.2. Fazi likumu datu bāzes izveide

Pēc ieejas uz izejas vērtību fazifikācijas seko fazi likumu datu bāzes izveide. Minētajā eksperimentā tika pieņemts, ka datu bāzi veidos no 12 likumiem jeb sakarībām. 4.9. tabulā redzami likumi ir lasāmi sekojoši: 1. ailes likums – ja ātrums v ir „mazs” un griešanas dziļums d ir „mazs”, un padeve f ir „maza”, tad virsmas raupjums Sa ir „ļoti mazs”.

4.9. tabula

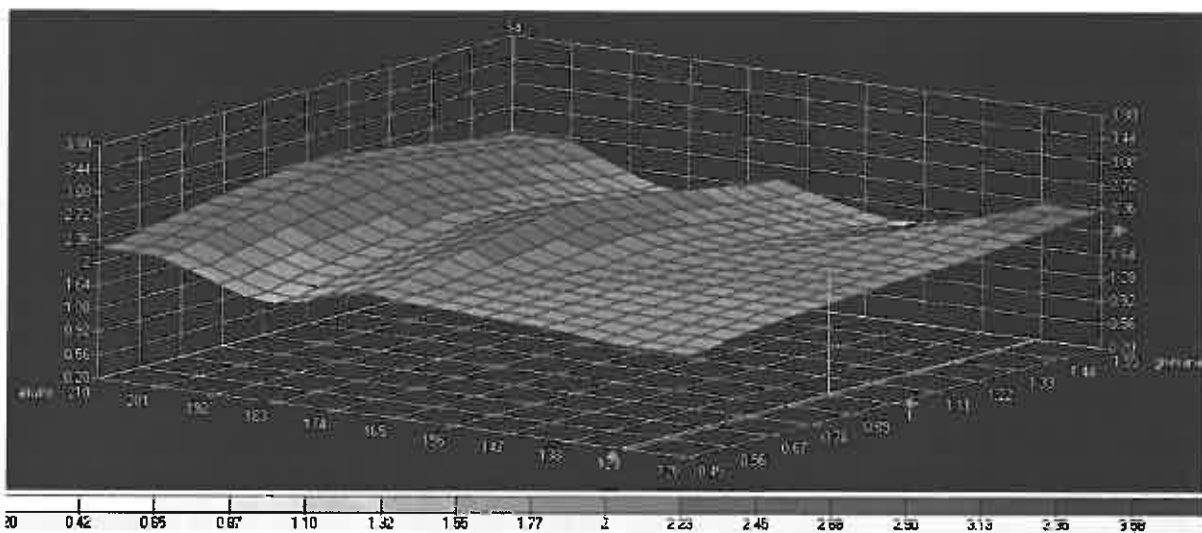
Fazi likumu datu bāze

Nr.	Ātrums v	Griešanas dziļums f	Padeve d	3D virsmas raupjums Sa
1	2	3	4	5
1.	mazs	mazs	maza	ļoti mazs
2.	mazs	liels	maza	vidēji mazs
3.	mazs	mazs	liela	vidēji liels
4.	mazs	liels	liela	ļoti liels
5.	vidējs	mazs	maza	mazs
6.	vidējs	liels	maza	mazs
7.	vidējs	mazs	liela	liels
8.	vidējs	liels	liela	ļoti liels
9.	liels	mazs	maza	vidēji mazs
10.	liels	liels	maza	vidēji mazs
11.	liels	mazs	liela	liels
12.	liels	liels	liela	ļoti liels

4.6.2.3. Datu defazifikācija un prognozēšanas modeļa ieguve

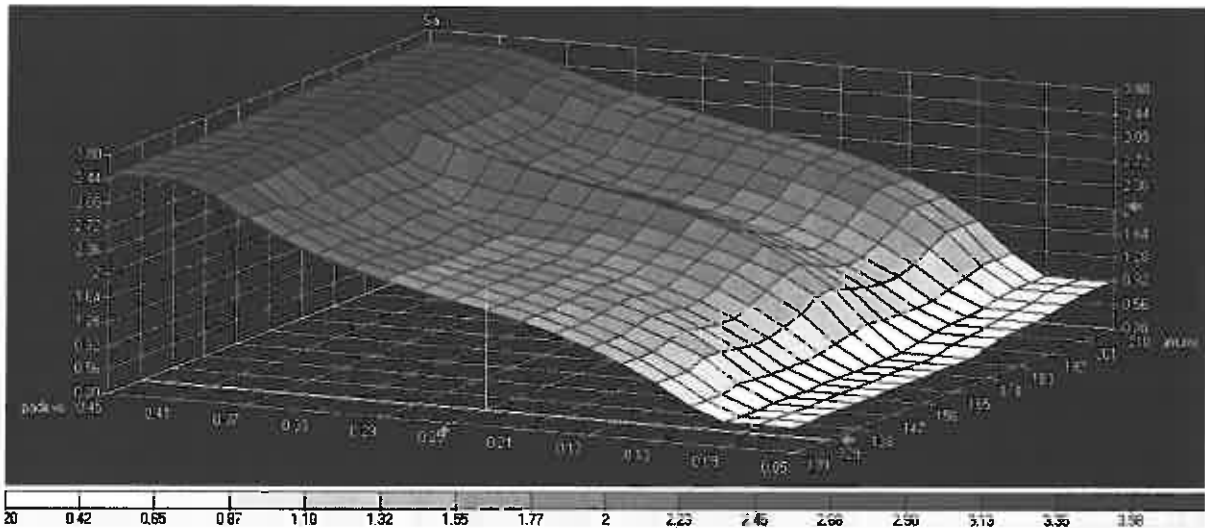
Pēc datu fazifikācijas un fazi likumu datu bāzes izveides seko to defazifikācija, kuras rezultātā tiek iegūtas virsmas raupjuma Sa vērtības pie noteiktiem griešanas režīmiem visā to iestatītajā diapazonā.

4.37. attēlā ilustrēta virsmas raupjuma Sa atkarība no griešanas ātruma v un griešanas dziļuma d . Palielinot griešanas dziļumu d , virsmas raupjums Sa tikpat kā nemainās. Ir novērojamas nelielas izmaiņas pie vidējiem un augstiem griešanas ātrumiem v . Savukārt palielinoties griešanas ātrumam v , virsmas raupjuma Sa izmaiņas ir nelineāras un vairākkārtīgi mainīgas. Tieši šādos gadījumos, kad procesa mainīgie var veidot nelineārus rezultātus, var kalpot fazilogsika.



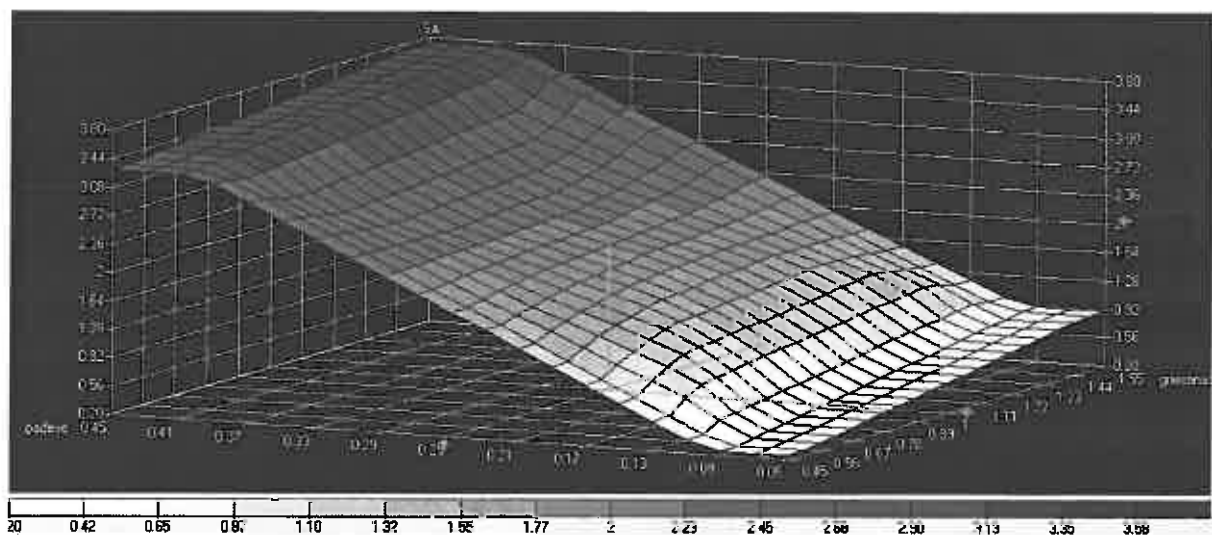
4.37. att. Trīsdimensionāls grafiks 3D virsmas raupjuma Sa atkarībai no griešanas ātruma v un griešanas dziļuma d

4.38. attēlā ir attēlotas 3D irsmas raupjuma Sa izmaiņas atkarībā no griešanas ātruma v un padeves f . Palielinot griešanas ātrumu v ir novērojamas nelineāras virsmas raupjuma izmaiņas Sa . Palielinot padevi f , virsmas raupjums Sa būtiski palielinās. Mainot padevi f robežās no 0,05 mm līdz 0,45 mm, virsmas raupjums Sa var mainīties robežās no 0,56 (pie $f=0,05$) līdz 3,5 μm ($f=0,45$ mm).



4.38 att. Trīsdimensionāls grafiks 3D virsmas raupjuma S_a atkarībai no griešanas ātruma v un padeves f

Līdzīgi novērojumi ir redzami 4.39. attēlā parādītajā grafikā. Arī šajā grafikā ir redzam, ka palielinot griešanas dziļumu d , virsmas raupjums S_a tikpat kā nemainās vai arī nedaudz palielinās. Savukārt padeve f gadījumā, palielinot padevi f , virsmas raupjums palielinās ievērojami.



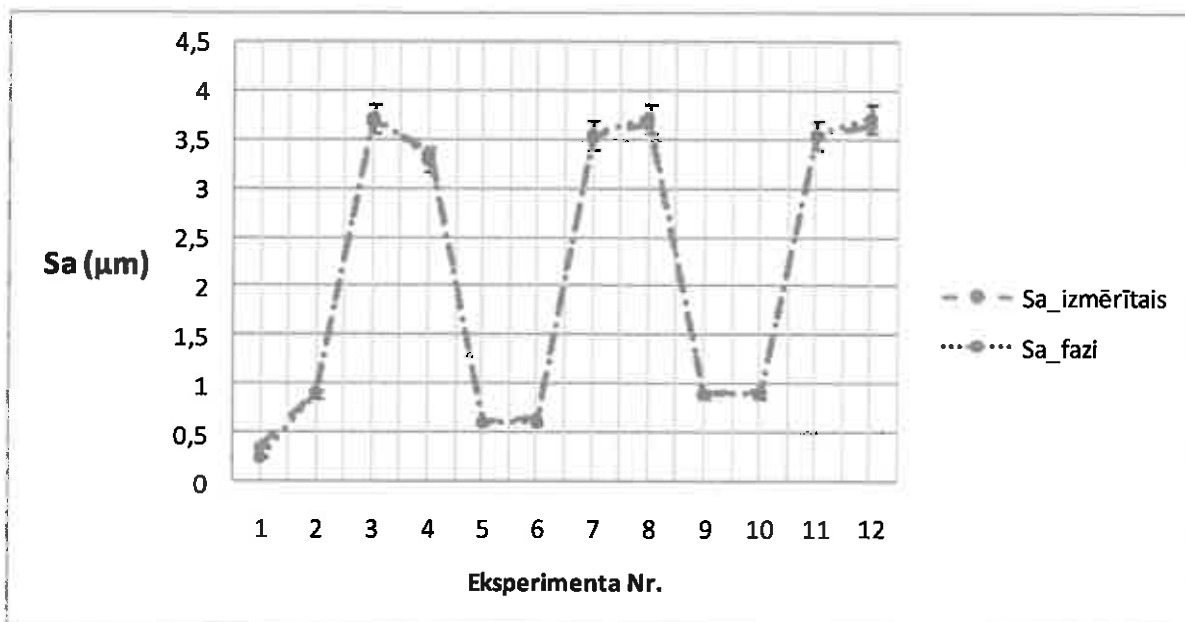
4.39. att. Trīsdimensionāls grafiks 3D virsmas raupjuma S_a atkarībai no griešanas dziļuma d un padeves f

4.10. tabula

Eksperimenta dati ar ieejas vērtībām v, f, d un izejas vērtībām Sa , ieskaitot katra eksperimenta absolūto ΔSa_{fazi} un relatīvo $\Delta Sa\%_{fazi}$ kļūdu

Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)	$Sa_{izmēr}$ (μm)	$Sa_{Fazi-aprēķ}$ (μm)	ΔSa_{Fazi}	$\Delta Sa\%_{Fazi}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	0,1	0,5	130	0,36	0,25	0,11	30,56
2.	0,1	1,5	130	0,92	0,9	0,02	2,17
3.	0,4	1,5	130	3,68	3,73	-0,05	1,22
4.	0,4	0,5	130	3,36	3,3	0,06	1,79
5.	0,1	0,5	170	0,61	0,6	0,01	1,64
6.	0,1	1,5	170	0,65	0,6	0,05	7,69
7.	0,4	0,5	170	3,53	3,55	-0,02	0,57
8.	0,4	1,5	170	3,66	3,73	-0,07	1,78
9.	0,1	0,5	200	0,90	0,90	0	0
10.	0,1	1,5	200	0,92	0,90	0,02	2,17
11.	0,4	0,5	200	3,54	3,55	-0,01	0,28
12.	0,4	1,5	200	3,64	3,73	-0,09	2,34

Pēc 4.10. tabulā aprakstītiem datiem tiek aprēķināta faziloģikas prognozēšanas modeļa prognozēšanas kļūda, kas ir 4%. Var secināt, ka izveidotais prognozēšanas modelis ir ticams un izmantojams, lai veiktu 3D virsmas raupjuma prognozēšanu. 4.40. att. ir grafiski attēloti izmērītie un aprēķinātie (prognozētie) virsmas raupjuma Sa parametri. Kā redzams no grafika, tad faziloģikas prognozēšanas modeļa rezultāti ir tuvi izmērītajām virsmas raupjuma vērtībām.

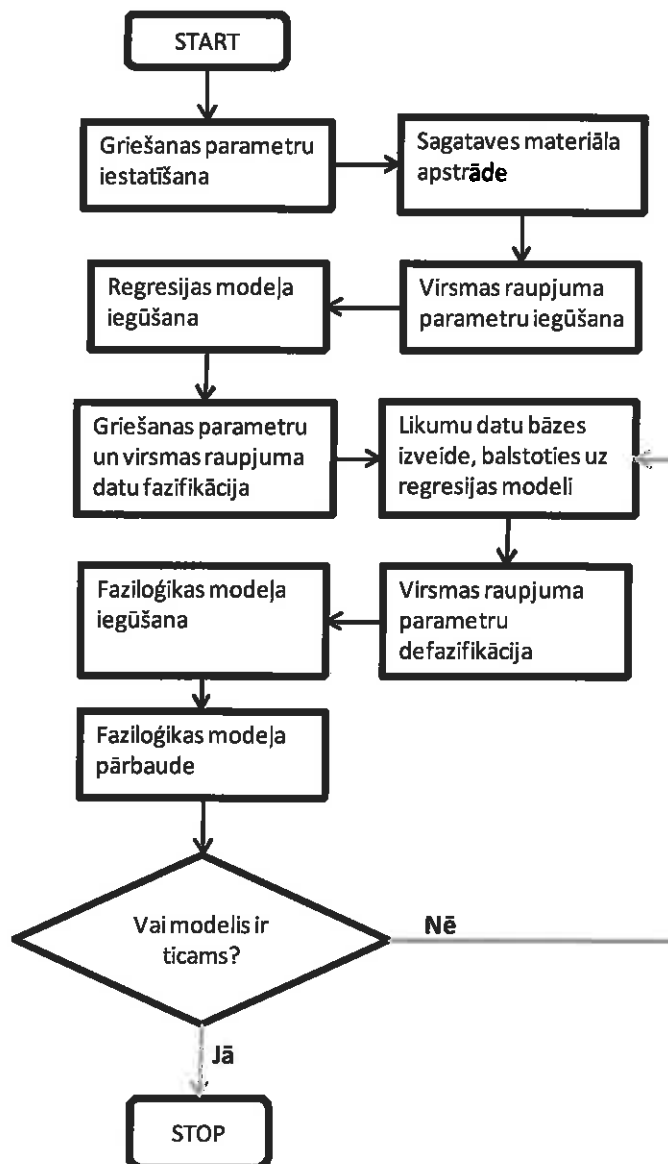


4.40. att. Izmērītā un aprēķinātā 3D virsmas raupjuma Sa salīdzinošais grafiks virpošanā atkarībā no tehnoloģisko parametru kombinācijām

4.7. 3D virsmas raupjuma faziloģikas prognozēšanas metodikas algoritms

Ņemot vērā iepriekš minētos eksperimentus saistībā ar faziloģikas prognozēšanas modeļu izstrādi, tika izstrādāta metodika, pēc kuras var realizēt faziloģikas prognozēšanas modeļa izstrādi praktiski jebkuram apstrādes procesam. Minētā metodikas blokshēma ir ilustrēta 4.41. att.

