

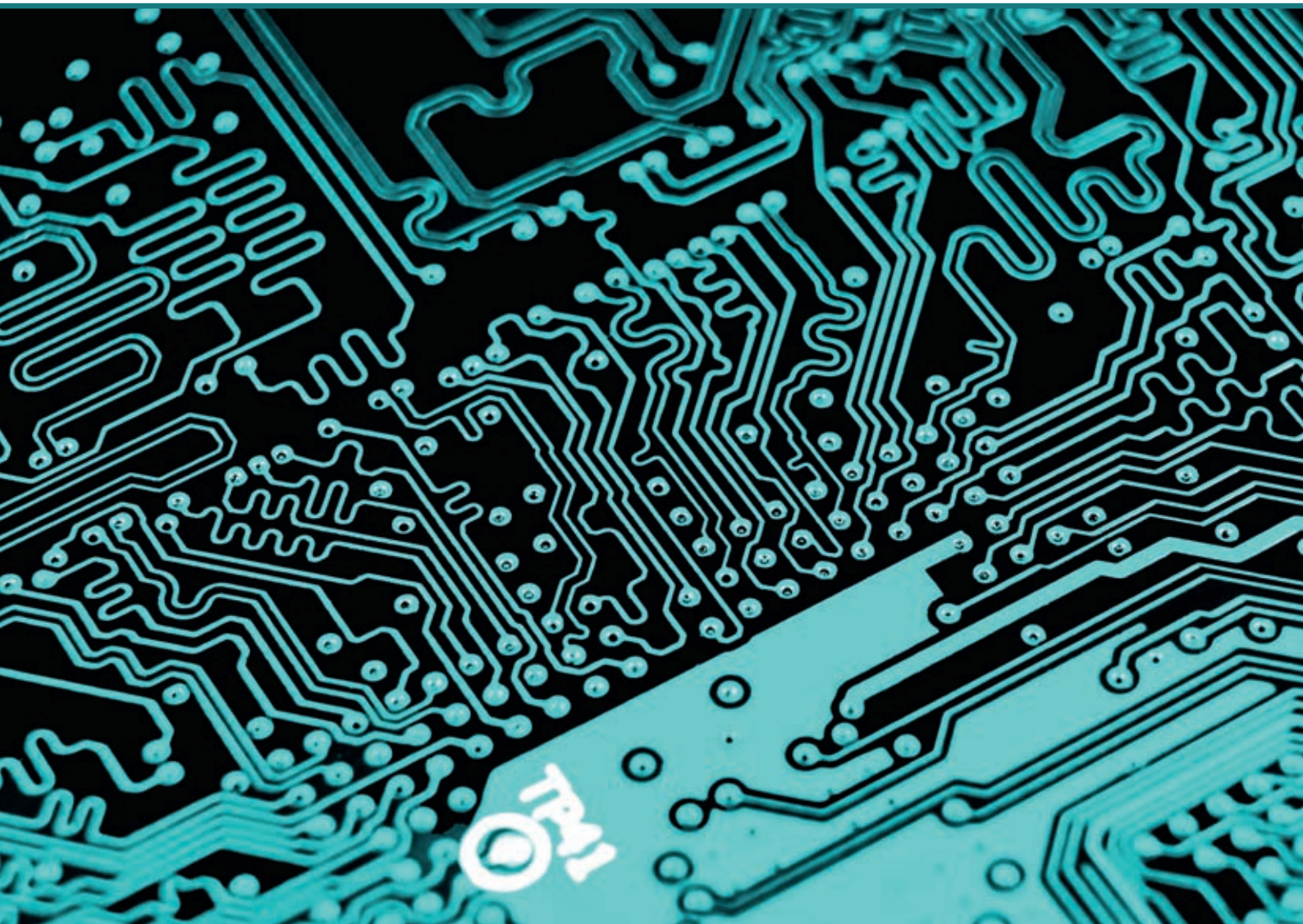


RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Donato Repole**

# BEZPILOTA TRANSPORTLĪDZEKĻU PARALĒLĀS SKAITĻOŠANAS NEIRONU-IZPLŪDUŠO DATU TĪKLU IZPĒTE

Promocijas darba kopsavilkums



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte  
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

**Donato Repole**

Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**BEZPILOTA TRASPORTLĪDZEKĻU  
PARALĒLĀS SKAITĻOŠANAS NEIRONU-  
IZPLŪDUŠO DATU TĪKLU IZPĒTE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
profesors *Dr. sc. ing.*  
*LESLIE ROBERT ADRIAN*

RTU Izdevniecība  
Rīga 2021

Repole, D. Bezpilota transportlīdzekļu paralēlās skaitļošanas neironu-izplūdušo datu tīklu izpēte. Promocijas darba kopsavilkums.

Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 37 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-14" 2021. gada 30. augusta lēmumu, protokols Nr. 04030-9.12.1/9.

<https://doi.org/10.7250/9789934226939>

ISBN 978-9934-22-693-9 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 28. decembrī plkst. 12 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

*Dr. habil. sc. ing. Pēteris Apse-Apsītis,*  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

*Dr. habil. sc. ing. Raja Mazuir Raja Ahsan Shah,*  
Koventrijas Universitāte, Apvienotā Karaliste

*Dr. habil. sc. ing. Andrés Gabriel García,*  
Nacionālā Tehnoloģiju universitāte, Baijablanka, Argentīna

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Donato Repole ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 111 attēlu, 19 tabulu, 88 vienādojumi, 12 pielikumu, kopā 249 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 66 nosaukumi.

## Anotācija

Promocijas darbs ilustrē autora pētījumus saistībā ar “neironu faziloģikas kontrolleriem”, kam pamatā ir *VHDL*. Autora akadēmiskie pētījumi ietver daudzus “neironu faziloģikas kontrolleru” izmēģinājumus, un daļa pētījumu ir vērsta uz dažādu to ieviešanas metožu novērtēšanu. Lēmums izmantot *VHDL* kā “kontrollera aparatūras aprakstīšanas valodu” ir autora akadēmisko pētījumu rezultāts, kas ir autora starptautisko zinātnisko rakstu pamatā.