3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa izstrādi iesāk ar griešanas parametru iestatīšana, kas ietver griešanas režīmu robežvērtību izvēli un apstrādes skaita noteikšanu. Kā nākamais ir paša materiāla apstrāde, kurai seko apstrādātās virsmas mērīšana ar 3D profilometru, tādu kā *TaylorHobson Form Talysurf Intra 50*. Tiek iegūti 3D virsmas raupjuma parametru vērtības, tajā skaitā Sa – vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes. Tam seko regresijas modeļa iegūšana, kurš dod pirmo ieskatu par to, kā griešanas režīmu parametri ietekmē virsmas raupjumu. Nākamie metodikas soļi ietver faziloģikas instrumentu lietošanu. Tiek fazificēti griešanas režīmu un virsmas raupjuma vērtības. Tiek izveidota likumu datu bāze, balstoties uz sakarībām, kas iegūtas no regresijas modeļa. Tālāk jau seko datu defazifikācija un paša faziloģikas modeļa iegūšana. Kā beidzamais solis ir faziloģikas prognozēšanas modeļa ticamības pārbaude. Ja modelis iztur ticamības pārbaudi, tad ir iegūts 3D virsmas raupjuma faziloģikas prognozēšanas modelis. Metodikas soļus, kas raksturo faziloģikas pielietošanu var realizēt programmā *FuzzyTECH*.



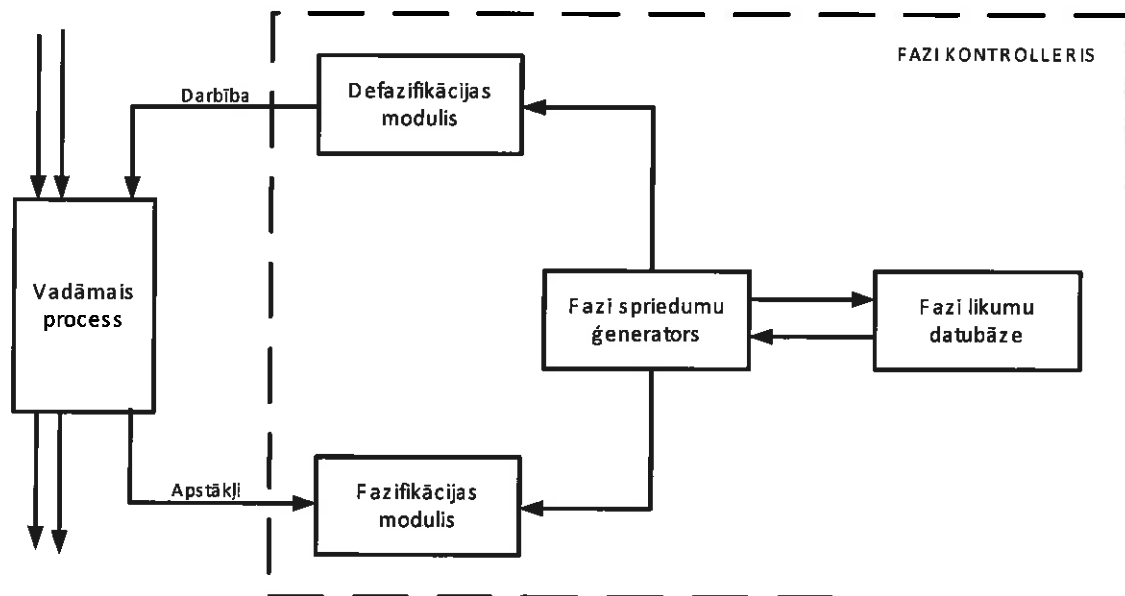
4.41. att. Faziloģikas prognozēšanas modeļa iegūšanas algoritms

4.8. Fazi kontrollera vadības programma

Pēc tam kad ir notestēta jaunā fazi sistēma, tad ir iespējams uzrakstīt fazi kontrollera programmu, kas var tikt iesaistīta CNC darba galda adaptīvās vadības sistēmās vai vadības kontrolleros. Dotā programma tiek realizēta fazi kontrolleros (skat. 4.42. att.). Fazi kontrollera galvenās sastāvdaļas ir fazifikācijas modulis, ieejošo vērtību fazifikācijai lingvistiskās vērtībās. Fazi spriedumu ģenerators, kas balstoties uz fazi piederības funkcijām un likumu datu bāzi, izdot izejas lingvistiskās vērtības. Defazifikācijas moduli, rezultātu defazifikācijai skaitliskās vērtībās un to izdošanai uz vadāmo iekārtu.

Kontrollera vadības programmas kods ir FCL (*Fuzzy Control Language* – fazi vadības programmēšanas valoda) valodā, kas ir standarts Fazi vadības programmēšanā, ko publicējusi

Starptautiskā elektrotehniskā komisija (IEC) [117]. FCL sintakses specifikāciju var atrast IEC dokumentā 61131-7 (IEC 61131-7 standarts).



4.42. att. Fazi kontrollera blokshēma

Nemot vērā visus iepriekšējos datus tika izstrādāta fazi kontrollera programma jeb programmēts virsmas raupjuma prognozēšanas modelis atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. 1. pielikumā fazioloģikas programmas algoritms, kas izpildāms fazi kontrolerī. Doto programmu var augšupielādēt mikrokontrolerī vai kādā citā ierīcē, ar kuras palīdzību ir iespējams prognozēt virsmas raupjumu atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem.

5. REGRESIJAS UN FAZILOĢIKAS VIRSMAS RAUPJUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKAS SALĪDZINOŠĀ ANALĪZE

Pēc tam, kad ir iegūti virsmas apstrādes regresijas un faziloģikas prognozēšanas modeļi, ir nepieciešams veikt to salīdzinošo analīzi. Analīzes uzdevums ir noteikt, kurš no prognozēšanas veidiem (regresija vai faziloģika) nodrošina lielāku ticamības pakāpi. Ticamības pakāpi raksturo prognozēšanas modeļu relatīvās kļūdas vērtība. Jo mazāka relatīvās kļūdas vērtība, jo ticamāks ir iegūtais prognozēšanas modelis. Publikācijās [41, 46, 85], lai noteiktu prognozēšanas kļūdas vērtību tiek lietots sekojošs vienādojums:

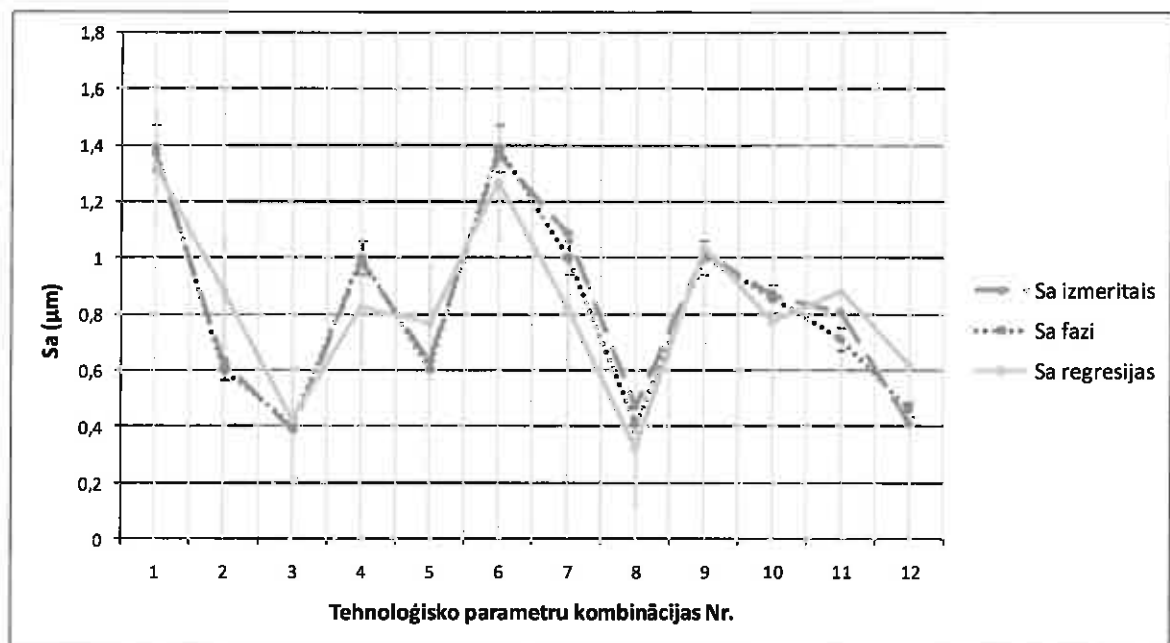
$$\Delta Sa\% = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{\Delta Sa}{\bar{Sa}} 100\%}{n}, \quad (5.1)$$

kur $\Delta Sa\%$ ir izveidotā modeļa prognozēšanas kļūda, ΔSa ir katra eksperimenta absolūtā kļūda, n ir eksperimentu skaits.

Ņemot vērā lielo publikāciju apjomu, kurās tik izmantota šī metode modeļu prognozēšanas kļūdas izvērtēšanai, tad arī šajā darbā tika izmantota šī pati metodika.

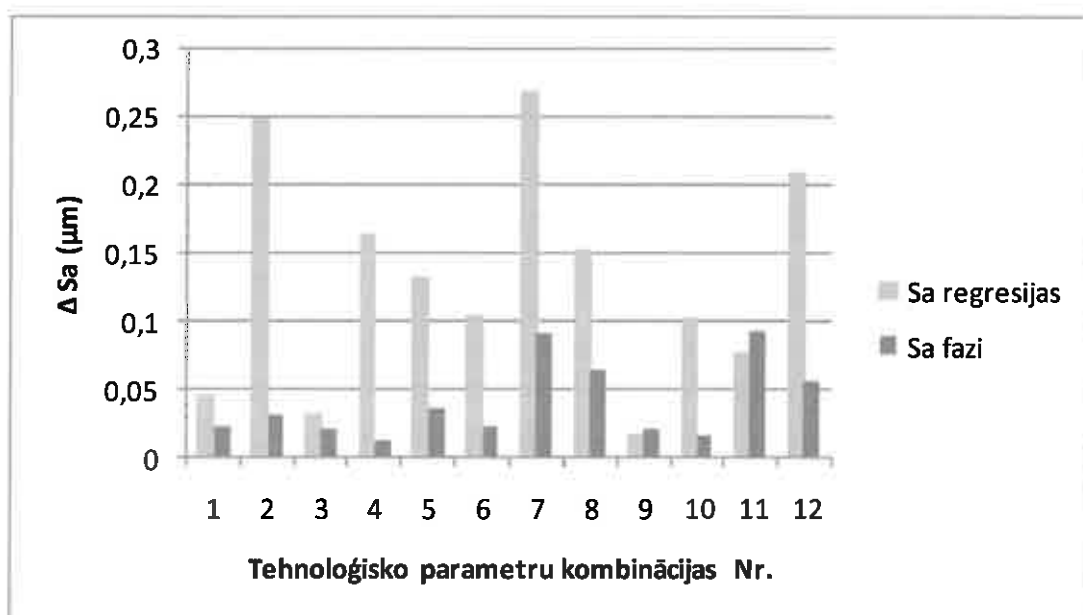
5.1. Prognozēšanas metodikas salīdzinošā analīze frēzēšanā

Kā pirmo izvēlos gala frēzēšanas prognozēšanas modeļu salīdzinošo analīzi. 5.1. tabulā ir attēloti eksperimenta dati nerūsējošā tērauda X5CrNi18-10 apstrādei ar gala frēzi. Tabulas kolonas 2. – 4. uzrāda eksperimenta sākumdatus jeb iestatītos tehnoloģiskos parametrus, attiecīgi padevi f , griešanas dziļumu d un griešanas ātrumu v . 5. kolonna norāda izmērītā 3D virsmas raupjuma parametra vērtības. Šajā gadījumā kā 3D virsmas raupjuma parametrs kalpo Sa – vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes. 6. kolona uzrāda ar regresijas modeli iegūtās 3D virsmas raupjuma vērtības ($Sa_{\text{Reg-aprēķ}}$). 7. kolona norāda katra eksperimenta absolūto kļūdu salīdzinot izmērīto 3D virsmas raupjumu ar regresijas ceļā iegūto 3D virsmas raupjumu. 8. kolonā ir norādīta regresijas modeļa relatīvā kļūda katram eksperimentam atsevišķi. 9. kolona uzrāda ar faziloģikas modeli iegūtās 3D virsmas raupjuma vērtības ($Sa_{\text{fazi-aprēķ}}$). 10. kolona norāda katra eksperimenta prognozēšanas absolūto kļūdu salīdzinot izmērīto 3D virsmas raupjumu ar faziloģikas ceļā iegūto 3D virsmas raupjumu. 11. kolonā ir norādīta faziloģikas modeļa prognozēšanas kļūda katram eksperimentam atsevišķi. Izmantojot vienādojumu (5.1), tiek iegūta prognozēšanas modeļa relatīvā kļūda.



5.1. att. Eksperimentu rezultātu salīdzinošais grafiks

5.1. att. ir ilustrēts rezultātu salīdzinošais grafiks. Kā redzams grafikā, tad faziloģikas rezultāti (Sa fazi) daudz ciešāk nekā regresijas rezultāti seko izmērītajām Sa vērtībām, kuras var uzskatīt par reālajām Sa vērtībām. Jo tuvāk prognozēšanas modeļu vērtības reālajām/izmērītajām Sa vērtībām, jo precīzāks ir iegūtais prognozēšanas modelis.



5.2. att. Regresijas un faziloģikas modeļu vērtību absolūtā kļūda pie katras tehnoloģisko parametru kombinācijas

Kā redzams no 5.2. attēlā ilustrētajiem datiem, tad 3D virsmas raupjuma faziloģikas prognozēšanas modelis ir ar mazāku absolūto kļūdu nekā regresijas prognozēšanas modelis. Veicot kļūdas aprēķinus tika konstatēts, ka regresijas prognozēšanas modeļa prognozēšanas kļūda ir 19% (18,84%), bet faziloģikas prognozēšanas modeļa prognozēšanas kļūda ir 6% (6,14%). No šī eksperimenta var secināt, ka ar faziloģikas pielietojumu var iegūt daudz precīzāku 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeli atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Lai šajā eksperimentā iegūtie secinājumi iegūtu lielāku pamatojumu, tika veikti papildus eksperimenti. Nākamajās apakšnodaļās ir aprakstīti virpošanas eksperimentu rezultāti un to salīdzinošā analīzi, lai gūtu apstiprinājumu šajā nodaļā gūtajiem secinājumiem.

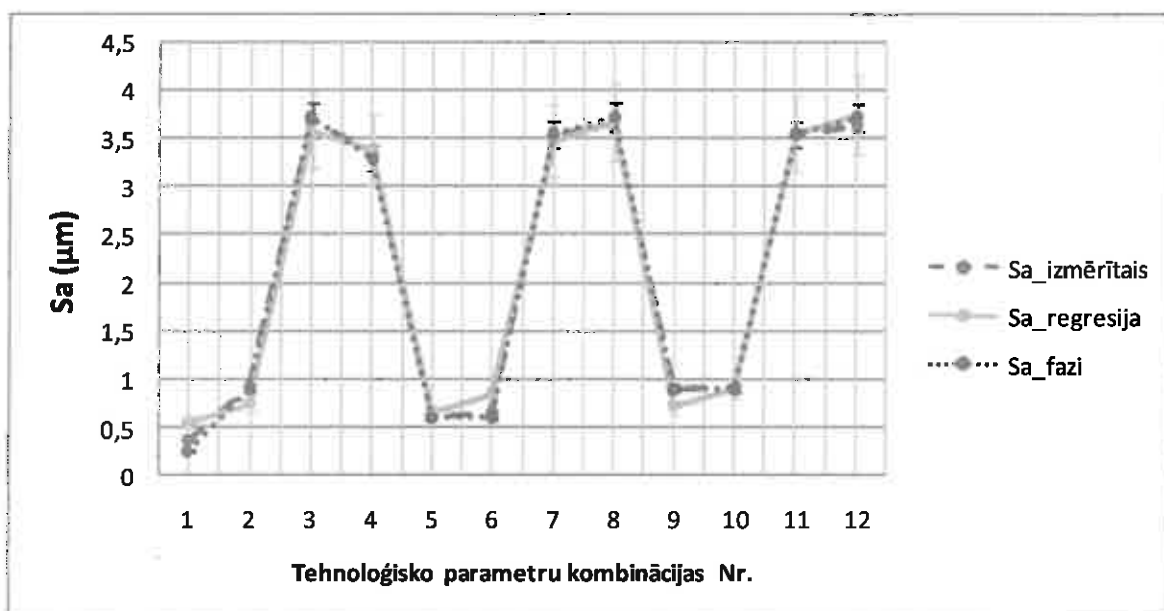
Frēzēšanas eksperimenta dati

Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)	$S_{aizmēr}$ (μm)	$S_{aReg-aprēk}$ (μm)	ΔS_{aReg} (μm)	$\Delta S_{a\%oReg}$	$S_{aFazi-aprēk}$ (μm)	ΔS_{aFazi} (μm)	$\Delta S_{a\%oFazi}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	0,25	1,5	190	1,370	1,325	0,045	3,284	1,392	0,022	1,5808
2.	0,25	0,5	190	0,631	0,879	0,248	39,303	0,600	0,031	5,166667
3.	0,1	0,5	190	0,388	0,419	0,031	7,990	0,408	0,02	4,898359
4.	0,1	1,5	190	0,988	0,825	0,163	16,498	1,000	0,012	1,2
5.	0,1	1,5	120	0,635	0,767	0,132	20,787	0,600	0,035	5,833333
6.	0,25	1,5	120	1,370	1,267	0,103	7,518	1,392	0,022	1,5808
7.	0,25	0,5	120	1,090	0,821	0,269	24,679	1,000	0,09	9
8.	0,1	0,5	120	0,472	0,321	0,151	31,992	0,408	0,064	15,67475
9.	0,21	1	210	1,020	1,036	0,016	1,569	1,000	0,02	2
10.	0,13	1	210	0,871	0,770	0,101	11,596	0,856	0,015	1,752336
11.	0,21	1	100	0,805	0,882	0,077	9,565	0,712	0,093	13,0618
12.	0,13	1	100	0,407	0,616	0,209	51,351	0,462	0,055	11,90476