Promocijas darba sākumā ir autonomas mobilās robotikas lietojuma, transportlīdzekļu lietojuma un mazu autonomu bezpilota lidaparātu (atvasinājums no radiovadāmām lidmašīnām) pārskats, kurā aprakstīts promocijas darba konteksts.

Turpmāk promocijas darbā aprakstīts lēmumu pieņemšanas process, izvēloties *VHDL* kā “kontrollera aparatūras aprakstīšanas valodu”, kas cieši saistās ar iespēju dažādību un priekšrocībām, izmantojot *FPGA*, nevis daudzkodolu *MCU*. Liela daļa uzmanības tiek pievērsta *FPGA* paralēlās apstrādes funkcionalitātei. Promocijas darbā pārbaudītas metodes, lai mazinātu uz *VHDL* balstīta apraksta sarežģītību un progresīvu mācību procesu ieviešanu.

Promocijas darbā pētīts jauns programmatūras rīks augsta līmeņa “neironu faziloģikas kontrollera” aprakstam, kas spēj izpildīt kontrollera simulācijas, optimizācijas uzdevumus, veikt mācīšanās/apmācības uzdevumus un spēj eksportēt kontrolleri *VHDL* kodā.

Promocijas darbā piedāvāts uz *VHDL* balstītu “neironu faziloģikas kontrolleru” pētījumu izmantošanas gadījums ar mērķi izmantot mācīšanās/apmācības kontrollera spējas mehāniskās konstrukcijas noslogošanai. Šī pieeja ir vērsta uz kontrollera precīzu noregulēšanu ar atkārtojumu palīdzību, kas ļauj kontrollera parametrus pielāgot radiovadāmas lidmašīnas mehāniskajām īpašībām, kas tiks pārveidota par mazu bezpilota lidaparātu. Kā priekšnosacījums kontrollera koncepcijai izveidota virkne mehānisku un elektrisku/elektronisku aparatūras pieņēmumu un definīciju. Šajā priekšlikumā galvenā uzmanība pievērsta kontrollera projektēšanas stratēģijai, rūpīgi pārbaudot “neironu faziloģikas kontrolleru” veidošanas procesu, aprakstu un simulāciju.

Sistēmas priekšnosacījumi un robežnosacījumi ir pilnībā skaidri, tāpēc, lai izveidotu universālu lidaparāta kontrolleri, promocijas darba mērķis ir radīt “neironu faziloģikas kontrolleri”, kas spētu imitēt cilvēka kā pilota rīcību. Ir mēģinājumi izveidot faziloģikas kontrollera simulāciju (faziloģikas kontrolleris ir “neironu faziloģikas kontrollera” pamats pirms mācīšanās/apmācības un optimizācijas procesa), mācīšanās/apmācības procesu un optimizācijas procesu.

Izveidot kontrolleri ar iemācīšanās opciju var būt ļoti sarežģīti, un tā veidotājam jāpaļaujas uz izturīgiem programmatūras rīkiem – mācīšanās/apmācības paātrināšanas rīka izvēle kļūst par izšķirošo soli promocijas darbā aprakstītā izmantojuma gadījumā. Vēl nozīmīgāki ir “Simulācijas apstākļu” nosacījumi, kuros būtu jātestē “pamata faziloģikas kontrolleris”. Patiesībā obligāts nosacījums atbilstošam mācīšanās/apmācības procesam ir izmantot “pamata faziloģikas kontrolleri” kā sistēmas centru, kas jau spēj veikt vienkāršus uzdevumus.



Promocijas darba vispārējā ideja ir ieviest tādu projektēšanas stratēģiju, kuras mērķis ir izstrādāt risinājumus mobilo robotu transportlīdzekļu (jebkāda veida) sarežģītai kontrolleru arhitektūrai vai pat dažādām industriālām vajadzībām. Šis darbs dod iespēju turpināt pētījumus par autonomu robotiku jeb radīt autonomu bezpilota lidaparātu no lētas RC (radiovadāmas) lidmašīnas.

Vienkāršotu RC lidmašīnas projektu var izmantot kā pēdējo variantu neveiksmīga rezultāta gadījumā, lai izveidotu kontrolleri, kur 3D formātā izdrukātu un mājās uzbūvētu lidaparātu procesa gaitā un ar pārrunāto algoritmu palīdzību varētu pārveidot par AUAV. Mācīšanās/apmācības procesu imitēšana un to atkārtojums dažādos mehānismos un dažādām RC lidmašīnām, ko pārveidotu par AUAV, pētniekiem varētu kļūt par informācijas zelta raktuvēm. Patiesi, uzticamu procesu noteikšana ļauj pētniekiem atkārtoti izmantot vienus un tos pašus principus pilnīgi atšķirīgiem lietojumiem, ko ierobežo tikai pētnieka iztēle.

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Visi kopsavilkumi un secinājumi, kā arī pētījumu rezultāti ir saistīti ar hipotēzi un mijiedarbību starp tiem. Pētījumu rezultātiem ir potenciāls attīstīties citos projektos, kas sastāvētu no dažādām metodoloģijām, kas rastos no pētījumiem.

Promocijas darbā ir septiņas nodaļas, ieskaitot ievadu un secinājumus. Literatūras sarakstā ir 66 avoti un 12 pielikumi. Promocijas darba apjoms ir 249 lapas. Tajā ir iekļauti 111 attēli, 88 formulas un 19 tabulas.