5.2. Prognozēšanas metodikas salīdzinošā analīze virpošanā

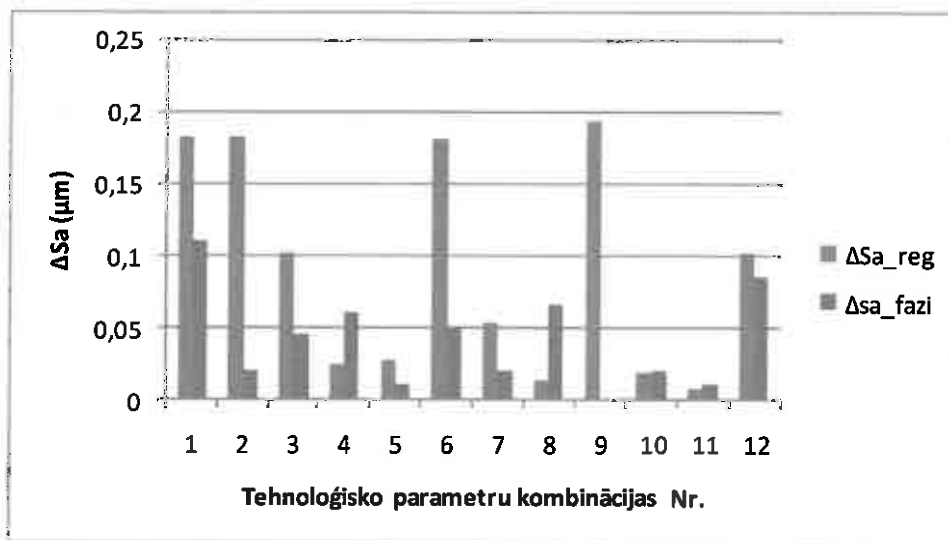
5.2.1. 11SMnPb30 virpošana

Regresijas analīze lietošanas ziņā ir vienkāršāka par faziloģiku, jo faziloģikas sistēmas izveidošanai ir nepieciešamas zināšanas par apstrādi. Regresijas analīzes lietošanai pietiek ar zināšanām statistikas izmantošanā. Regresijas vienādojuma iegūšana no sākumdatiem var tikt veikta pilnībā automātiski. Savukārt faziloģikas modeļa izveidošanā ir nepieciešamas zināšanas par apstrādes procesu, jo ir jādefinē apstrādes likumu datu bāze.



5.3. att. 3D virsmas raupjuma parametru salīdzinošais grafiks

Kā redzams no rezultātiem, kas ilustrēti 5.3., 5.4. att. un attēloti 5.2. tabulā, tad 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa, kas iegūts ar faziloģikas pielietojumu, prognozēšanas kļūda ir 4% (4,2%), savukārt 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa, kas iegūts ar regresijas analīzes pielietojumu, prognozēšanas kļūda ir 11% (11,2%). No šī eksperimenta var secināt, ka arī virpošanā ar faziloģiku var iegūt daudz precīzāku 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļu atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Eksperiments parāda, ka tendence saglabājas un faziloģikas prognozēšanas modeļi ir ticamāki par regresijas prognozēšanas modeļiem.



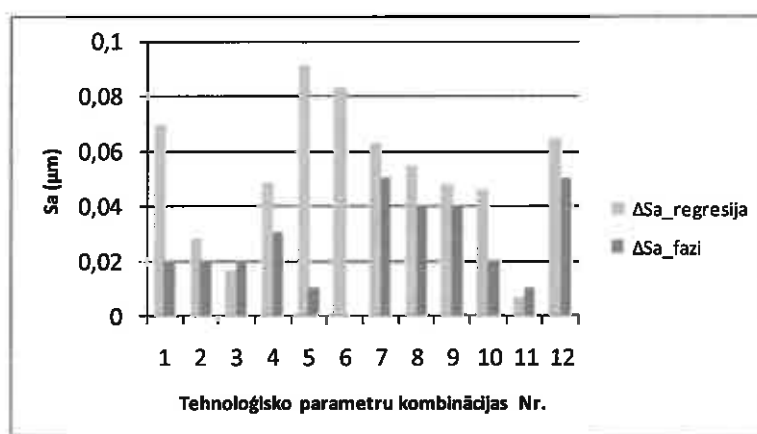
5.4. att. Regresijas un faziloģiskas modeļu prognozēšanas absolūtā kļūda pie katras tehnoloģisko parametru kombinācijas

Virpošanas eksperimenta dati, apstrādājot 11SMnPb30

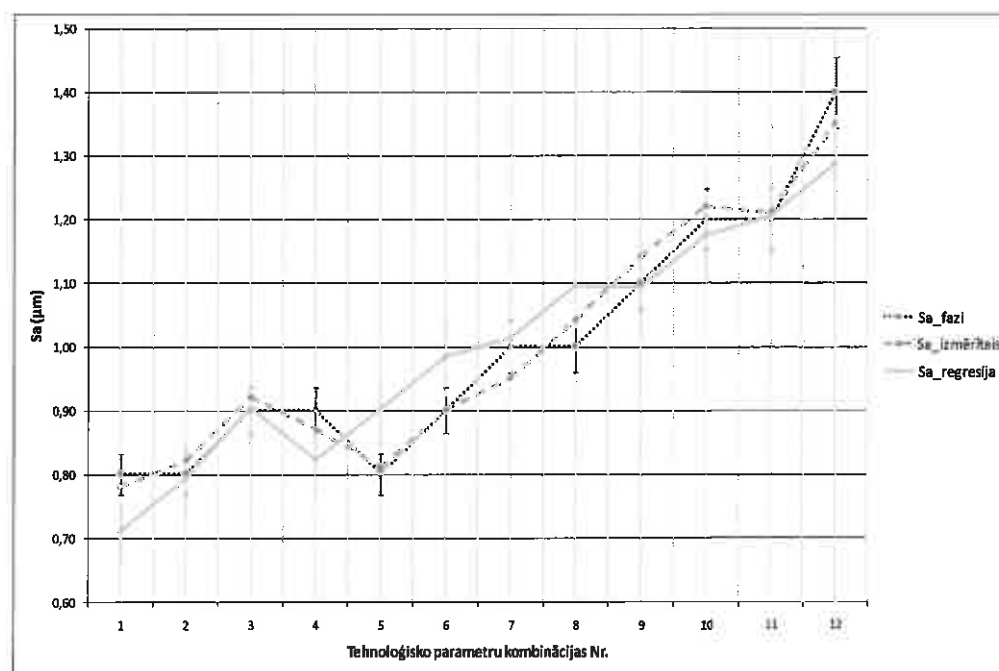
Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)	S _{izmēr} (μ m)	S _{Reg-aprēk} (μ m)	Δ S _{Reg}	Δ Sa% _{Reg}	S _{Fazi-aprēk} (μ m)	Δ Sa _{Fazi}	Δ Sa% _{Fazi}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	0,1	0,5	130	0,36	0,5427	-0,1827	50,75	0,25	0,11	30,55556
2.	0,1	1,5	130	0,92	0,7377	0,1823	19,81522	0,9	0,02	2,173913
3.	0,4	1,5	130	3,68	3,5787	0,1013	2,752717	3,725	-0,045	1,222826
4.	0,4	0,5	130	3,36	3,3837	-0,0237	0,705357	3,3	0,06	1,785714
5.	0,1	0,5	170	0,61	0,6363	-0,0263	4,311475	0,6	0,01	1,639344
6.	0,1	1,5	170	0,65	0,8313	-0,1813	27,89231	0,6	0,05	7,692308
7.	0,4	0,5	170	3,53	3,4773	0,0527	1,492918	3,55	-0,02	0,566572
8.	0,4	1,5	170	3,66	3,6723	-0,0123	0,336066	3,725	-0,065	1,775956
9.	0,1	0,5	200	0,90	0,7065	0,1935	21,5	0,9	0	0
10.	0,1	1,5	200	0,92	0,9015	0,0185	2,01087	0,9	0,02	2,173913
11.	0,4	0,5	200	3,54	3,5475	-0,0075	0,211864	3,55	-0,01	0,282486
12.	0,4	1,5	200	3,64	3,7425	-0,1025	2,815934	3,725	-0,085	2,335165

5.2.2. X8CrNi18 – 9 virpošana

Kā redzams no rezultātiem, kas ilustrēti 5.5., 5.6. att. un uzrādīti 5.3. tabulā, tad 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa, kas iegūts ar fazilōģikas pielietošanu, prognozēšanas kļūda ir 4% (3,7%), savukārt 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļa, kas iegūts ar regresijas analīzes pielietošanu, prognozēšanas kļūda ir 6% (5,5%). No šī eksperimenta var secināt, ka arī šeit ar fazilōģikas pielietošanu var iegūt nedaudz precīzāku 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeli atkarībā no tehnoloģiskajiem parametriem. Tendence saglabājas – fazilōģikas prognozēšanas modeļi ir ticamāki par regresijas prognozēšanas modeļiem.



5.5. att. Regresijas un fazilōģikas modeļu prognozēšanas kļūda katrā tehnoloģisko parametru kombinācijā



5.6. att. 3D virsmas raupjuma parametru salīdzinošais grafiks

Virpošanas eksperimenta dati, apstrādājot X8CrNi18 – 9

Nr.	f (mm/apgr.)	d (mm)	v (m/min)	$S_{aizmēr}$ (μm)	$S_{aReg-aprēk}$ (μm)	ΔS_{aReg}	$\Delta S_{a\%Reg}$	$S_{aFazi-aprēk}$ (μm)	ΔS_{aFazi}	$\Delta S_{a\%Fazi}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	0,05	0,5	80	0,78	0,71035	0,06965	8,929487	0,80	-0,02	2,564103
2.	0,05	1,5	80	0,82	0,79205	0,02795	3,408537	0,80	0,02	2,439024
3.	0,10	1,5	80	0,92	0,90355	0,01645	1,788043	0,90	0,02	2,173913
4.	0,10	0,5	80	0,87	0,82185	0,04815	5,534483	0,90	-0,03	3,448276
5.	0,05	0,5	90	0,81	0,90135	-0,09135	11,27778	0,80	0,01	1,234568
6.	0,05	1,5	90	0,90	0,98305	-0,08305	9,227778	0,90	0	0
7.	0,10	0,5	90	0,95	1,01285	-0,06285	6,615789	1,00	-0,05	5,263158
8.	0,10	1,5	90	1,04	1,09455	-0,05455	5,245192	1,00	0,04	3,846154
9.	0,05	0,5	100	1,14	1,09235	0,04765	4,179825	1,10	0,04	3,508772
10.	0,05	1,5	100	1,22	1,17405	0,04595	3,766393	1,20	0,02	1,639344
11.	0,10	0,5	100	1,21	1,20385	0,00615	0,508264	1,20	0,01	0,826446
12.	0,10	1,5	100	1,35	1,28555	0,06445	4,774074	1,40	-0,05	3,703704

Apskatot citu autoru publikācijas, kurās arī tiek minētas virsmas raupjuma prognozēšanas metodes, tika konstatēts, ka to prognozēšanas precizitāte vai tam pretējā prognozēšanas kļūda nav tik apmierinoša kā šajā promocijas darbā iegūto prognozēšanas modeļu kļūda.

Lū, Čena un Lī [46] darbā tika izveidots virsmas profila raupjuma prognozēšanas modelis gala frēzēšanā, izmantojot regresijas analīzi. Tika iegūti divi prognozēšanas modeļi, kur katra modeļa vidējā relatīvā kļūda ir 9,71% un 9,97% attiecīgi. Darbā arī uzrādīta vidējās relatīvās kļūdas noteikšanas metodika. Kirbija, Zanga un Čena [41] darbā tika izveidots virsmas raupjuma prognozēšanas modelis, kas prognozē virsmas profila raupjumu atkarībā no apstrādes sistēmas vibrācijām. Modelis tika iegūts izmantojot regresijas analīzi. Izmantojot iepriekš aprakstīto vidējās relatīvās kļūdas metodiku, tika iegūts, ka prognozēšanas modeļa vidējā relatīvā kļūda ir 9,96%. Minētajā darbā vidējā relatīvā kļūda tiek saukta par prognozēšanas kļūdu un ir apzīmēta ar δ . Kumāra Redija un Rao [66] tika izstrādāts virsmas profila raupjuma prognozēšanas modelis, izmantojot ģenētisko algoritmus. Eksperimenta rezultātā izveidotā modeļa vidējā relatīvā kļūda ir 35%. Autoru darbs bija kā mēģinājums izmantot ģenētiskos algoritmu virsmas profila raupjuma prognozēšanas modeļu izstrādē. Apsveicama ir pašu ģenētisko algoritmu izmantošana, ka norāda uz tendenci izmantot arvien sarežģītākas aprēķinu un optimizācijas metodes. Sevidža un Čena [14] darbā tika veidota virsmas profila raupjuma prognozēšanas modelis frēzēšanai. Izmantoja regresijas analīzi. Iegūtais modeļa vidējā relatīvā kļūda ir 18%. Samhourī un Surdženora [72] darbā virsmas profila raupjuma prognozēšanas modeļa vidējā relatīvā kļūda ir 9%.

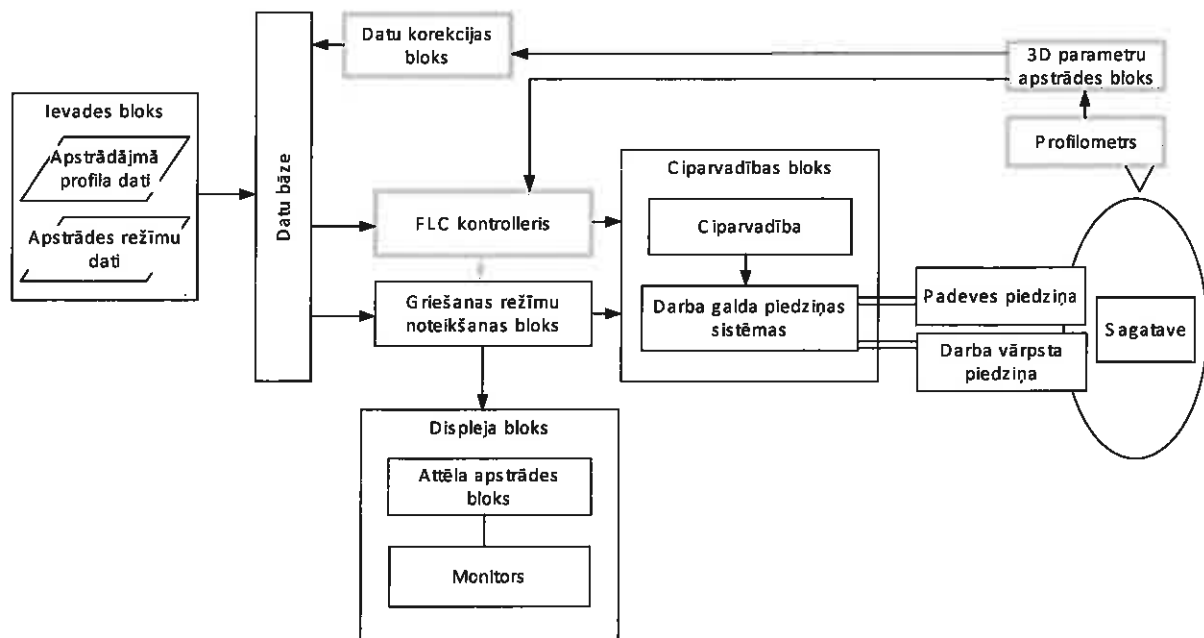
Inasaki [21] darbā regresijas prognozēšanas modeļa vidējā relatīvā kļūda ir uzrādīta 18% robežās [21]. Huanga un Čena [102] darbā tika ziņots par regresijas modeļa prognozēšanas kļūdu 10% [34]. Savukārt Zhou [38] un Antoniadis [52] darbus prognozēšanas modeļa vidējā relatīvā kļūda ir attiecīgi 16% un 17% [76 un 94]. Lī un Dornfelds ieguva regresijas prognozēšanas modeļus ar kļūdu plus mīnus 10%. Tā kā viņu dotajā publikācijā nav norādīta kļūdas aprēķināšanas metodika, tad ir grūti noteikt, ko precīzi nozīmē frāze „plus mīnus” [84].

6. IEKĀRTA UN PAŅĒMIENS SAGATAVES APSTRĀDES ADAPTĪVAI VADĪBAI

6.1. Apstrādes adaptīvā vadības sistēmas koncepta izstrāde

Promocijas darba ietvaros tika izstrādāta adaptīvās vadības sistēma, kurai ir jānodrošina tehnoloģisko parametru adaptīva vadība atkarībā no izveidotā virsmas raupjuma.

Par pamatu tika ņemta standarta ciparvadības (CNC) darba galda vadības shēma, kas ir redzama 6.3. att. un ir iekrāsota melnā krāsā. Papildus jau zināmajai sistēmai tika pievienoti FLC controlleris, profilometrs ar 3D virsmas raupjuma parametru apstrādes bloku un datu korekcijas bloks. Pašas adaptīvās vadības sistēmas pamatā ir FLC controlleris. Tajā tiek īstenota faziloģikas programma, kā arī izdoti dati uz ciparvadības bloku un uz griešanas režīmu noteikšanas bloku, lai pēc nepieciešamības mainītu griešanas režīmus. Pašas faziloģikas programmas iegūšanas metodika ir aprakstīta 4. nodaļā.



6.3. att. Bloks shēma, kas attēlo CNC un adaptīvās vadības blokus

Lai FLC controlleris saņemtu apstrādājamās datus, tad sistēmā ir iestrādāts profilometrs ar 3D parametru apstrādes bloku. Ar profilometra un 3D virsmas raupjuma apstrādes bloka palīdzību tiek ievākti dati par apstrādātās detaļas virsmu, kur tālāk dati tiek nodoti FLC controllerim to apstrādei un jaunu vadības datu izveidē. Papildus tam, savāktie dati ar datu korekcijas bloka starpniecību tiek nodoti datu bāzē, tādējādi veidojot zināšanu

datu bāzi. Šo datu bāzi vēlāk var izmantot, lai uzlabotu faziloģikas prognozēšanas modeļus attiecīgajiem apstrādes procesiem.

6.4. att. ilustrēts paņēmieni sagataves apstrādei, izmantojot adaptīvās vadības sistēmu ar faziloģiku, kas raksturīgs ar to, ka paņēmieni ietver šādus soļus:

(i) sagataves apstrādi pie iestatītās tehnoloģiskā parametra f vērtības, izmantojot ciparvadības bloku. Šajā gadījumā tiek pieņemts, ka tehnoloģiskais parametrs, kurš tiks vadīts pamatojoties uz faziloģiku tiks izmantota padeve f . Pēc izvēles kā tehnoloģiskais parametrs var būt griešanas dziļums d , griešanas ātrums v vai jebkurš cits tehnoloģiskais parametrs, kuru var operatīvi mainīt.

(ii) sagataves virsmas raupjuma Sa vērtību mērīšanu, izmantojot profilometru;

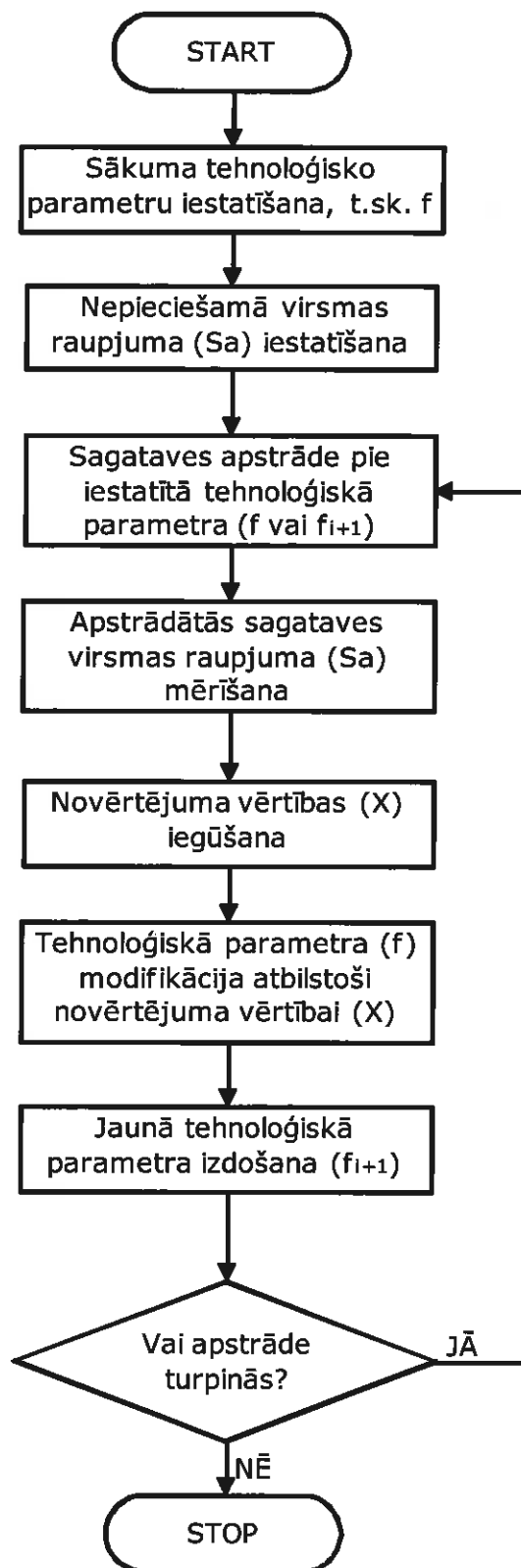
(iii) iegūto virsmas raupjuma Sa vērtību pārsūtīšanu uz FCL kontrolleri un to novērtēšanu jeb novērtējuma vērtības X iegūšanu attiecībā pret iestatītajiem faziloģikas likumiem;

(iv) virsmas raupjuma Sa novērtējuma vērtību X un iestatītā tehnoloģiskā parametra f vērtības salīdzināšanu un to novērtēšanu FCL kontrollerī;

(v) jaunas tehnoloģiskā parametra f_{i+1} vērtības izdošanu uz ciparvadības apstrādes centra vadības bloku, pamatojoties uz FCL kontrollerī esošajiem faziloģikas likumiem un solī (iv) izpildītā novērtējuma;

(vi) sagataves apstrāde atbilstoši solim (i) tikai jau ar jauno solī (vi) izdoto un iestatīto tehnoloģiskā parametra f_{i+1} vērtību;

(vii) apstrādes cikliska atkārtošāns no soļa



6.4. att. Adaptīvās vadības algoritms

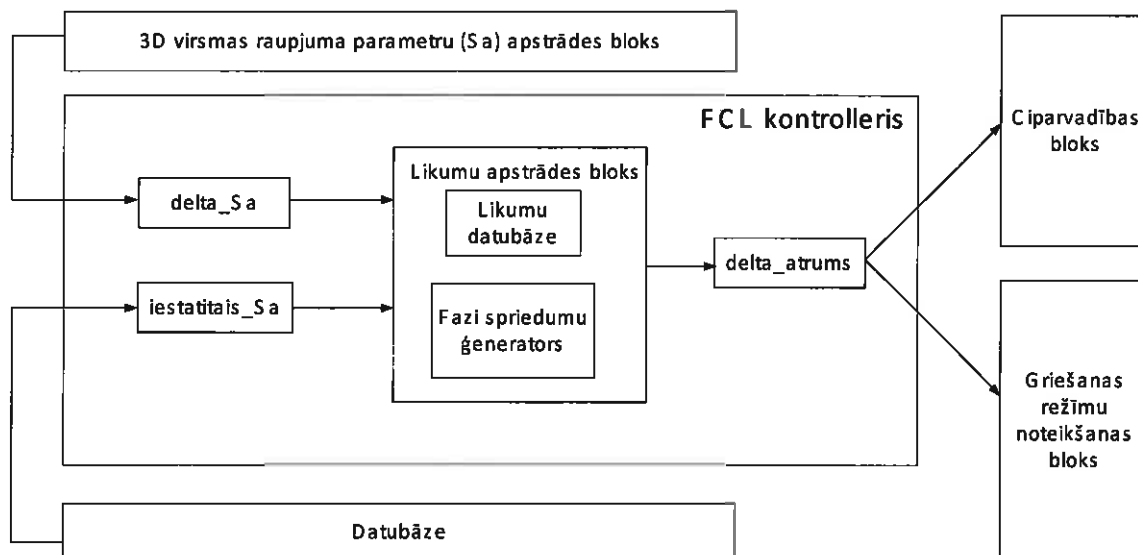
(i) līdz solim (vii).

Bez tam solis (iii) ietver novērtējuma vērtības X iegūšanu, izejot no iestatītajām faziloģikas likumu kopām. Minētais solis tiek realizēts FCL kontrollerī.

Uz doto paņēmieni un iekārtu ir iegūts Latvijas patents Nr. 14015B „Iekārta un paņemiens apstrādes adaptīvai vadībai”.

6.2. Izstrādātās adaptīvās vadības sistēmas simulācija

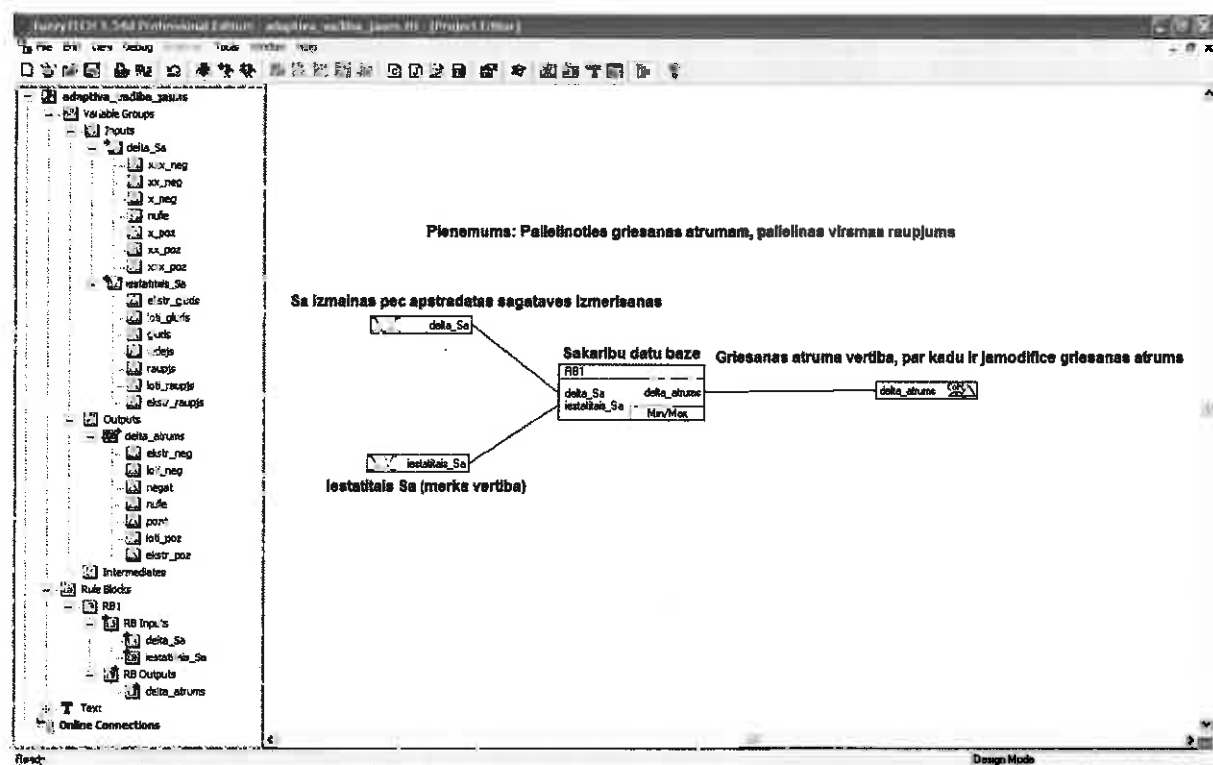
Ņemot vērā iepriekš aprakstīto algoritmu, tika veikta faziloģikas adaptīvās vadības eksperimentāla izstrāde un tās simulācija. Simulācija dod iespēju pārliecināties par izstrādātās sistēmas pareizību un novērtēt tās darbību. Minētā simulācija tika realizēta FuzzyTECH Professional programmā. Kā simulācijas nosacījumi tika izvēlēta griešanas ātruma v adaptīvā vadība atkarībā no virsmas raupjuma Sa izmaiņām. Tika pieņemts apgalvojums, ka šajā gadījumā palielinot griešanas ātrumu v palielinās arī virsmas raupjums Sa . Reālos apstākļos šādi apgalvojumus definē iepriekšējā pieredze minētā materiāla apstrādē vai apstrādei izstrādātais konkrētais regresijas un/vai faziloģikas prognozēšanas modelis.



6.5. att. FCL kontrollera funkcionālā blokshēma

Pirmkārt, ir nepieciešams definēt fazi ieejas vērtības vai vērtības, kas tiks fazificētas. Par ieejas vērtībām tika izvēlētas: 3D virsmas raupjuma iestatītā vērtība *iestatītais_Sa* un 3D virsmas raupjuma starpība *delta_Sa* (skatīt 6.5. att.). *iestatītais_Sa* ir ieejas vērtība, ko ievada darba operators, norādot virsmas raupjumu, pie kāda ir jāapstrādā sagataves. *delta_Sa* norāda starpību starp norādīto virsmas raupjumu un izmērīto virsmas raupjumu.

Otrkārt, definē izejas vērtību, kas šajā gadījumā ir griešanas ātrums *delta_atrums*. Minētai izejas vērtībai ir jānorāda par cik ir jāsamazina vai jāpalielina griešanas ātrums, lai sasniegtu vēlamu virsmas raupjumu. Tikpat labi, kā izejas vērtība var tikt definēts jebkurš cits griešanas režīmu parametrs. Viss atkarīgs no apstrādes procesa modeļa un tajā ietvertajām savstarpējām sakarībām. Piemēram, ja apstrādes prognozēšanas modelī ir definētas virsmas raupjuma izmaiņas attiecībā pret padevi *f*, tad attiecīgi kā izejas vērtību var iestatīt padevi *f*. Treškārt, ir jādefinē likums apstrādes blokā, konkrēti likumu datubāzē, ievadāmie likumi. Minēti likumi ir izveidojami, balstoties uz konkrētās apstrādes prognozēšanas modeli.



6.6. att. Adaptīvās vadības fazioloģikas vadības bloka (FCL kontrolleris) simulācija FuzzyTECH vidē

6.6. att. ir parādīta fazioloģikas vadības bloks, kur kā ieejas vērtības tiek definētas tehnologa iestatītais virsmas raupjums *iestatitais_Sa* un virsmas raupjuma delta vērtība *delta_Sa*. *Iestatitais_Sa* uzrāda to vērtību, kādu ir iestatījis tehnologs un kāda ir mērķa vērtība, pie kuras ir jāpieturas adaptīvās vadības sistēmai, lai sasniegtu vēlamu virsmas raupjumu. Virsmas raupjuma delta jeb starpības vērtība *delta_Sa* norāda par cik ir izmainījusies virsmas raupjuma vērtība kopš iepriekšējiem virsmas raupjuma mērījumiem. Abu ieejas vērtību fazi piederības funkciju kopas ir attēlotas 6.7. att.

Zemāk ir dotas δ_{Sa} piederības funkcijas:

$$A_{xxx_neg}(\delta_{Sa}) = \begin{cases} 1, \text{ kad } \delta_{Sa} \leq -1,6 \\ (-0,8 - \delta_{Sa})/0,8, \text{ kad } -1,6 < \delta_{Sa} < -0,8 \\ 0, \text{ kad } \delta_{Sa} \geq -0,8 \end{cases} \quad (6.1)$$

$$A_{xx_neg}(\delta_{Sa}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{Sa} \leq -1,6 \text{ vai } \geq -0,4 \\ (\delta_{Sa} - (-1,6))/0,8, \text{ kad } -1,6 < \delta_{Sa} < -0,8 \\ (-0,4 - \delta_{Sa})/0,4, \text{ kad } -0,8 < \delta_{Sa} < -0,4 \\ 1, \text{ kad } \delta_{Sa} = -0,8 \end{cases} \quad (6.2)$$

$$A_{x_neg}(\delta_{Sa}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{Sa} \leq -0,8 \text{ vai } \geq 0 \\ (\delta_{Sa} - (-0,8))/0,4, \text{ kad } -0,8 < \delta_{Sa} < -0,4 \\ (0 - \delta_{Sa})/0,4, \text{ kad } -0,4 < \delta_{Sa} < 0 \\ 1, \text{ kad } \delta_{Sa} = -0,4 \end{cases} \quad (6.3)$$

$$A_{nulle}(\delta_{Sa}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{Sa} \leq -0,4 \text{ vai } \geq 0,4 \\ (\delta_{Sa} - (-0,4))/0,4, \text{ kad } -0,4 < \delta_{Sa} < 0 \\ (0,4 - \delta_{Sa})/0,4, \text{ kad } 0 < \delta_{Sa} < 0,4 \\ 1, \text{ kad } \delta_{Sa} = 0 \end{cases} \quad (6.4)$$

$$A_{x_poz}(\delta_{Sa}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{Sa} \leq 0 \text{ vai } \geq 0,8 \\ (\delta_{Sa} - 0)/0,4, \text{ kad } 0 < \delta_{Sa} < 0,4 \\ (0,8 - \delta_{Sa})/0,4, \text{ kad } 0,4 < \delta_{Sa} < 0,8 \\ 1, \text{ kad } \delta_{Sa} = 0,4 \end{cases} \quad (6.5)$$

$$A_{xx_poz}(\delta_{Sa}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{Sa} \leq 0,4 \text{ vai } \geq 1,6 \\ (\delta_{Sa} - 0,4)/0,4, \text{ kad } 0,4 < \delta_{Sa} < 0,8 \\ (1,6 - \delta_{Sa})/0,8, \text{ kad } 0,8 < \delta_{Sa} < 1,6 \\ 1, \text{ kad } \delta_{Sa} = 0,8 \end{cases} \quad (6.6)$$

$$A_{xxx_poz}(\delta_{Sa}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{Sa} \leq 0,8 \\ (\delta_{Sa} - 0,8)/0,8, \text{ kad } 0,8 < \delta_{Sa} < 1,6 \\ 1, \text{ kad } \delta_{Sa} \geq 1,6 \end{cases} \quad (6.7)$$

Kā izejas vērtība tiek norādīta nepieciešamā ātruma izmaiņas vērtība δ_{atrums} . Minētā izejas vērtība δ_{atrums} norāda par cik ir nepieciešams palielināt vai samazināt griešanas ātrumu v , lai tiktu nodrošināts nepieciešamais virsmas raupjums $i_{estatitais_Sa}$.