# SATURS

IEVADS.....	7
Uzdevumi .....	7
Zinātniskā aktualitāte .....	8
Praktiskais pielietojums.....	8
Pētījuma rīki un metodes.....	8
Darba struktūra un apjoms .....	9
Pētījuma rezultātu izplatīšana.....	11
1.    Bezpilota transportlīdzekļi no iekšpuses .....	13
2.    Bezpilota transportlīdzekļu vadības paņēmieni .....	15
3.    Tipiskā elektrisko transportlīdzekļu arhitektūra .....	18
4.    Teorētiskais ietvars .....	19
5.    Priekšlikums sistēmas aparatūras plānojumam .....	21
6.    Pētāmais gadījums, kontrolera izveide .....	23
7.    Secinājumi .....	27
8.    Plānotie pētījumi.....	31
Literatūras saraksts.....	32
Pielikumi .....	34

# IEVADS

Autonomo transportlīdzekļu aplikācijas (mobilās robotikas aplikācijas, automobiļu bez vadītāja aplikācijas, *AUAV* un *UAV* aplikācijas utt.) nosaka promocijas darba tēmu. Tomēr promocijas darba mērķis saistās ar “neironu faziloģikas kontrolleru”, balstītu *VHDL*, izpēti un attīstību, kas paredzēti maziem autonomiem bezpilota lidaparātiem (pārveidoti no *RC* lidmašīnām).

Daudzus gadus faziloģikas tehnoloģija ir piesaistījusi industriālo, patēriņa un automobiļu izstrādājumu ražotājus. Neskatoties uz to, panākt līdzsvaru starp tehnoloģijas izmaksām un veiktspēju ir sarežģīts uzdevums. Patiesībā faziloģikas algoritmus var izmantot *MCU*, kam ir nelielas izmaksas, taču to arhitektūra nav izstrādāta, tāpēc, lai apstrādātu faziloģiku, atrodoties gaisā, šī programmatūra bieži padara veiktspēju nepietiekamu. Speciālām faziloģikas procesora mikroshēmām iespējams apmierināt augstas veiktspējas prasības, bet tas galvenokārt ir dārgs *ASIC* risinājums. Patiesām pastāv tikai daži pilnībā pielāgoti vai daļēji pielāgoti integrēti faziloģikas kontrolleri, un lielākā daļa tiek montēti no standarta šūnām ieejas līmenī. Šobrīd jebkurš *FPGA* balstīts risinājums var tikt uzskatīts par derīgu, kas projektētājam spēj nodrošināt gan labu sistēmas veiktspēju, gan ievērojamu mobilitāti. Zinātniskā literatūra pierāda *FPGA* izmantošanas spēku neironu faziloģikas kontrolleru izveidošanā. *FPGA* paralēlās apstrādes iespējas sniedz ievērojamas priekšrocības, salīdzinot ar parasto *MCU* izmantošanu, kas veic datu sērijveida apstrādi.

*VHDL* kā “kontrollera aparatūras aprakstīšanas valoda” izvēle pamatota ar *VHDL* efektivitāti un uzticamību sarežģītās aparatūrās, piemēram, *AUAV* kontrollerī, kas apstiprināts daudzos zinātniskos rakstos.

## Uzdevumi

Promocijas darba pirmais uzdevums bija izstrādāt priekšlikumu *VHDL* balstītam “neironu faziloģikas kontrollerim”, kas paredzēts maziem autonomiem bezpilota lidaparātiem (pārveidoti no *RC* lidmašīnām).

Otrais uzdevums ietver atbilstošu mācīšanās/apmācības metožu sākotnējo izpēti, kas ļautu kontrollerim pielāgoties dažādām platformām ar dažādiem lidojuma dinamikas modeļiem.

Lai mācīšanās/apmācības process būtu efektīvs, nepieciešams primārs faziloģikas lidojuma kontrolleris, kas spēj veikt ierobežotu lidošanas darbību. Autora mērķis ir uzsvērt nepārveidotu simulāciju no uzskaitītajām funkcijām, kas varētu pārbaudīt “kontrollera atbildes reakciju” noteiktos apstākļos, piemēram, pacelšanās, nosēšanās, maršruta pielāgošana, līdzsvara stāvokļa lidojums (vienmērīgs lidojums), brāzmaina vēja kompensācijas manevrs utt.

Pieņēmums ir izmantot šīs simulācijas iznākumu, lai realizētu iterācijā un nosacījumos balstītu “svaru” un “funkciju” (vai svērto likumu) korekciju, lai īstenotu jebkāda veida mācību procesu.



## Zinātniskā aktualitāte

Projekta galvenā uzmanība tiek pievērsta nelielam *AUAV* (tiek pieņemts, ka tas ir autonomas *RC* lidaparāts) “neironu faziloģikas kontrollerim”, kas spēj atdarināt cilvēka pilota rīcību. Īpaši tiek piestrādāts pie “neironu faziloģikas kontrollera” plānojumu, aprakstu un simulāciju. Promocijas darbā aprakstīta projektēšanas stratēģija, kas atbalsta sarežģīta kontrollera izstrādi jebkura veida mobiliem robotu transportlīdzekļiem, kas paredzēti vairākām industriālām vajadzībām.

Promocijas darbā pētīts jauns programmatūras rīks augsta līmeņa “neironu faziloģikas kontrollera” aprakstam, kas spēj izpildīt kontrollera simulācijas, optimizācijas uzdevumus, veikt mācīšanās/apmācības uzdevumus un spēj eksportēt kontrolleri *VHDL* kodā.

Rezultātā iegūta fleksibla, inovatīva sistēma, ko iespējams pielāgot dažādiem lietojumiem, īstenojot apmācības procesu, lai pielāgotu, nosvērtu un optimizētu neironu faziloģikas vadības algoritmu.