Ieejas un izejas vērtību skaitliskā forma tiek pārveidota fazi piederības funkcijās, kā aprakstīts 4. nodaļā. 6.7. att. ir attēlotas griešanas ātruma *delta_atrums* piederības funkciju kopa.

Zemāk ir parādītas *iestatitais_Sa* piederības funkcijas:

$$A_{ekstra_gluds}(iestatitais_Sa) = \begin{cases} 1, & \text{kad } iestatitais_Sa \leq 0,4 \\ (0,8 - iestatitais_Sa)/0,4, & \text{kad } 0,4 < iestatitais_Sa < 0,8 \\ 0, & \text{kad } iestatitais_Sa \geq 0,8 \end{cases} \quad (6.8)$$

$$A_{lotti_gluds}(iestatitais_Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } iestatitais_Sa \leq 0,4 \text{ vai } \geq 1,6 \\ (iestatitais_Sa - 0,4)/0,4, & \text{kad } 0,4 < iestatitais_Sa < 0,8 \\ (1,6 - iestatitais_Sa)/0,8, & \text{kad } 0,8 < iestatitais_Sa < 1,6 \\ 1, & \text{kad } iestatitais_Sa = 0,8 \end{cases} \quad (6.9)$$

$$A_{gluds}(iestatitais_Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } iestatitais_Sa \leq 0,8 \text{ vai } \geq 2,5 \\ (iestatitais_Sa - 0,8)/0,8, & \text{kad } 0,8 < iestatitais_Sa < 1,6 \\ (2,5 - iestatitais_Sa)/0,9, & \text{kad } 1,6 < iestatitais_Sa < 2,5 \\ 1, & \text{kad } iestatitais_Sa = 1,6 \end{cases} \quad (6.10)$$

$$A_{videjs}(iestatitais_Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } iestatitais_Sa \leq 1,6 \text{ vai } \geq 3,2 \\ (iestatitais_Sa - 1,6)/0,9, & \text{kad } 1,6 < iestatitais_Sa < 2,5 \\ (3,2 - iestatitais_Sa)/0,7, & \text{kad } 2,5 < iestatitais_Sa < 3,2 \\ 1, & \text{kad } iestatitais_Sa = 2,5 \end{cases} \quad (6.11)$$

$$A_{raupjs}(iestatitais_Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } iestatitais_Sa \leq 2,5 \text{ vai } \geq 4,5 \\ (iestatitais_Sa - 2,5)/0,7, & \text{kad } 2,5 < iestatitais_Sa < 3,2 \\ (4,5 - iestatitais_Sa)/1,3, & \text{kad } 3,2 < iestatitais_Sa < 4,5 \\ 1, & \text{kad } iestatitais_Sa = 3,2 \end{cases} \quad (6.12)$$

$$A_{lotti_raupjs}(iestatitais_Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } iestatitais_Sa \leq 3,2 \text{ vai } \geq 6,3 \\ (iestatitais_Sa - 3,2)/1,3, & \text{kad } 3,2 < iestatitais_Sa < 4,5 \\ (6,3 - iestatitais_Sa)/2,8, & \text{kad } 4,5 < iestatitais_Sa < 6,3 \\ 1, & \text{kad } iestatitais_Sa = 4,5 \end{cases} \quad (6.13)$$

$$A_{ekstr_raupjs}(iestatitais_Sa) = \begin{cases} 0, & \text{kad } iestatitais_Sa \leq 4,5 \\ (iestatitais_Sa - 4,5)/2,8, & \text{kad } 4,5 < iestatitais_Sa < 6,3 \\ 1, & \text{kad } iestatitais_Sa \geq 6,3 \end{cases} \quad (6.14)$$

Zemāk ir parādītas *delta_atrums* piederības funkcijas:

$$A_{ekstr_neg}(delta_atrums) = \begin{cases} 0, & \text{kad } delta_atrums \leq -20 \text{ vai } \geq -10 \\ (delta_atrums - (-20))/5, & \text{kad } -20 < delta_atrums < -15 \\ (-10 - delta_atrums)/5, & \text{kad } -15 < delta_atrums < -10 \\ 1, & \text{kad } delta_atrums = -15 \end{cases} \quad (6.15)$$

$$A_{loti_neg}(\delta_{atrums}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{atrums} \leq -15 \text{ vai } \geq -5 \\ (\delta_{atrums} - (-15))/5, \text{ kad } -15 < \delta_{atrums} < -10 \\ (-5 - \delta_{atrums})/5, \text{ kad } -10 < \delta_{atrums} < -5 \\ 1, \text{ kad } \delta_{atrums} = -10 \end{cases} \quad (6.16)$$

$$A_{negat}(\delta_{atrums}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{atrums} \leq -10 \text{ vai } \geq 0 \\ (\delta_{atrums} - (-10))/5, \text{ kad } -10 < \delta_{atrums} < -5 \\ (0 - \delta_{atrums})/5, \text{ kad } -5 < \delta_{atrums} < 0 \\ 1, \text{ kad } \delta_{atrums} = -5 \end{cases} \quad (6.17)$$

$$A_{nulle}(\delta_{atrums}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{atrums} \leq -5 \text{ vai } \geq 5 \\ (\delta_{atrums} - (-5))/5, \text{ kad } -5 < \delta_{atrums} < 0 \\ (5 - \delta_{atrums})/5, \text{ kad } 0 < \delta_{atrums} < 5 \\ 1, \text{ kad } \delta_{atrums} = 0 \end{cases} \quad (6.18)$$

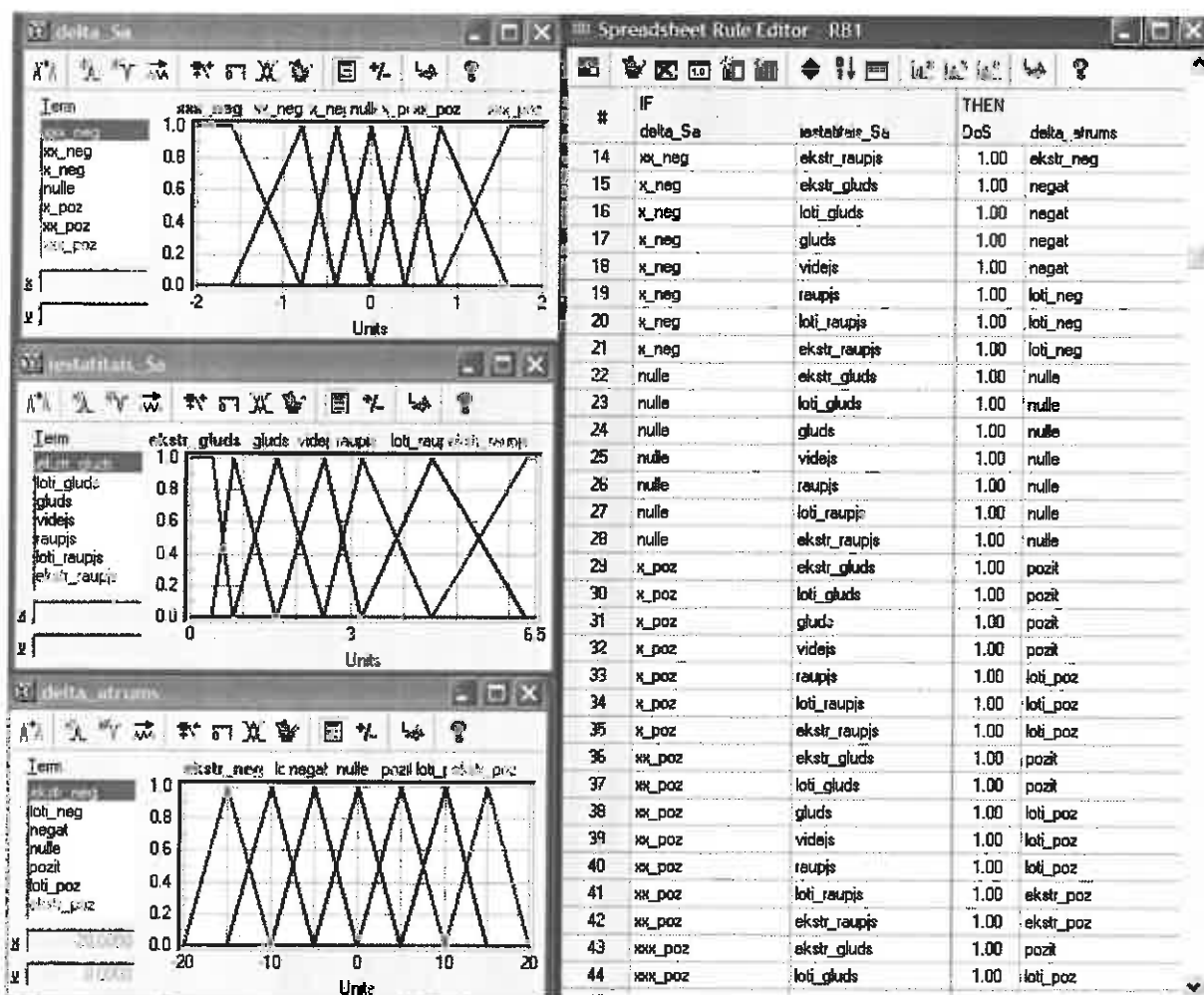
$$A_{pozit}(\delta_{atrums}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{atrums} \leq 0 \text{ vai } \geq 10 \\ (\delta_{atrums} - 0)/5, \text{ kad } 0 < \delta_{atrums} < 5 \\ (10 - \delta_{atrums})/5, \text{ kad } 5 < \delta_{atrums} < 10 \\ 1, \text{ kad } \delta_{atrums} = 5 \end{cases} \quad (6.19)$$

$$A_{loti_poz}(\delta_{atrums}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{atrums} \leq 5 \text{ vai } \geq 15 \\ (\delta_{atrums} - 5)/5, \text{ kad } 5 < \delta_{atrums} < 10 \\ (15 - \delta_{atrums})/5, \text{ kad } 10 < \delta_{atrums} < 15 \\ 1, \text{ kad } \delta_{atrums} = 10 \end{cases} \quad (6.20)$$

$$A_{ekstr_poz}(\delta_{atrums}) = \begin{cases} 0, \text{ kad } \delta_{atrums} \leq 10 \text{ vai } \geq 20 \\ (\delta_{atrums} - 10)/5, \text{ kad } 10 < \delta_{atrums} < 15 \\ (20 - \delta_{atrums})/5, \text{ kad } 15 < \delta_{atrums} < 20 \\ 1, \text{ kad } \delta_{atrums} = 15 \end{cases} \quad (6.21)$$

Ieejas un izejas vērtības savieno ar likumu jeb sakarību bloku, kurā ir ievadītas sakarības starp ieejas vērtībā un izejas vērtībām. Minētā sakarību datu bāze ir ilustrēta 6.7. att. šajā datu bāzē tiek norādītas sakarības, kādas valda starp ieejas vērtībām *iestatitais_Sa* un *delta_Sa* un izejas vērtību *delta_atrums*. Sakarības datu bāzē ievada sistēmas veidotājs, vadoties no zināmiem virsmas apstrādes prognozēšanas modeļiem. Šis ir sistēmas viskritiskākais punkts un no tās pareizības ir atkarīga adaptīvās vadības sistēmas darbība. Ja nepareizi tiek interpretēts virsmas raupjuma prognozēšanas modelis un tiek ievadītās neatbilstošas sakarības, tad pati adaptīvās vadības sistēma strādās kļūdaini. Viens no veidiem kā minimizēt sakarību datu bāzes kritisko ietekmi uz adaptīvās sistēmas vadību ir veidot zināšanu datu bāzi, kura uzkrāj datus par veidojošos virsmas raupjumu pie noteiktiem apstrādes procesiem un to izmaiņu, mainot tehnoloģiskos parametrus. Vēlāk

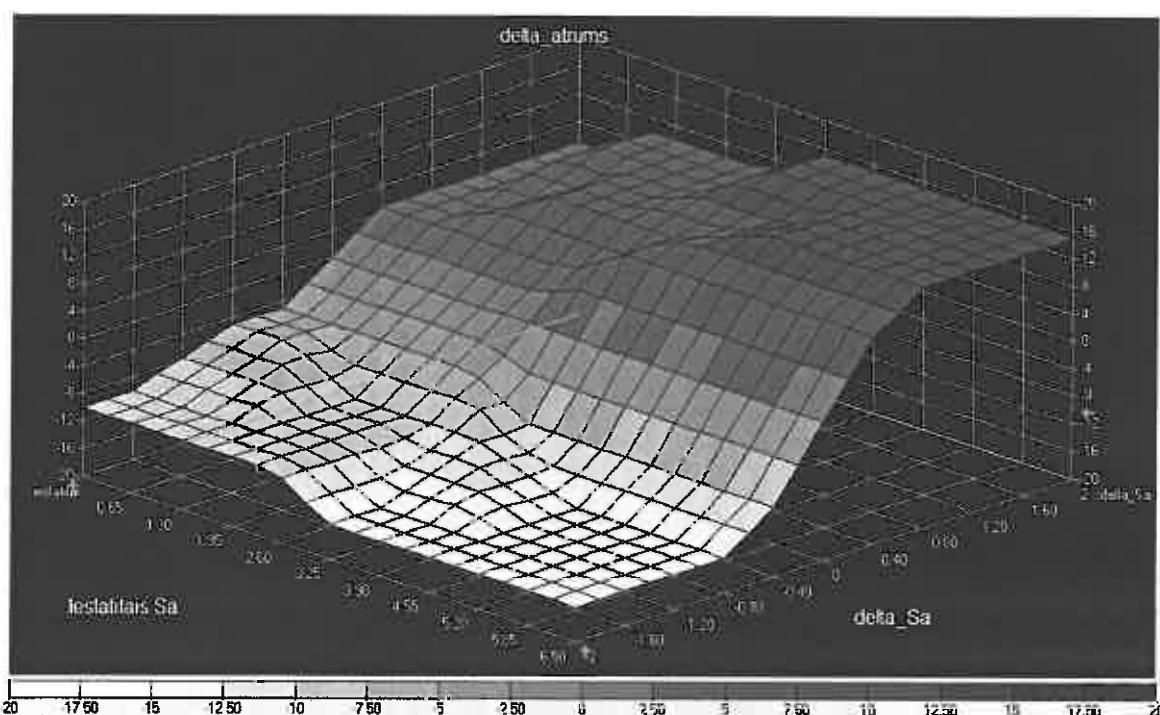
zināšanu datu bāzes dati var tikt izmantoti sakarību datu bāzes uzlabošanā, izveidojot daudz precīzāku apstrādes adaptīvās vadības sistēmu.



6.7. att. Fazi sistēmas ieejas un izejas vērtību piederību funkciju kopu grafiskais attēlojums un sakarību datu bāze

Konkrētajā simulācijas piemērā tika pieņemts, ka ieejas vērtība *delta_Sa* sastāvēs no 7 piederības funkcijā. Viena piederības funkcija būs uz nulles vērtības, kas vada sistēmu, ja nav novērotas izmaiņas virsmas raupjuma parametros. Uz katru pusi – negatīvo (virsmas raupjuma samazinājums) un pozitīvo (virsmas raupjuma palielinājums) – iziet trīs piederības funkcijas. Iestatītā virsmas raupjuma ieejas vērtības *iestatitais_Sa* tika definētas ar septiņām piederības funkcijām. Katra piederības funkcija raksturo noteiktu virsmas raupjuma vērtību. Šī ieejas vērtība ir nepieciešama, lai definētu virsmas raupjuma vērtību pēc noklusējuma, kā arī lai norādītu cik svarīga ir virsmas raupjuma maiņa pie noteiktās virsmas raupjuma vērtības. 6.7. att. ir redzams, ka palielinoties iestatītajam virsmas raupjumam, tā piederības funkcijai vairs nav tik stāvas sānu malas, kā mazu virsmas raupjumu piederības funkciju gadījumā. Tas tika veidots ar nolūku, jo pie liela virsmas

raupjuma nav tik kritiska virsmas raupjuma un attiecīgi tehnoloģisko parametru vadība kā pie maza raupjuma. Praksē ir zināms, ka detaļām ar mazu virsmas raupjumu, piemēram $Sa = 0,4 \mu\text{m}$, šī vērtība ir daudz kritiskāka nekā detaļām ar lielu virsmas raupjumu, piemēram $Sa = 6,3 \mu\text{m}$. Tāpēc mazu iestatīto virsmas raupjuma vērtību gadījumā virsmas raupjuma izmaiņām ir nepieciešama daudz aktīvāka tehnoloģisko parametru maiņa nekā lielu virsmas raupjuma parametru gadījumā. Izejas vērtība, kas šajā gadījumā ir griešanas ātruma izmaiņas, tika veidota no 7 piederības funkcijām. Kur viena funkcija ir nulles funkcija, bet pārējās sešas ir sadalītas pa trim, kur katras trīs raksturo ātruma izmaiņu pozitīvā (palielināt ātrumu) un negatīvā (samazināt ātrumu) virzienā. Izdots *delta_atrums* tiek summēts ar iestatīto ātrumu, tādējādi iestatot sistēmā jauno griešanas ātrumu v , ar kuru turpmāk tiks apstrādātas sagataves. Minēto vērtību piederības funkciju grafiskais attēlojums ir aplūkojams 6.8. att.



6.8. att. Trīsdimensionāls grafiks. Parāda sakarību starp iestatīto 3D virsmas raupjumu Sa , 3D virsmas raupjuma δSa izmaiņām un griešanas ātruma δa_{trums} izmaiņām

Kā nākamais solis pēc faziloģikas sistēmas elementu izstrādes ir programmas izveidošana, kas ir saprotama FCL kontrollerim. Par programmas izveidošanu, kuras pamatā darbojas FCL kontrolleris, lasīt 4. nodaļā. Kad programma ir izveidota, tad to augšupielādē adaptīvās vadības sistēmas FCL kontrollerī un sistēma ir gatava darbam, lai adaptīvi vadītu tehnoloģiskos parametrus atkarībā no iestatītā virsmas raupjuma un virsmas raupjuma parametra izmaiņām. Šajā darbā minētā simulācijas rezultātā tika izstrādāta

fazilōģikas sistēma, kas var vadīt griešanas ātrumu v atkarībā no virsmas raupjuma S_a izmaiņām. Minētās adaptīvās apstrādes sistēmas FCL kontrolera programma griešanas ātruma v adaptīvai vadībai ir aplūkojama 2. pielikumā.

Ņemot vērā apstrādes adaptīvās vadības sistēmas novitāti, rūpniecisko pielietojumu un izgudrojuma līmeni, LR Patentu valdē tika iesniegts patenta pieteikums uz izgudrojuma objektu „Iekārta un paņēmiens 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, savukārt izgudrotāji ir Artis Kromanis un Juris Krizbergs.

Nodaļas ietvaros veikto darbu pamatā var izdarīt sekojošus secinājumus:

- 1) Zināmā tehnikas līmeņa analīzes rezultātā par adaptīvās vadības izstrādi ir izdarīti secinājumi, ka rūpniecības vajadzībām nepieciešams izveidot apstrādes adaptīvas vadības paņēmienus un palīgierīces adaptīvās vadības nodrošināšanai;
- 2) Izstrādāts apstrādes adaptīvās vadības koncepts par pamatu ņemot fazilōģiku un ar tās palīdzību iegūtos virsmas raupjuma prognozēšanas modeļus;
- 3) Pierādīts, ka fazilōģikas instrumentus var izmantot nepieciešamā virsmas raupjuma nodrošināšanai adaptīvi vadot tehnoloģiskos parametrus.

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 teoriju var veiksmīgi pielietot 3D virsmas raupjuma tehnoloģiskā nodrošinājuma uzdevumu realizācijai.
3. Izstrādāti 3D virsmas raupjuma prognozēšanas modeļi gala frēzēšanai un virpošanai dod iespēju technologam 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.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Agarwal S., Venkateswara Rao P. *A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding// International Journal of Machine Tools & Manufacture.* – 2005. – Volume 45(6) – pp. 609-616.
2. Aggarwal A., Singh H. *Optimization of machining techniques – A retrospective and literature review// Sadhana.* – 2005. – Volume 30, Part 6 – pp. 699-711.
3. Ali Y.M., Zhang L.C. *Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach// Journal of Materials Processing Technology.* – 1999. – Volume 89-90 – pp. 561-568.
4. 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.
5. Bagci E., Aykut S. *A study of Taguchi optimization method for identifying optimum surface roughness in CNC face milling of cobalt-based alloy (satellite 6)// International Journal of Advanced Manufacturing Technologies.* – 2005. – Volume 29 – pp. 940-947
6. Bajic D., Lela B., Cukor G. *Examination and modelling of the influence of cutting parameters on the cutting force and the surface roughness in longitudinal turning// Journal of Mechanical Engineering.* – 2008. – Volume 54. – pp. 322-333.
7. Behrens A., Ginzl J. *Neuro-fuzzy process control system for sinking EDM// Journal of Manufacturing Processes.* – 2003. – Volume 5, Number 1 – pp. 33-39.
8. Bigerelle M., Najjar A., Iost A. *Relevance of roughness parameters for describing and modeling machined surfaces// Journal of Material Science.* – 2003. – Volume 38 – pp. 2525-2536.
9. Birkmann S., Bodschwinna H., Lemke H.W. *Assessing roughness in three-dimension using Gaussian filtering// Journal of Machine Tools & Manufacture.* – 2001. – Volume 41 – pp. 2153-2162.
10. Blateyron F. *Special issue: The new 3D standard ISO 25178 in mountains version 5// Surface Newsletter.* – 2007. – Autumn/Winter 2007/2008 – 4 p.

11. *Brinksmeier E., Toenshoff H.K., Czsenkusch C. etc. Modelling and optimization of grinding processes// Journal of Intelligent Manufacturing. – 1997. – Volume 9, Number 4 – pp. 303-314.*
12. *Bruno H. Procède de commande d'une machine d'usinage et dispositif pour sa mise ne oeuvre. Patent No. FR 2722719. – 1996. – 20 p.*
13. *Chakrabarti S., Paul S. Numerical modelling of surface topography in superabrasive grinding// International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. – 2007. – Volume 32 – pp. 1115-1124.*
14. *Chen J.C., Savage M.D. Multiple regression-based multilevel in-process surface roughness recognition system in milling operations// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2004. – Volume 41 (1) – pp. 58-67.*
15. *Ching-Kao C. The optimal cutting-parameter selection of heavy cutting process in side milling for SUS304 stainless steel// International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. – 2007. – Volume 34 – pp. 440-447.*
16. *Cus F., Zuperl U., Kiker E. A model-based system for the dynamic adjustment of cutting parameters during a milling process// Journal of Mechanical Engineering. – 2007. – Volume 53 – pp. 524-540.*
17. *Cus F., Zuperl U. Model reference adaptive force and surface roughness control in milling// Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – Volume 26 – pp. 179-182.*
18. *Davis E.J., Sullivan P.J., Stout K.J. The application of 3D topography to engine bore surfaces// Surface Topography. – 1988. – Volume 1, Number 2 – pp. 229-251.*
19. *Doniavi A., Eskandarzade M., Tahmasebian M. Empirical modeling of surface roughness in turning process of 1060 steel using factorial design methodology// Journal of Applied Sciences. – 2007. – Volume 7 – pp. 2509-2513.*
20. *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.*
21. *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.*

22. Feng C.-X., Wang X.-F. *Surface roughness predictive modeling: neural networks versus regression// IIE Transactions on Design and Manufacturing.* – 2003. – Volume 35 – pp. 11-27.
23. Fredj N.B., Amamou R. *Ground surface roughness prediction based upon experimental design and neural network models// International Journal of Advanced Manufacturing Technologies.* – 2006. – Volume 31 – pp. 24-36.
24. Fuller R. *Neural fuzzy systems.* – Abo: Abo Akademi University, 1995. – 249 p.
25. Gerla G. *Fuzzy logic programming and Fuzzy control// Studia Logica.* – 2005. – Volume 79 – pp. 231-254.
26. Gokkaya H., Taskesen A. *The effects of cutting speed and feed rate on burr formation, cutting forces and surface roughness when machining Aa6351 (T6) Alloy// Journal of Mechanical Engineering.* – 2008. – Volume 54 – pp. 521-530.
27. Griffiths B. *Manufacturing surface technology: surface integrity & functional performance.* – NY: Taylor & Francis, 2001. – 237 p.
28. Habeeb H.H., Abou-El-Hossein K.A., Mohamad B. etc. *Investigation of tool wear, tool life and surface roughness when machining of Nickel Alloy 242 with using of different cutting tools// Asian Journal of Scientific Research.* – 2008. – Volume 1(3) – pp. 222-230.
29. Haber-Guerra R.E., Haber-Haber R., Andres D.M. etc. *Networked fuzzy control system for a high-performance drilling process// Journal of Manufacturing Science and Engineering.* – 2008. – Volume 130, Number 3 – pp. 1-6.
30. Helmi A.Y., El-Hofy H. *Machining technology – Machine tools and operations.* – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 672 p.
31. Jaanson A. *A new approach to mathematical modelling of metal cutting process characteristics// Proceedings of 5th International DAAAM Baltic Conference.* – 2006. – pp. 133-138.
32. 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.
33. Jiang X., Blunt L., Stout K.J. *Development of a lifting wavelet representation for surface characterization// Proc. R. Sco. Lond. A.* – 2000. – Number 456 – pp. 1-31.

34. *Kadirgama 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.*
35. *Kalpakjian S., Schmidt S.R. Manufacturing processes for engineering material. – NY: Pearson Education Inc., 2003. – 780 p.*
36. *Karjust K., Papstel J., Pohlak M. Knowledge based system of the surface finishing process// 4th International DAAAM Conference "Industrial Engineering Innovation As Competitive Edge for SME" – Tallinn: Estonia, April 29-30 2004. – pp. 128–130.*
37. *Kasabov N.K. Foundations of neural networks, fuzzy systems ang knowledge engineering. – Cambridge: A Bradford Book. The MIT Press, 1998. – 550 p.*
38. *Kasirovalad Z., Jahed Motlagh M.R., Shadmani M.A. An intelligent modeling system to improve the machining process quality in CNC machine tools using adaptive fuzzy Petri nets// International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. – 2006. – Volume 29 – pp. 1050-1061.*
39. *Kiha L., Dornfeld D.A. A study of surface roughness in the micro-end-milling process. Consortium on Deburring and Edge Finishing. – California: University of California, 2004. – 9 p.*
40. *Kirby E.D., Chen J.C., Zhang J.Z. Development of a fuzzy-nets-based in-process surface roughness adaptive control system in turning operations// Expert systems with applications. – 2006. – Volume 30 – pp. 592-604.*
41. *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.*
42. *Koren Y. Computer Control of Manufacturing Systems. – Singapore: McGraw-Hill, 1983. – 287 p.*
43. *Korkut I., Boy M. Experimental examination of main cutting force and surface roughness depending on cutting parameters// Journal of Mechanical Engineering. – 2008. – Volume 54 – pp. 531-538.*

44. *Kosters H. Process and arrangement for selectively obtaining suitable values for the continuous localized monitoring of the surface parameters. Patent No. DE 4333830. – 1995. – 20 p.*
45. *Lorencs A. Statistisku datu ieguve un analīze. – Rīga: LU, 2003. – 60 lpp.*
46. *Lou M.S., Chen J.C., Li C.M. Surface roughness prediction technique for CNC end-milling// Journal of Industrial Technology. – 1999. – Volume 15, Number 1 – pp. 1-6.*
47. *Maksoud T.M.A., Atia M.R. Machining Science and Technology// An International Journal of Machining Science and Technology. – 2004. – Volume 8, Number 2 – pp. 263-276.*
48. *Malkin S., Guo C. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. Second edition. – NY: Industrial Press Inc., 2008. – 372 p.*
49. *Montgomery D., Altintas Y. Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling// ASME J. Eng. Ind. – 1991. – Volume 113 – pp. 160-168.*
50. *More A.S., Jiang W., Brown W.D. etc. Tool wear and machining performance of cBN-TiN coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel// Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Volume 180 – pp. 253-262.*
51. *Nacsa J. Intelligent open CNC system based on the knowledge server concept// Digital Enterprise Challenges. – Budapest: IFIP Prolamat, November 7-10, 2001. – pp. 360-368.*
52. *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.*
53. *Nandi A.K. Prediction of Surface Roughness in Ultraprecision Turning Using Fuzzy logic// 3rd Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology. – Zittau, Germany, September 10-12, 2003., pp. 408-413.*
54. *Necdet O., Ozlem A.K. Modelling of surface roughness in machining //Yonetim Ekim. – 2009. – Yil 20, Sayi 64 – pp. 27-40.*
55. *Nemoto K., Yanagi K., Aketagawa M. etc. Development of a roughness measurement Standard with irregular surface topography for improving 3D*

- surface texture measurement// Measurement Science and Technology. – 2009. – Volume 20, Number 8 – pp. 1-7.*
56. *Niwa T. Device and corresponding method for determining a fuzzy logic conclusion based on a plurality of machining rules. Patent No. US 5598521. – 1997. – 34 p.*
 57. *Olsen D. Fuzzy Logic control in autonomous robotics: Investigation the Motorola MC68HC12 on a line following robot// Conference on Undergraduate Research. – Salt Lake city: University of Utah, March 13-15, 2003. – pp. 1-9.*
 58. *Onwubolu G.C. A note on “Surface roughness prediction model in machining of carbon steel by PVD coated cutting tools”// American Journal of Applied Sciences. – 2005. – Volume 2 (6) – pp. 1109-1112.*
 59. *Ozcelik B., Oktem H., Kurtaran H. Optimum surface roughness in end milling Inconel 718 by coupling neural network model and genetic algorithm// International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. – 2005. – Volume 27 – pp. 234-241.*
 60. *Ozel T., Karpat Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks// International Journal of machine and Tools & Manufacture. – 2004. – Volume 45 – pp. 467-479.*
 61. *Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy control. – California: Addison-Wesley – 1997. – 629 p.*
 62. *Pavel R., Sinram K., Combs D. etc. Surface quality and tool wear in interrupted hard turning of 1137 steel shafts. – Technical Resource Park, Ottawa Lake: Dana Company, MIME Department, Advanced Technology Resource Group, 2003. – 6 p.*
 63. *Radovanovic M. Determination of theoretical roughness profile height by peripheral milling// Technologies in machine building. – 2002. – Volume 5 – pp. 32-35.*
 64. *Reddy B.S., Kumar J.S. etc. Prediction of surface roughness in turning using adaptive neuro-fuzzy interference system// Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2009. – Volume 4 – pp. 252–259.*
 65. *Reddy N.S.K., Venkateswara Rao P. Selection of an optimal parametric combination for achieving a better surface finish in dry milling using genetic*

- algorithms// *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies.* – 2006. – Volume 28 – pp. 463.-473.
66. Reddy N.S.K., Venkateswara Rao P. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling// *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies.* – 2005. – Volume 26 – pp. 1202-1210.
 67. Reidenbach F. *ASM handbook Volume 5: Surface Engineering.* – NY: American Society for Metals, 1994. – 1056 p.
 68. Robert B. Aronson *Surface Finish is Key to Quality*// *Manufacturing Engineering.* – 2001. – Volume 127, Number 2 – pp. 1-6.
 69. Sahin Y., Kok M., Celik H. Tool wear and surface roughness of Al₂O₃ particle-reinforced aluminium alloy composites// *Journal of Materials Processing Technology.* – 2002. – Volume 128 – pp. 280-291.
 70. Sahin Y., Motorcu A.R. Surface roughness prediction model in machining of carbon steel by PVD coated cutting tools// *American Journal of Applied Sciences.* – 2004. – Volume 1 (1) – pp. 12-17.
 71. Sakakura M., Hotta T., Abeta S. Method and apparatus for grinding a workpiece. Patent No. US 5679053. – 1997. – 26 p.
 72. Samhoury M.S., Surgenor B.W. Surface roughness in grinding: on-line prediction with adaptive neuro-fuzzy inference system// *Transactions of NAMRI/SME.* – 2005. – Volume 33 – pp. 57-64.
 73. Savage M.D., Chen J.C. Effects of tool diameter variations in on-line surface roughness recognition system// *Journal of Industrial Technology.* – 1999. – Volume 15, Number 4 – pp. 1-7.
 74. Singh D., Venkateswara Rao P. A surface roughness prediction model for hard turning process// *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies.* – 2007. – Volume 32 – pp. 1115-1124.
 75. Smith E.H. *Mechanical Engineers Reference Book. 12 Ed (repost).* – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000 – 1248 p.
 76. Stachowiak G.W., Batchelor A.W. *Engineering tribology.* – B.V The Netherlands: Elseviere science publishers, 1993 – 901 p.
 77. Stout K.J., Blunt L. *Three-dimensional Surface Topography.* – London: Penton Press, 2000. – 286 p.