## Praktiskais lietojums

Promocijas darbā piedāvāts *VHDL* balstīts “neironu faziloģikas kontrolleru” pētījums ar mērķi izmantot mācīšanās/apmācības kontrollera spējas mehāniskās konstrukcijas noslogošanai. Šī pieeja ir vērsta uz kontrollera precīzu noregulēšanu ar atkārtojumu palīdzību, kas ļauj kontrollera parametrus pielāgot radiovadāmas lidmašīnas mehāniskajām īpašībām, kas tiks pārveidota par nelielu *AUAV*. Vienkāršota trīsdimensionāli izdrukāta, mājās uzbūvēta *RC* lidmašīna ir ārkārtējs izpētes gadījums. Tās pārveidošana par vienkāršu *AUAV* varētu kļūt par sensacionālu sasniegumu, pateicoties pamatalgoritmu izmantošanai, kas ir pareizi pielāgoti un izveidoti, izmantojot virkni optimizācijas un mācīšanās/apmācības procesu.

Pētījumu rezultāti attiecas uz plašu autonomas robotikas klāstu, ne tikai uz *AUAV* fizisku izstrādi, izveidojot to no lēta *RC* lidaparāta. Uzticamu procesu noteikšana var ļaut atkārtoti izmantot tos pašus principus dažādos veidos.

## Pētījuma rīki un metodes

Promocijas darbā tiek pārbaudītas metodes, kā mazināt *VHDL* sarežģītību, pamatojoties uz progresīvu mācību procesu aprakstu un ieviešanu.

Kontrolleris, kam piemīt iemācīšanās spējas, var kļūt par ļoti sarežģītu projektu, un projektētājam jāpakļaujas jaudīgiem programmatūras rīkiem. Mācīšanās/apmācības paātrināšanas rīka izvēle kļūst par izšķirošu soli promocijas darbā aprakstītajos lietojumos. Šim darbam vēl nozīmīgāki ir “simulācijas apstākļu” nosacījumi, kuros būtu jātestē “pamata faziloģikas kontrolleris”. Obligāts nosacījums atbilstošam mācīšanās/apmācības procesam ir izmantot “pamata faziloģikas kontrolleri” kā sistēmas centru, kas jau spēj veikt vienkāršus uzdevumus.

Daudzi teorētisko aprēķinu un rezultātu grafiskās attēlošanas procesi ir iesākti, izmantojot plašu programmatūras sistēmu diapazonu, tostarp:

- *Aforge.net* (*C#* ietvars);

- *ALDEC Active-HDL* (ar *VHDL* saderīga *FPGA* dizaina izveides un simulācijas vide);
- *Altium Designer* (aparātūras projektēšanas vide);
- *Cadence-OrCAD* (aparātūras projektēšanas vide);
- *fuzzyTECH* (neironu faziloģikas *GUI* faziloģikas modelēšanai un programmēšanas algoritmiem);
- *Lattice Diamond* (režģveida struktūras pusvadītāju *VHDL* dizaina vide);
- *LT Spice* (aparātūras projektēšanas vide);
- *MATLAB* (daudzparadigmas ciparu skaitļošanas vide);
- *Maplesoft Maple* (simboliskā un ciparu skaitļošanas vide);
- *Microsoft Excel* (tabulas un izklājlapas);
- *Microsoft Paint 3D* (2D detaļu veidošana);
- *Microsoft PowerPoint* (2D detaļu veidošana);
- *Microsoft Visio* (2D detaļu veidošana);
- *Microsoft Word*;
- *Model-Sim (Mentor Graphics)*;
- *Neural.NET* (neironu vadīta mācību programmatūra);
- *Pspice* (elektriskās ķēdes modelēšana un analīze);
- *Synopsys Synplify PRO* (ar *VHDL* saderīga *FPGA* sintēzes programmatūra);
- *Solidworks* (3D detaļu veidošanas vide);
- *XFL3 (Xfuzzy 3 GUI* izstrādes vide neironu faziloģikas sistēmas projektēšanai, optimizēšanai un simulācijām).

## **Darba struktūra un apjoms**

Promocijas darba mērķi ir saistīti ar bezpilota transportlīdzekļu jomu (mobilās robotikas lietojums, bez vadītāja aprīkota automobiļa lietojums, *AUAV* un *UAV* lietojums), jo īpaši *VHDL* balstītu “neironu faziloģikas kontrolleru” izpēti un attīstību, kas paredzēti nelieliem autonomiem bezpilota lidaparātiem (pārveidoti no *RC* lidaparātiem).

Promocijas darbā izklāstīts *VHDL* balstīts neironu faziloģikas kontrollera izstrādes projekts no sākuma līdz beigām. Pieņēmums, ka *VHDL* ir sistēmas darba platforma, nozīmē, ka faziloģikas sistēmas aprakstam jābūt sintezējamam. Saistībā ar sintezējamiem *VHDL* algoritmiem ir prasība ieviest un pielāgot neironu faziloģikas kontrollera īpašības fiziskās aparatūras ieviešanai (*FPGA* drukāšana).

*VHDL* valoda nedaudz ierobežo, salīdzinot ar citu uz faziloģiku orientētu valodu fleksibilitāti un izteiksmīgumu. Lai sasniegtu rīcības modelēšanu, tiek piedāvāts tāds *VHDL* apraksta stils, kas ļautu izmantot atšķirīgus sistēmas struktūras aprakstus (faziloģikas kopas, pamata noteikumus utt.) un operatora aprakstus (savienojumi un faziloģiskas darbības). Tas ļautu patstāvīgi aprakstīt gan faziloģikas sistēmas struktūru, gan apstrādes algoritmu [1].

Vadības sistēmas izveidošanas priekšrocība tiek panākta, izmantojot augsta līmeņa neironu faziloģikas sistēmu aprakstus koriģējošā nolūkā. Tālākā rīcība ir “*XFUZZY XFL* versija 3.5” (jeb *XFL3 GUI*) rīcības apraksta analīze, kas izstrādāta “*Instituto de Microelectrónica de Sevilla*

(*IMSE-CNM*)". Tas padara iespējamus augsta līmeņa faziloģikas kontrolleru aprakstus (vai neironu faziloģikas kontrolleru – pēc mācīšanās/apmācības procesa) un pēc tam šo aprakstu pārveido par funkcionējošu *VHDL* kodu.