78. Stout K.J., Sullivan P.J., Dong W.P. etc. *Analysis of 3-D surface topography questionnaire// Interim Report of EC Contract No. 3374/1/0/170/90/2, University of Birmingham – September 1991.*
79. Stout K.J., Sullivan P.J. *The analysis of the three-dimensional topography of the grinding process// Annals of the CIRP. – 1989. – Volume 39 – pp. 545-548.*
80. 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.*
81. Suresh P.V.S., Venkateswara Rao P., Deshmukh S.G. *A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model// International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2002. – Volume 42 – pp. 675-680.*
82. Szalay T., Alpek F., Monostori L. etc. *Investigation of machined surfaces using artificial intelligence methods// International Conference on Machining Tools. – Miskolc: Miskolc University Press, 1996. – pp. 635-640.*
83. Tabenkin A. *Surface Finish: A Machinist's Tool. A Design Necessity// Modern Machine Shop. – March 1999. – 4 p.*
84. Taskin Y., Hacioglu Y., Yagiz N. *The use of fuzzy-logic to improve the ride comfort of vehicles// Journal of Mechanical Engineering. – 2007. – Volume 53 – pp. 233-240.*
85. Thamma R. *Comparison between multiple regression models to study effect of turning parameters on the surface roughness// Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference. – 2008. – Paper 133 – 12 p.*
86. Torims T., Burmestre D., Zarinsh M. *Analysis of novel grinding technology impact to the three-dimensional roughness parameters of the shipboard diesels crankshaft bearings// Scientific Proceedings of Riga Technical University, Machine Science and Transportation, Production Engineering. Volume 19. – Riga: RTU, 2005. – pp. 19-26.*
87. Vernon A., Ozel T. *Factors affecting surface roughness in finish hard turning// IE working paper No: 03-104. – 2003. – 19 p.*
88. Viharos Zs., Monostori L. *A compromise oriented optimization tool for supporting decision making in machining// Proceedings of Asi'99, The annual conference of ICIMS-NOE, Life cycle approaches to production systems, management, control, supervision. – Leuven: Belgium, September 22-24 – pp. 124-131.*

89. *Voon W.S., Hamouda A.M.S. Artificial intelligence device and corresponding methods for selecting machinability. Patent No. US 2004/0098147 A1. – 2004. – 12 p.*
90. *Westkamper E., Kraus M. Consideration for a New Tolerance System to Characterize Technical Surface in the Micro- and Nanometer Scale// Proceedings of the 1st International Ispen Conference – Bremen: Germany, May 31st-June 4th, 1999. – Volume 2 – pp. 415-441.*
91. *Whitehouse D. Surface metrology// Journal of Measurement Science and Technology. – 1997. – Volume 8 – pp. 955-972.*
92. *Wu C.L., Haboush R.K. Artificial intelligence for adaptive machining control of surface finish. Patent No. US 4926309. – 1990. – 23 p.*
93. *Xiao G., Malkin S. On-line optimization for internal plunge grinding// Annals of the CIRP. – 1996. – Volume 45, Number 1 – pp. 287-292.*
94. *Yang K., Jeang A. Statistical Surface Roughness Checking Procedure based on Cutting Tool Wear Model// Journal of Manufacturing System. – 1994. – Volume 13 Number 1 – pp 1-7.*
95. *Yang L.-D., Chen J.C., Chow H.-M. etc. Fuzzy-nets-based in-process surface roughness adaptive control system in end-milling operations// International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. – 2006. – Volume 28 – pp. 236-248.*
96. *Yoneda T. Method and apparatus for grinding a workpiece. Patent No. EP 0562632 B1. – 1997. – 39 p.*
97. *Yoshida J., Kawana A., Inoue S. etc. Machining processor. Patent No. US 6438445 B1. – 2002. – 20 p.*
98. *Zadeh L. A. Fuzzy Sets// Information and Control. – 1965. – Volume 8 – pp. 338-353.*
99. *Zhang J.Z., Chen J.C. The development of an in-process surface roughness adaptive control system in end milling operations// International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. – 2007. – Volume 31 – pp 877-887.*
100. *Zuperl U., Cus F. Optimization of cutting conditions during machining by using neural networks// Robotics and computer Integrated Manufacturing. – 2003. – Volume 19 – pp. 189-199.*

101. Маталин А.А. *Технология механической обработки.* – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 464 с.
102. Сулов А.Г. *Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей.* – Москва: Машиностроение, 1987. – 286 с.
103. *Exploring Surface Texture: A fundamental guide to the measurement of surface finish. Production instruction.* – London: Taylor Hobson Ltd., 2003. – 100 p.
104. *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide.* – Natick: The MathWorks Inc., 1995. – 345 p.
105. *fuzzyTECH-MP Handbook.* – Chandler: Microchip Technology Inc., 1995. – 42 p.
106. *Metalworking products: Rotating tools.* – Stockholm: Sandvik Coromant., 2003. – 438 p.
107. *Method for the assessment of surface texture// British Standard BS 1134 – 1988.*
108. *Surface roughness – Terminology – Part 1: Surface and its parameters// International Standard ISO 4287/1 – 1984.*
109. *Surface texture: surface roughness, waviness and lay// American Standard ANSI B.46.1 – 1978.*
110. *Blateyron F. New 3D Parameters and Filtration Techniques for Surface Metrology// Quality Magazine White Paper 2006. / Internets. – <http://www.qualitymag.com/QUAL/Home/Files/PDFs/New3DParametersandFiltrationTechniquesforSurfaceMetrology.pdf>*
111. *Brule J.F. Fuzzy Systems - A Tutorial / Internets. – <http://www.austinlinks.com/Fuzzy/tutorial.html>*
112. *Development of a basis for 3D Surface Roughness Standards / Internets. – <http://zeus.plmsc.psu.edu/~manias/MatSc597/roughness/definitions.html>*
113. *Image Processing and Computer Vision Lab: Fuzzy theory / Internets. – <http://www.csie.ntnu.edu.tw/~ipcv/Leader/teaching/ft/>*
114. *LZA Terminoloģijas komisija / Internets. – <http://www.termini.lv/index.php?term=fuzzy%20logic&lang=EN&terms=fuzzy>*
115. *Measurement Services: Technology Overview / Internets. – <http://www.schmitt-ind.com/products-services-measurement-services-tech-overview.shtml>*
116. *Michigan Technological University: John W. Sutherland. Terminology/ Internets. – <http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/quality/sfinish/terminology.html>*
117. *Programming- Fuzzy Logic / Internets. –*

- http://www.societyofrobots.com/programming_fuzzy_logic.shtml
118. Sowell T.E. *Fuzzy logic for "just plain folks": Chapter 1. Fuzzy Logic - A Powerful Way to Analyze and Control Complex Systems / Internets.* –
<http://www.fuzzy-logic.com/Ch1.htm>
 119. Sowell T.E. *Fuzzy logic for "just plain folks": Chapter 2. An Exciting Moment in the History of Science / Internets.* – <http://www.fuzzy-logic.com/Ch2.htm>
 120. Sowell T.E. *Fuzzy logic for "just plain folks": Chapter 3. Let's Build a Fuzzy Logic Control System / Internets.* – <http://www.fuzzy-logic.com/ch3.htm>
 121. *Surface Metrology Standards / Internets.* –
<http://www.predev.com/smg/standarts.htm>
 122. *Synaptic: The Theory: Fuzzy Math. Part 1 / Internets.* –
<http://blog.peltarion.com/2006/10/25/fuzzy-math-part-1-the-theory/>
 123. *Tabenkin A. To Each His Own Parameter / Internets.* –
<http://www.qualitydigest.com/june01/html/surface.html>
 124. *Talysurf Series 2: Specification / Internets.* –
<http://www.zimmerman.com.tw/uploads/FTSS2-013SalesBrochure.pdf>

PIELIKUMI

Programma virsmas raupjuma prognozēšanas modelim

```
FUNCTION_BLOCK surface_roughness_prediction
VAR_INPUT
    speed      REAL; (* RANGE(120 .. 190) *)
    feed       REAL; (* RANGE(0.1 .. 0.25) *)
    depth_cut  REAL; (* RANGE(0.5 .. 1.5) *)
END_VAR
VAR_OUTPUT
    surface_roughness REAL; (* RANGE(0.4 .. 1.4) *)
END_VAR
FUZZIFY speed
    TERM small := (120, 1) (150, 0);
    TERM medium := (120, 0) (150, 1) (190, 0);
    TERM large := (150, 0) (190, 1);
END_FUZZIFY
FUZZIFY feed
    TERM small := (0.1, 1) (0.175, 0);
    TERM medium := (0.1, 0) (0.175, 1) (0.25, 0);
    TERM large := (0.175, 0) (0.25, 1);
END_FUZZIFY
FUZZIFY depth_cut
    TERM very_small := (0.5, 1) (0.75, 0);
    TERM small := (0.5, 0) (0.75, 1) (1, 0);
    TERM medium := (0.75, 0) (1, 1) (1.25, 0);
    TERM large := (1, 0) (1.25, 1) (1.5, 0);
    TERM very_large := (1.25, 0) (1.5, 1);
END_FUZZIFY
DEFUZZIFY surface_roughness
    TERM extra_small := 0.4;
    TERM very_small := 0.6;
    TERM small := 0.8;
    TERM medium := 1;
```

1. pielikuma turpinājums

```
TERM big := 1.2 ;
TERM very_big := 1.4 ;
ACCU : MAX ;
METHOD : CoA
DEFAULT := 1
END_DEFUZZIFY
RULEBLOCK first
  AND : MIN ;
  RULE 1 : IF (speed IS small) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS
very_small) THEN (surface_roughness IS extra_small) ;
  RULE 2 : IF (speed IS medium) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS
very_small) THEN (surface_roughness IS very_small) ;
  RULE 3 : IF (speed IS large) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS
very_small) THEN (surface_roughness IS extra_small) ;
  RULE 4 : IF (speed IS small) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS
very_small) THEN (surface_roughness IS medium) ;
  RULE 5 : IF (speed IS medium) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS
very_small) THEN (surface_roughness IS medium) ;
  RULE 6 : IF (speed IS large) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS
very_small) THEN (surface_roughness IS very_big) ;
  RULE 7 : IF (speed IS small) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS
very_small) THEN (surface_roughness IS medium) ;
  RULE 8 : IF (speed IS medium) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS
very_small) THEN (surface_roughness IS medium) ;
  RULE 9 : IF (speed IS large) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS
very_small) THEN (surface_roughness IS very_small) ;
  RULE 10 : IF (speed IS small) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS small)
THEN (surface_roughness IS very_small) ;
  RULE 11 : IF (speed IS medium) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS
small) THEN (surface_roughness IS very_small) ;
  RULE 12 : IF (speed IS large) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS small)
THEN (surface_roughness IS small) ;
  RULE 13 : IF (speed IS small) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS
```

1. pielikuma turpinājums

small) THEN (surface_roughness IS small) ;

RULE 14 : IF (speed IS medium) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS small) THEN (surface_roughness IS small) ;

RULE 15 : IF (speed IS large) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS small) THEN (surface_roughness IS small) ;

RULE 16 : IF (speed IS small) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS small) THEN (surface_roughness IS medium) ;

RULE 17 : IF (speed IS medium) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS small) THEN (surface_roughness IS small) ;

RULE 18 : IF (speed IS large) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS small) THEN (surface_roughness IS small) ;

RULE 19 : IF (speed IS small) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS medium) THEN (surface_roughness IS extra_small) ;

RULE 20 : IF (speed IS medium) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS medium) THEN (surface_roughness IS very_small) ;

RULE 21 : IF (speed IS large) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS medium) THEN (surface_roughness IS small) ;

RULE 22 : IF (speed IS small) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS medium) THEN (surface_roughness IS very_small) ;

RULE 23 : IF (speed IS medium) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS medium) THEN (surface_roughness IS small) ;

RULE 24 : IF (speed IS large) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS medium) THEN (surface_roughness IS medium) ;

RULE 25 : IF (speed IS small) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS medium) THEN (surface_roughness IS small) ;

RULE 26 : IF (speed IS medium) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS medium) THEN (surface_roughness IS medium) ;

RULE 27 : IF (speed IS large) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS medium) THEN (surface_roughness IS medium) ;

RULE 28 : IF (speed IS small) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS large) THEN (surface_roughness IS very_small) ;

RULE 29 : IF (speed IS medium) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS

1. pielikuma turpinājums

large) THEN (surface_roughness IS small) ;

RULE 30 : IF (speed IS large) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS large)
THEN (surface_roughness IS medium) ;

RULE 31 : IF (speed IS small) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS
large) THEN (surface_roughness IS medium) ;

RULE 32 : IF (speed IS medium) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS
large) THEN (surface_roughness IS big) ;

RULE 33 : IF (speed IS large) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS
large) THEN (surface_roughness IS big) ;

RULE 34 : IF (speed IS small) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS large)
THEN (surface_roughness IS big) ;

RULE 35 : IF (speed IS medium) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS
large) THEN (surface_roughness IS big) ;

RULE 36 : IF (speed IS large) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS large)
THEN (surface_roughness IS very_big) ;

RULE 37 : IF (speed IS small) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS
very_large) THEN (surface_roughness IS very_small) ;

RULE 38 : IF (speed IS medium) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS
very_large) THEN (surface_roughness IS small) ;

RULE 39 : IF (speed IS large) AND (feed IS small) AND (depth_cut IS
very_large) THEN (surface_roughness IS medium) ;

RULE 40 : IF (speed IS small) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS
very_large) THEN (surface_roughness IS medium) ;

RULE 41 : IF (speed IS medium) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS
very_large) THEN (surface_roughness IS medium) ;

RULE 42 : IF (speed IS large) AND (feed IS medium) AND (depth_cut IS
very_large) THEN (surface_roughness IS big) ;

RULE 43 : IF (speed IS small) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS
very_large) THEN (surface_roughness IS very_big) ;

RULE 44 : IF (speed IS medium) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS
very_large) THEN (surface_roughness IS big) ;

RULE 45 : IF (speed IS large) AND (feed IS large) AND (depth_cut IS

1. pielikuma turpinājums

```
very_large) THEN (surface_roughness IS very_big) ;  
END_RULEBLOCK  
END_FUNCTION_BLOCK
```

Programma virsmas raupjuma prognozēšanas modelim

```
FUNCTION_BLOCK control_delta_atrums
```

```
VAR_INPUT
```

```
    delta_Sa          REAL; (* RANGE(-2 .. 2) *)
```

```
    iestatitais_Sa   REAL; (* RANGE(0 .. 6.5) *)
```

```
END_VAR
```

```
VAR_OUTPUT
```

```
    delta_atrums     REAL; (* RANGE(-20 .. 20) *)
```

```
END_VAR
```

```
FUZZIFY delta_Sa
```

```
    TERM xxx_neg := (-2, 1) (-1.6, 1) (-0.8, 0) ;
```

```
    TERM x_neg := (-1.6, 0) (-0.8, 1) (-0.4, 0) ;
```

```
    TERM x_neg := (-0.8, 0) (-0.4, 1) (0, 0) ;
```

```
    TERM nulle := (-0.4, 0) (0, 1) (0.4, 0) ;
```

```
    TERM x_poz := (0, 0) (0.4, 1) (0.8, 1) ;
```

```
    TERM xx_poz := (0.4, 0) (0.8, 1) (1.6, 1) ;
```

```
    TERM xxx_poz := (0.8, 0) (1.6, 1) (2, 1) ;
```

```
END_FUZZIFY
```

```
FUZZIFY iestatitais_Sa
```

```
    TERM ekstr_gluds := (0, 1) (0.4, 1) (0.8, 0) ;
```

```
    TERM loti_gluds := (0.4, 0) (0.8, 1) (1.6, 0) ;
```

```
    TERM gluds := (0.8, 0) (1.6, 1) (2.5, 0) ;
```

```
    TERM videjs := (1.6, 0) (2.5, 1) (3.2, 0) ;
```

```
    TERM raupjs := (2.5, 0) (3.2, 1) (4.5, 0) ;
```

```
    TERM loti_raupjs := (3.2, 0) (4.5, 1) (6.3, 0) ;
```

```
    TERM ekstr_raupjs := (4.5, 0) (6.3, 1) (6.5, 1) ;
```

```
END_FUZZIFY
```

```
DEFUZZIFY delta_atrums
```

```
    TERM ekstr_neg := -15 ;
```

2. pielikuma turpinājums

```
TERM loti_neg := -10 ;
TERM negat := -5 ;
TERM nulle := 0 ;
TERM pozit := 5 ;
TERM loti_poz := 10 ;
TERM ekstr_poz := 15 ;
ACCU : MAX ;
METHOD : CoA
DEFAULT := 1
END_DEFUZZIFY

RULEBLOCK first
    AND : MIN ;
    RULE 1 : IF (delta_Sa IS xxx_neg) AND (iestatitais_Sa IS ekstra_gluds)
THEN (delta_atrums IS loti_neg) ;
    RULE 2 : IF (delta_Sa IS xxx_neg) AND (iestatitais_Sa IS loti_gluds) THEN
(delta_atrums IS loti_neg) ;
    RULE 3 : IF (delta_Sa IS xxx_neg) AND (iestatitais_Sa IS gluds) THEN
(delta_atrums IS loti_neg) ;
    RULE 4 : IF (delta_Sa IS xxx_neg) AND (iestatitais_Sa IS videjs) THEN
(delta_atrums IS loti_neg) ;
    RULE 5 : IF (delta_Sa IS xxx_neg) AND (iestatitais_Sa IS raupjs) THEN
(delta_atrums IS ekstr_neg) ;
    RULE 6 : IF (delta_Sa IS xxx_neg) AND (iestatitais_Sa IS loti_raupjs) THEN
(delta_atrums IS ekstr_neg) ;
    RULE 7 : IF (delta_Sa IS xxx_neg) AND (iestatitais_Sa IS ekstra_raupjs)
THEN (delta_atrums IS ekstr_neg) ;
    RULE 8 : IF (delta_Sa IS xx_neg) AND (iestatitais_Sa IS ekstra_gluds) THEN
(delta_atrums IS negat) ;
    RULE 9 : IF (delta_Sa IS xx_neg) AND (iestatitais_Sa IS loti_gluds) THEN
(delta_atrums IS negat) ;
    RULE 10 : IF (delta_Sa IS xx_neg) AND (iestatitais_Sa IS gluds) THEN
(delta_atrums IS loti_neg) ;
```