Iepriekš, lai radītu nepārveidotu faziloģikas kontrollera *VHDL* kodu un sāktu mācīšanās/apmācības darbības, promocijas darbā tika aprakstīta virkne nepārveidotu simulāciju, kas pārbaudītu “kontrollera atbildes reakciju” noteiktos apstākļos, piemēram, pacelšanās, nosēšanās, maršruta pielāgošana, līdzsvara stāvokļa lidojums (vienmērīgs lidojums), brāzmaina vēja kompensācijas manevrs utt.

Tālāk tiek aprakstīta mācīšanās/apmācības strukturēta procedūra. Šī procedūra ietver dažāda veida mācīšanās/apmācības procesu atdarināšanu, ļaujot kontrollera algoritmu pielāgot daudziem dažādiem *AUAV*.

**Pirmā nodaļa** veltīta bezpilota transportlīdzekļiem (mobilās robotikas lietojums, bez vadītāja aprīkota automobiļa lietojums, *AUAV* un *UAV* lietojums utt.), to aktualitātes un ar to saistīto problēmu pārskatam. Autora apgalvojumi tiek izklāstīti, minot pētījumu metodes un galveno hipotēzi. Nodaļā izklāstīta zinātniskā aktualitāte, praktiskā aktualitāte un lietojums.

**Otrā nodaļa** sniedz īsu izklāstu par bezpilota transportlīdzekļu vadības stratēģijām. Konkrētāk – kā piemērs būtu vadības stratēģija civilajiem *UAV*. Lai pārvaldītu *UAV*, var piemērot trīs dažādus vadības paņēmienus:

- a) lineārā vadība;
- b) nelineāra vadība;
- c) AI – uz iemācīšanos balstīta vadība.

**Trešajā nodaļā** analizētas elektrisko transportlīdzekļu tipiskās arhitektūras, it īpaši drošības noteikumi, kas saistīti ar transportlīdzekļa *REESS*. Šādi pētījumi un izzināšana ir vērtīgi, jo automobiļu rūpniecības standarti un nosacījumi ir kā atskaites punkti piedāvātajam aparatūras dizainam, kas aprakstīts promocijas darbā.

**Ceturtajā nodaļā** detalizēti aprakstīts akadēmiski teorētiskais darbs, kura pamatā ir visefektīvāko metožu atlase, lai ieviestu neironu faziloģikas kontrolleri, kas spējīgs veikt paralēlo skaitļošanu. Pētījumi pamato *FPGA* kā fiziskā kontrollera aparatūras un *VHDL* kā aparatūras apraksta valodas izmantošanu. Nodaļā tiek izskaidroti arī teorētiskie ieguvumi no augsta līmeņa faziloģikas kontrolleru aprakstiem (vai neironu faziloģikas kontrolleru – pēc mācīšanās/apmācības procesa) un pēc tam šos aprakstus pārveido par funkcionējošu *VHDL* kodu (konkrētāk, *XFUZZY XFL* versija 3.5” (jeb *XFL3 GUI*) rīcības apraksta analīze, kas izstrādāta “*Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE-CNM)*”.

**Piektā nodaļa** iepazīstina ar aparatūru, kas tiks izmantota kā lidojuma kontrollera konstrukcijas pamats.

**Sestā nodaļa** ilustrē konkrēto neironu faziloģikas lidaparāta kontrolleri. Apraksts ietver:

- sintezējamās sistēmas *VHDL* kods *RTL* līmenī;
- pilns “neironu faziloģikas” kontrollera apraksts;
- „kontrollera” optimizācijas stratēģija;
- kontrollera mācīšanās/apmācības izpildes stratēģija;
- nepārveidota faziloģikas lidojuma kontrollera kompleksa simulācijas analīze.

Ar šo pētījumu un atvasināto “neironu faziloģikas” kontrollera dizainu autors tiecas pēc precīza gala rezultāta – parādīt manevrējama un rentabla kontrollera iespējamību, kas spēj atdarināt cilvēka pilota vadīšanas manieri un var koriģēt rīcību mācīšanās/apmācības procesā.

## Pētījuma rezultātu izplatīšana

Autora akadēmiskie pētījumi skar vairākus dažādus “neironu faziloģikas kontrolleru” lietojumus, un ievērojamā pētījuma daļā galvenā uzmanība pievērsta dažādu to ieviešanas metožu novērtēšanai. Lēmums izmantot *VHDL* kā “kontrollera aparatūras aprakstīšanas valodu” ir autora akadēmisko pētījumu rezultāts, kas ir arī darba autora starptautisko rakstu pamatā.

Promocijas darbā ir izklāstītas šādas 10 publikācijas.

1. L. R. Adrians, **D. Repole** un L. Ribickis, “Piešķirums neironu orientēto mācīšanās šķēršļu novēršanai AMBO robotā”, 2015. gada Rīgas Tehniskās universitātes 56. starptautiskā zinātniskā enerģētikas un elektrotehnikas konference (RTUCON), Rīga, 2015, 1–5. lpp.
2. Jānis Voitkans, L.R. Adrians, **Donato Repole**, “PCB PĀRVEIDOTĀJA ELEKTRISKO PARAMETRU IZPĒTE” 15. starptautiskā zinātniskā konference: Inženierzinātne lauku attīstībai 25.–27.05.2016 Jelgava, LATVIJA, 1445.–1452. lpp.
3. L. R. Adrians, **D. Repole** un L. Ribickis, “Augstas efektivitātes modulārs līdzstrāvas-līdzstrāvas pārveidotājs tā pielāgošanai industriālajai un hibrīdai robotikai”, 2016. gada Rīgas Tehniskās universitātes 57. starptautiskā zinātniskā enerģētikas un elektrotehnikas konference (RTUCON), Rīga, 2016, 1.–5. lpp.
4. L. R. Adrians un **D. Repole**, “Inteliģents autonomas vides monitorings, kas balstīts uz AMBOA robota maņu sistēmu”, 2017. gada IEEE Rīgas Tehniskās universitātes 58. starptautiskā zinātniskā enerģētikas un elektrotehnikas konference (RTUCON), Rīga, 2017, 1.–6. lpp.
5. **D. Repole** un L.R. Adrians, “Faziloģikas nano pjezo hibrīds defektu noteikšanai automobiļu jaudas PCB”, 2017. gada IEEE 37. starptautiskā elektronikas un nanotehnoloģiju konference (ELNANO), Kijeva, 2017, 400.–404. lpp.
6. **D. Repole** un L.R. Adrians, “GaN MOSFET novērtējums bezpilota lidaparātiem ar BLDC motora piedziņu”, 2018. gada IEEE Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā enerģētikas un elektrotehnikas zinātniskā konference (RTUCON), Rīga, Latvija, 2018, 1.–4. lpp.
7. **D. Repole** un L. R. Adrians, “Ievads paralēlajā MAS vadībā MAS – viedajiem sensoru tīkliem”, 2019. gada IEEE Rīgas Tehniskās universitātes 60. starptautiskā enerģētikas un elektrotehnikas zinātniskā konference (RTUCON), Rīga, Latvija, 2019, 1.–5.lpp.
8. L. R. Adrians, **D. Repole** un A. Rubenis, “Litija-jonu hibrīdo superkondensatoru salīdzinošais pētījums”, 19. starptautiskās zinātniskās konference – inženierija lauku attīstībai, 20.–22.05.2020, Jelgava, LATVIJA, 906.–912. lpp. DOI:10.22616/ERDev.2020.19.TF217.

9. **D. Repole** un L. R. Adrians, “VHDL bāzes neironu faziloģikas litija jonu hibrīdu superkondensatoru vadība, neironu faziloģikas sistēmu augsta līmeņa aprakstu priekšrocības”, 2020. gada IEEE Rīgas Tehniskās universitātes 61. starptautiskā enerģētikas un elektrotehnikas zinātniskā konference (RTUCON), Rīga, Latvija, 2020. gada 5.–6. novembrī.
10. Kristis Kviesis, Leslijs Robertss Adrians, Ansis Avotiņš, Oļegs Tetervenoks un **D. Repole**, “MAS koncepcija uz PIR sensoru bāzes apgaismojuma sistēmas vadības lietojumprogrammām”, 8. IEEE seminārs par informācijas, elektronikas un elektrotehnikas sasniegumiem (AIEEE'2020), Viļņa (Lietuva) 2021. g., pieņemts publicēšanai (ID: PID014).

# 1. BEZPILOTA TRANSPORTLĪDZEKĻI NO IEKŠPUSES

Mūsdienās bezpilota transportlīdzekļi kļūst arvien populārāki. Lai gan pēdējo desmitgažu laikā bezpilota transportlīdzekļus galvenokārt lietoja militārām vajadzībām, šobrīd bezpilota transportlīdzekļus ir iespējams novērot arī rūpnīcās, uz ielām, civilajos lidlaukos un pilsētu parkos. Bezpilota transportlīdzekļus var iedalīt trīs grupās:

- a) bezpilota sauszemes transportlīdzekļi;
- b) bezpilota lidaparāti;
- c) bezpilota zemūdens transportlīdzekļi.

Iepriekšējās desmitgadēs “**bezpilota sauszemes transportlīdzekļi**” (*UGV*) galvenokārt attiecās uz robotiem, īpaši iekštelpu robotiem, ko izmantoja preču pārvadāšanai no noliktavas līdz rūpnīcas darba vietai. Dažu pēdējo gadu laikā straujās tehnoloģiskās attīstības rezultātā tirgus piedāvājumā bija daudz jaunu *UGV* gan militārām, gan civilām vajadzībām. Visizcilākie militārie lietojumi ir:

- a) manipulācijas ar bīstamiem objektiem;
- b) pētniecība;
- c) krājumu piegāde.

*UGV* izmantošana civilām vajadzībām atbilst promocijas darba pētījumiem, kuru vidū iespējams izcelt dažus aizraujošus lietojumus:

- a) industriālām vajadzībām (autonomie roboti jeb AR);
- b) bezpilota sauszemes transportlīdzekļi pakalpojumiem (*UUGV*);
- c) cilvēku pārvadāšana.



1.1. attēls. “Industriāla sauszemes transportlīdzekļa” piemērs.

**Bezpilota lidaparāti** (*UAV*) ir plašāk izplatītā bezpilota transportlīdzekļu kategorija, galvenokārt tāpēc, ka *UAV* ietekmē militārās kaujas stratēģijas un paņēmienus. Arī civilajā tirgū



novēro plašu interesi par *UAV*, kas paredzēti dažādiem nolūkiem. Augoša lētu un izturīgu akumulatoru pieejamība kombinācijā ar zemām izmaksām un augstas veiktspējas elektroniku vadības ierīcēm un jaudas elektronikai ļāvis izplatīties maza izmēra hobija līmeņa *UAV* (plaši pieejami parastos elektronikas veikalos). Ir diezgan ierasts parkos novērot lidojam kvadrakopterus vai mazus lidmašīnu modeļus, kas vai nu tiek vadīti ar viedtālruna palīdzību, vai lido pilnīgi autonomi.

**Bezpilota zemūdens transportlīdzekļus** (*UUV*) var iedalīt divās kategorijās: “attālināti vadāmi zemūdens transportlīdzekļi” (*ROUV*) un “autonomie zemūdens transportlīdzekļi” (*AUV*). Agrāk *UUV* spēja izpildīt tikai ierobežotu uzdevumu skaitu, ko diktēja citur pieejamā tehnoloģija. Ir iespējams izcelt četrus galvenos *UUV* lietojumus.