2. pielikuma turpinājums

RULE 11 : IF (delta_Sa IS xx_neg) AND (iestatitais_Sa IS videjs) THEN
(delta_atrums IS loti_neg) ;

RULE 12 : IF (delta_Sa IS xx_neg) AND (iestatitais_Sa IS raupjs) THEN
(delta_atrums IS loti_neg) ;

RULE 13 : IF (delta_Sa IS xx_neg) AND (iestatitais_Sa IS loti_raupjs) THEN
(delta_atrums IS ekstr_neg) ;

RULE 14 : IF (delta_Sa IS xx_neg) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_raupjs)
THEN (delta_atrums IS ekstr_neg);

RULE 15 : IF (delta_Sa IS x_neg) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_gluds) THEN
(delta_atrums IS negat) ;

RULE 16 : IF (delta_Sa IS x_neg) AND (iestatitais_Sa IS loti_gluds) THEN
(delta_atrums IS negat) ;

RULE 17 : IF (delta_Sa IS x_neg) AND (iestatitais_Sa IS gluds) THEN
(delta_atrums IS negat) ;

RULE 18 : IF (delta_Sa IS x_neg) AND (iestatitais_Sa IS videjs) THEN
(delta_atrums IS negat) ;

RULE 19 : IF (delta_Sa IS x_neg) AND (iestatitais_Sa IS raupjs) THEN
(delta_atrums IS loti_neg) ;

RULE 20 : IF (delta_Sa IS x_neg) AND (iestatitais_Sa IS loti_raupjs) THEN
(delta_atrums IS loti_neg) ;

RULE 21 : IF (delta_Sa IS x_neg) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_raupjs) THEN
(delta_atrums IS loti_neg) ;

RULE 22 : IF (delta_Sa IS nulle) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_gluds) THEN
(delta_atrums IS nulle) ;

RULE 23 : IF (delta_Sa IS nulle) AND (iestatitais_Sa IS loti_gluds) THEN
(delta_atrums IS nulle);

RULE 24 : IF (delta_Sa IS nulle) AND (iestatitais_Sa IS gluds) THEN
(delta_atrums IS nulle) ;

RULE 25 : IF (delta_Sa IS nulle) AND (iestatitais_Sa IS videjs) THEN
(delta_atrums IS nulle) ;

RULE 26 : IF (delta_Sa IS nulle) AND (iestatitais_Sa IS raupjs) THEN
(delta_atrums IS nulle) ;

2. pielikuma turpinājums

RULE 27 : IF (delta_Sa IS nulle) AND (iestatitais_Sa IS loti_raupjs) THEN
(delta_atrums IS nulle) ;

RULE 28 : IF (delta_Sa IS nulle) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_raupjs) THEN
(delta_atrums IS nulle) ;

RULE 29 : IF (delta_Sa IS x_poz) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_gluds) THEN
(delta_atrums IS pozit) ;

RULE 30 : IF (delta_Sa IS x_poz) AND (iestatitais_Sa IS loti_gluds) THEN
(delta_atrums IS pozit) ;

RULE 31 : IF (delta_Sa IS x_poz) AND (iestatitais_Sa IS gluds) THEN
(delta_atrums IS pozit) ;

RULE 32 : IF (delta_Sa IS x_poz) AND (iestatitais_Sa IS videjs) THEN
(delta_atrums IS pozit) ;

RULE 33 : IF (delta_Sa IS x_poz) AND (iestatitais_Sa IS raupjs) THEN
(delta_atrums IS loti_pozit) ;

RULE 34 : IF (delta_Sa IS x_poz) AND (iestatitais_Sa IS loti_raupjs) THEN
(delta_atrums IS loti_poz) ;

RULE 35 : IF (delta_Sa IS x_poz) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_raupjs) THEN
(delta_atrums IS loti_poz) ;

RULE 36 : IF (delta_Sa IS xx_poz) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_gluds)
THEN (delta_atrums IS pozit) ;

RULE 37 : IF (delta_Sa IS xx_poz) AND (iestatitais_Sa IS loti_gluds) THEN
(delta_atrums IS pozit) ;

RULE 38 : IF (delta_Sa IS xx_poz) AND (iestatitais_Sa IS gluds) THEN
(delta_atrums IS loti_pozit) ;

RULE 39 : IF (delta_Sa IS xx_poz) AND (iestatitais_Sa IS videjs) THEN
(delta_atrums IS loti_pozit) ;

RULE 40 : IF (delta_Sa IS xx_poz) AND (iestatitais_Sa IS raupjs) THEN
(delta_atrums IS loti_pozit) ;

RULE 41 : IF (delta_Sa IS xx_poz) AND (iestatitais_Sa IS loti_raupjs) THEN
(delta_atrums IS ekstr_poz) ;

RULE 42 : IF (delta_Sa IS xx_poz) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_raupjs)
THEN (delta_atrums IS ekstr_poz) ;

2. pielikuma turpinājums

RULE 43 : IF (delta_Sa IS xxx_poz) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_gluds)
THEN (delta_atrums IS pozit) ;

RULE 44 : IF (delta_Sa IS xxx_poz) AND (iestatitais_Sa IS loti_gluds) THEN
(delta_atrums IS loti_poz) ;

RULE 45 : IF (delta_Sa IS xxx_poz) AND (iestatitais_Sa IS gluds) THEN
(delta_atrums IS loti_poz) ;

RULE 46 : IF (delta_Sa IS xxx_poz) AND (iestatitais_Sa IS videjs) THEN
(delta_atrums IS loti_poz) ;

RULE 47 : IF (delta_Sa IS xxx_poz) AND (iestatitais_Sa IS raupjs) THEN
(delta_atrums IS ekstr_poz) ;

RULE 48 : IF (delta_Sa IS xxx_poz) AND (iestatitais_Sa IS loti_raupjs)
THEN (delta_atrums IS ekstr_poz) ;

RULE 49 : IF (delta_Sa IS xxx_poz) AND (iestatitais_Sa IS ekstr_raupjs)
THEN (delta_atrums IS ekstr_poz) ;

END_RULEBLOCK

END_FUNCTION_BLOCK

1 General Information

Author:	
Created:	ceturtdiena, 2010. gada 28. oktobrī
Print Date:	sestdiena, 2010. gada 13. novembrī

Edition

Edition Name:	fuzzyTECH 5.54d Professional Edition
Neuro Modul:	NeuroFuzzy add-on Module installed

.1 List of Abbreviations

Compute MBF	Compute Membership Function (Fuzzification Method)
CoM	Center of Maximum (Defuzzification Methode)
BSUM	Bounded Sum Fuzzy Operator for Result Aggregation
MIN	Fuzzy Operator for AND Aggregation
MAX	Fuzzy Operator for OR Aggregation
GAMMA	Compensatory Operator for Aggregation
PROD	Fuzzy Operator for Composition
LV	Linguistic Variable
MBF	Membership Function
RB	Rule Block

2 adaptiva_vadiba_jauns

.1 Project Description

Input Variables	2
Output Variables	1
Intermediate Variables	0
Rule Blocks	1
Rules	49
Membership Functions	21

Table 1: Project Statistics

.2 System Structure

The system structure identifies the fuzzy logic inference flow from the input variables to the output variables. The fuzzification in the input interfaces translates analog inputs into fuzzy values. The fuzzy inference takes place in rule blocks which contain the linguistic control rules. The output of these rule blocks are linguistic

variables. The defuzzification in the output interfaces translates them into analog variables.

The following figure shows the whole structure of this fuzzy system including input interfaces, rule blocks and output interfaces. The connecting lines symbolize the data flow.

Figure 1: Structure of the Fuzzy Logic System

.3 Variables

This chapter contains the definition of all linguistic variables and of all membership functions.

Linguistic variables are used to translate real values into linguistic values. The possible values of a linguistic variable are not numbers but so called 'linguistic terms'.

For example:

To translate the real variable 'temperature' into a linguistic variable three terms, 'cold', 'pleasant' and 'warm' are defined. Depending on the current temperature level each of these terms describes the 'temperature' more or less well. Each term is defined by a membership function (MBF). Each membership function defines for any value of the input variable the associated degree of membership of the linguistic term. The membership functions of all terms of one linguistic variable are normally displayed in one graph. The following figure plots the membership functions of the three terms for the example 'temperature'.

Membership Function of 'temperature'

A 'temperature' of 66 °F is a member of the MBFs for the terms:

cold	to the degree of 0.8
pleasant	to the degree of 0.2
warm	to the degree of 0.0

Linguistic variables have to be defined for all input, output and intermediate variables. The membership functions are defined using a few definition points only.

The following tables list all variables of the system as well as the respective fuzzification or defuzzification method. Also the properties of all base variables and the term names are listed.

.1 Inputs

3. pielikuma turpinājums

#	Variable Name	Type	Unit	Min	Max	Default	Term Names
1	delta_Sa		Units	-2	2	0	xxx_neg xx_neg x_neg nulle x_poz xx_poz xxx_poz
2	iestatitais_Sa		Units	0	6.5	3.25	ekstr_gluds loti_gluds gluds videjs raupjs loti_raupjs ekstr_raupjs

Table 2: Variables of Group "Inputs"

Fuzzification Methods	
Compute MBF	Look up MBF
Categorical Variable	Display
Fuzzy Input	

.2 Outputs

#	Variable Name	Type	Unit	Min	Max	Default	Term Names
3	delta_atrums		Units	-20	20	0	ekstr_neg loti_neg negat nulle pozit loti_poz ekstr_poz

Table 3: Variables of Group "Outputs"

Defuzzification Methods	
Center of Maximum (CoM)	Mean of Maximum (MoM)
Center of Area (CoA)	Hyper CoM
Fuzzy Output	Force

The default value of an output variable is used if no rule is firing for this variable. Different methods can be used for the defuzzification, resulting either into the 'most plausible result' or the 'best compromise'.

The 'best compromise' is produced by the methods:

- CoM (Center of Maximum)
- CoA (Center of Area)

CoA BSUM, a version especially for efficient VLSI implementations

The 'most plausible result is produced by the methods:

MoM (Mean of Maximum)

MoM BSUM, a version especially for efficient VLSI implementations

.3 Input Variable "delta_Sa"

Figure 2: MBF of "delta_Sa"

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)		
xxx_neg	linear	(-2, 1)	(-1.6, 1)	(-0.8, 0)
		(2, 0)		
xx_neg	linear	(-2, 0)	(-1.6, 0)	(-0.8, 1)
		(-0.4, 0)	(2, 0)	
x_neg	linear	(-2, 0)	(-0.8, 0)	(-0.4, 1)
		(0, 0)	(2, 0)	
nulle	linear	(-2, 0)	(-0.4, 0)	(0, 1)
		(0.4, 0)	(2, 0)	
x_poz	linear	(-2, 0)	(0, 0)	(0.4, 1)
		(0.8, 0)	(2, 0)	
xx_poz	linear	(-2, 0)	(0.4, 0)	(0.8, 1)
		(1.6, 0)	(2, 0)	
xxx_poz	linear	(-2, 0)	(0.8, 0)	(1.6, 1)
		(2, 1)		

Table 4: Definition Points of MBF "delta_Sa"

.4 Input Variable "iestatitais_Sa"

Figure 3: MBF of "iestatitais_Sa"

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)		
ekstr_gluds	linear	(0, 1)	(0.4, 1)	(0.8, 0)
		(6.5, 0)		
loti_gluds	linear	(0, 0)	(0.4, 0)	(0.8, 1)
		(1.6, 0)	(6.5, 0)	
gluds	linear	(0, 0)	(0.8, 0)	(1.6, 1)
		(2.5, 0)	(6.5, 0)	
videjs	linear	(0, 0)	(1.6, 0)	(2.5, 1)
		(3.2, 0)	(6.5, 0)	
raupjs	linear	(0, 0)	(2.5, 0)	(3.2, 1)
		(4.5, 0)	(6.5, 0)	
loti_raupjs	linear	(0, 0)	(3.2, 0)	(4.5, 1)
		(6.3, 0)	(6.5, 0)	
ekstr_raupjs	linear	(0, 0)	(4.5, 0)	(6.3, 1)

	(6.5, 1)		
--	----------	--	--

Table 5: Definition Points of MBF "iestatitais_Sa"

.5 Output Variable "delta_atrums"

Figure 4: MBF of "delta_atrums"

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)		
ekstr_neg	linear	(-20, 0)	(-15, 1)	(-10, 0)
		(20, 0)		
loti_neg	linear	(-20, 0)	(-15, 0)	(-10, 1)
		(-5, 0)	(20, 0)	
negat	linear	(-20, 0)	(-10, 0)	(-5, 1)
		(0, 0)	(20, 0)	
nulle	linear	(-20, 0)	(-5, 0)	(0, 1)
		(5, 0)	(20, 0)	
pozit	linear	(-20, 0)	(0, 0)	(5, 1)
		(10, 0)	(20, 0)	
loti_poz	linear	(-20, 0)	(5, 0)	(10, 1)
		(15, 0)	(20, 0)	
ekstr_poz	linear	(-20, 0)	(10, 0)	(15, 1)
		(20, 0)		

Table 6: Definition Points of MBF "delta_atrums"

.4 Rule Blocks

The rule blocks contain the control strategy of a fuzzy logic system. Each rule block confines all rules for the same context. A context is defined by the same input and output variables of the rules.

The rules' 'if' part describes the situation, for which the rules are designed. The 'then' part describes the response of the fuzzy system in this situation. The degree of support (DoS) is used to weigh each rule according to its importance.

The processing of the rules starts with calculating the 'if' part. The operator type of the rule block determines which method is used. The operator types MIN-MAX, MIN-AVG and GAMMA are available. The characteristic of each operator type is influenced by an additional parameter.

For example:

MIN-MAX, parameter value 0 = Minimum Operator (MIN)
 MIN-MAX, parameter value 1 = Maximum Operator (MAX)
 GAMMA, parameter value 0 = Product Operator (PROD)

The minimum operator is a generalization of the Boolean 'and'; the maximum operator is a generalization of the Boolean 'or'.

The fuzzy composition eventually combines the different rules to one conclusion. If the BSUM method is used all firing rules are evaluated, if the MAX method is used only the dominant rules are evaluated.

1 Rule Block "RB1"

Parameter

Aggregation:	MINMAX
Parameter:	0.00
Result Aggregation:	MAX
Number of Inputs:	2
Number of Outputs:	1
Number of Rules:	49

IF			THEN
delta_Sa	iestatitais_Sa	DoS	delta_atrums
xxx_neg	ekstr_gluds	1.00	loti_neg
xxx_neg	loti_gluds	1.00	loti_neg
xxx_neg	gluds	1.00	loti_neg
xxx_neg	videjs	1.00	loti_neg
xxx_neg	raupjs	1.00	ekstr_neg
xxx_neg	loti_raupjs	1.00	ekstr_neg
xxx_neg	ekstr_raupjs	1.00	ekstr_neg
xx_neg	ekstr_gluds	1.00	negat
xx_neg	loti_gluds	1.00	negat
xx_neg	gluds	1.00	loti_neg
xx_neg	videjs	1.00	loti_neg
xx_neg	raupjs	1.00	loti_neg
xx_neg	loti_raupjs	1.00	ekstr_neg
xx_neg	ekstr_raupjs	1.00	ekstr_neg
x_neg	ekstr_gluds	1.00	negat
x_neg	loti_gluds	1.00	negat
x_neg	gluds	1.00	negat
x_neg	videjs	1.00	negat
x_neg	raupjs	1.00	loti_neg
x_neg	loti_raupjs	1.00	loti_neg
x_neg	ekstr_raupjs	1.00	loti_neg
nulle	ekstr_gluds	1.00	nulle
nulle	loti_gluds	1.00	nulle
nulle	gluds	1.00	nulle
nulle	videjs	1.00	nulle
nulle	raupjs	1.00	nulle
nulle	loti_raupjs	1.00	nulle
nulle	ekstr_raupjs	1.00	nulle
x_poz	ekstr_gluds	1.00	pozit
x_poz	loti_gluds	1.00	pozit
x_poz	gluds	1.00	pozit
x_poz	videjs	1.00	pozit
x_poz	raupjs	1.00	loti_poz
x_poz	loti_raupjs	1.00	loti_poz
x_poz	ekstr_raupjs	1.00	loti_poz

3. pielikuma turpinājums

xx_poz	ekstr_gluds	1.00	pozit
xx_poz	loti_gluds	1.00	pozit
xx_poz	gluds	1.00	loti_poz
xx_poz	videjs	1.00	loti_poz
xx_poz	raupjs	1.00	loti_poz
xx_poz	loti_raupjs	1.00	ekstr_poz
xx_poz	ekstr_raupjs	1.00	ekstr_poz
xxx_poz	ekstr_gluds	1.00	pozit
xxx_poz	loti_gluds	1.00	loti_poz
xxx_poz	gluds	1.00	loti_poz
xxx_poz	videjs	1.00	loti_poz
xxx_poz	raupjs	1.00	ekstr_poz
xxx_poz	loti_raupjs	1.00	ekstr_poz
xxx_poz	ekstr_raupjs	1.00	ekstr_poz

Table 7: Rules of the Rule Block "RB1"