- a) **Komerčiālais:** *UUV* ir ļoti populāri naftas un gāzes nozarē, kur tos izmanto dažādos veidos;
- b) **Militārais:** vairāku valstu flotes pašlaik ražo *UUV*, ko izmantot karadarbībai uz ūdens, īpašu uzmanību pievēršot jūras izpētei, lai izslēgtu zemūdens mīnu draudus, vai atklātu nedraudzīgus objektus;
- c) **Pētījumi:** ezeru, jūru un okeāna dibena pētīšanai zinātnieki paļaujas uz neviendabīgu *UUV* daudzveidību;
- d) **Hobiji:** daudziem robotu entuziastiem patīk veidot un darboties ar *UUV* hobija līmenī.

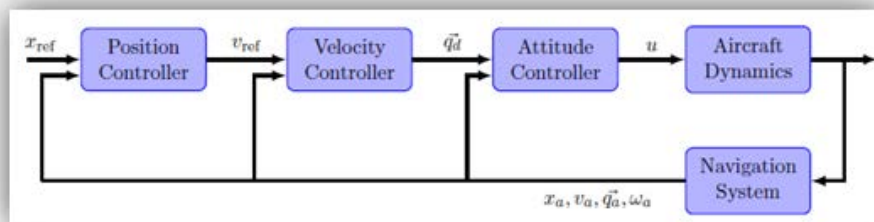
## 2. BEZPILOTA TRANSPORTLĪDZEKĻU VADĪBAS PAŅĒMIENI

Katram bezpilota transportlīdzekļa veidam ir īpaša vadības stratēģija, kas ļauj veikt noteiktus uzdevumus. Konkrētāk – kā piemērs būtu vadības stratēģija civilajiem UAV. Parasti, lai pārvaldītu UAV, var piemērot trīs dažādus vadības paņēmienus, kas ir:

- d) lineārā vadība;
- e) nelineāra vadība;
- f) AI – uz iemācīšanos balstīta vadība.

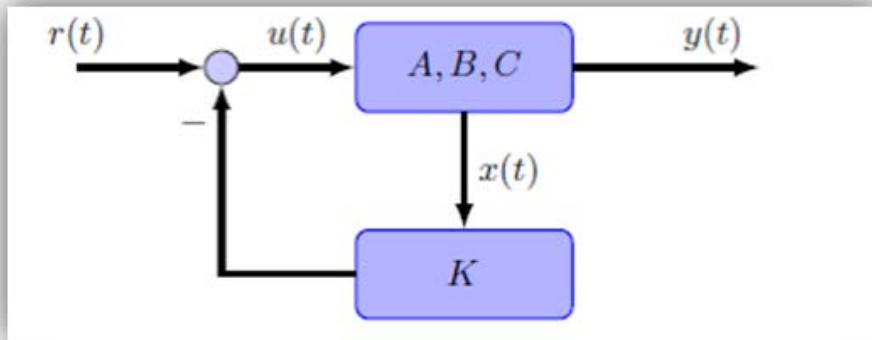
Būtībā ar lineāro vadību mēģina aptuveni aptvert sarežģītu nelineāru problēmu, lai gan to raksturo vienkāršots vienādojumu modelis, kas ietilpst lineārā sistēmā, ko iespējams apzīmēt kā klasiskās vadības atgriezeniskās saites cilpu. Dinamikas sarežģītības dēļ vadības dizainam ir divas pamatmetodes.

**Pirmā metode** nozīmē turpināt sadalīšanos iepriekšējā posmā, lai identificētu dinamikas komponentus, ko veiksmīgi vada īpašas izpildmehānismu izvēles un pēc tam veic secīgu cilpu slēgšanu [2].



2.1. attēls. Secīga cilpas slēgšanas vadības arhitektūra [2].

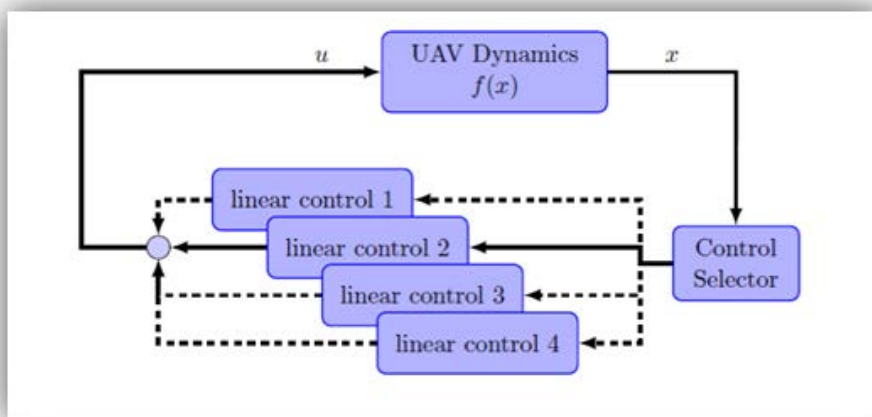
**Otra metode** nozīmē konstruēt kontrolleri pilnīgai dinamikai – vai nu lineāri, vai nelineāri. Šīs metodes priekšrocība ir tāda, ka tā izmanto stāvokļa telpas vadības paņēmienus, lai pilnībā apstrādātu ar to saistīto dinamiku. Tomēr ir grūti apstrādāt izpildmehānisma noslodzi, un ir ļoti grūti iekļaut stāvokļa ierobežojumus. Turklāt, ja vien tas netiek darīts ar īpašu piesardzību, šie kontrolleri, īpaši augstas veiktspējas lidojumos, var būt ļoti jutīgi pret modelēšanas kļūdām un trūkumiem [2].



2.2. attēls. Pilna stāvokļa atgriezeniskās saites controlleris [2].

Zinātniskā literatūra liecina, ka LTI sistēmās controllera konstrukcija var veikt vienkāršus uzdevumus, savukārt, runājot par nelineāru sistēmu, būtu jāapsver daži citi sarežģītāki paņēmieni, īpašu uzmanību pievēršot sistēmas stabilitātei. Visizplatītākās nelineārās vadības metodes ir:

- linearizācija (tuvināšana);
- atbildes reakcijas linearizācija;
- Ļapunova stabilitāte;
- CPWL (nepārtraukta gabalveida lineārā tuvināšana).



2.3. attēls. Shematisks attēlojums ieguvumiem izplānotajā shēmā UAV vadībai [3].

**“Uz mācīšanos balstīta kontrole” (LBC)** ir alternatīva pieeja bezpilota transportlīdzekļu vadībai, un tā varētu būt balstīta uz hibrīdu neironu faziloģikas tīklu, kas noregulēts ar ģenētiska algoritma palīdzību.

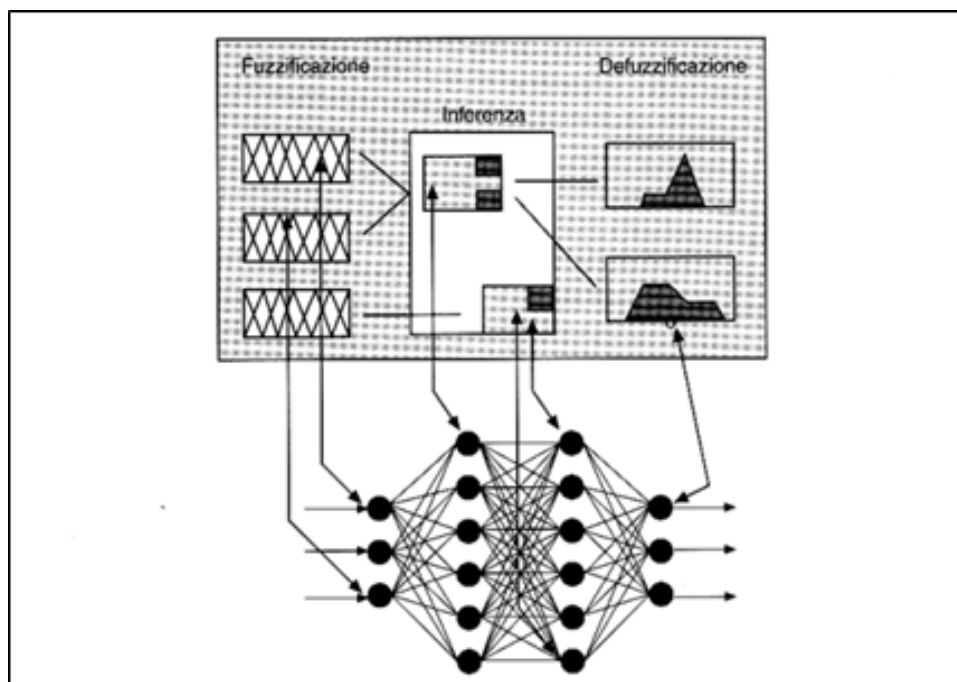
Praktiski sistēma izmanto tajā pieejamos parametrus vai digitāli apstrādātus diferenciālos parametrus kā konkrētas faziloģikas dalības funkcijas ievadi.

Faziloģikas sistēmu (MIF, MOF, FIS utt.) varētu apstrādāt īpašā neironu faziloģikas tīklā. Secīga neironu faziloģikas moduļu un ģenētisko algoritmu mijiedarbība spēj radīt neironu faziloģikas controlleri, ko noregulē ģenētiskais algoritms (apmācības process). Apmācības sistēma nodrošina sarežģītāku un precīzāku “faziloģikas izvedumu sistēmu” (FIS).

Parasti hibrīds neironu faziloģikas controlleris izmanto vairāku slāņu kombināciju, un tikai divas no tām būs pilnībā nolasāmas iekšējo slāņu dēļ. Kā pierasts, neironu faziloģikas sistēmai ir neironu faziloģikas slēptie slāņi.

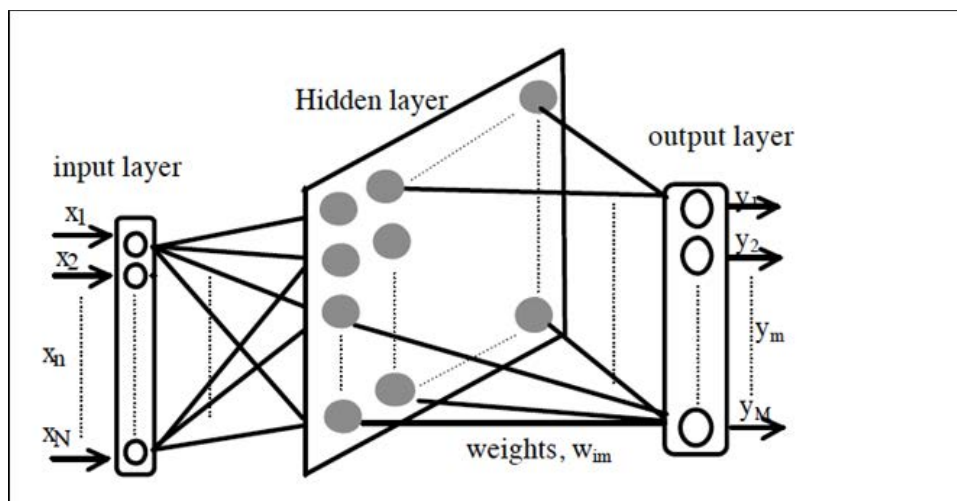
Pirmajā slānī ir visas “dalības ievades funkcijas” (MIF), ko UAV controllerī varētu iedalīt šādi:

- lidojuma dinamikas dalības funkcijas;
- trajektorijas dalības funkcijas;
- enerģijas novērtēšanas dalības funkcijas.



2.4. attēls. Neironu tīkla bloku shēmas attēlojums.

Katra MIF aktivizē noteiktu neironu grupu, un katra dalības funkcija aktivizē “statusa neironu”. Neironu faziloģikas apmācība (sasniegts slēptos slāņos) nosaka otrā slāņa neironu tīkla iezīmes un svaru.



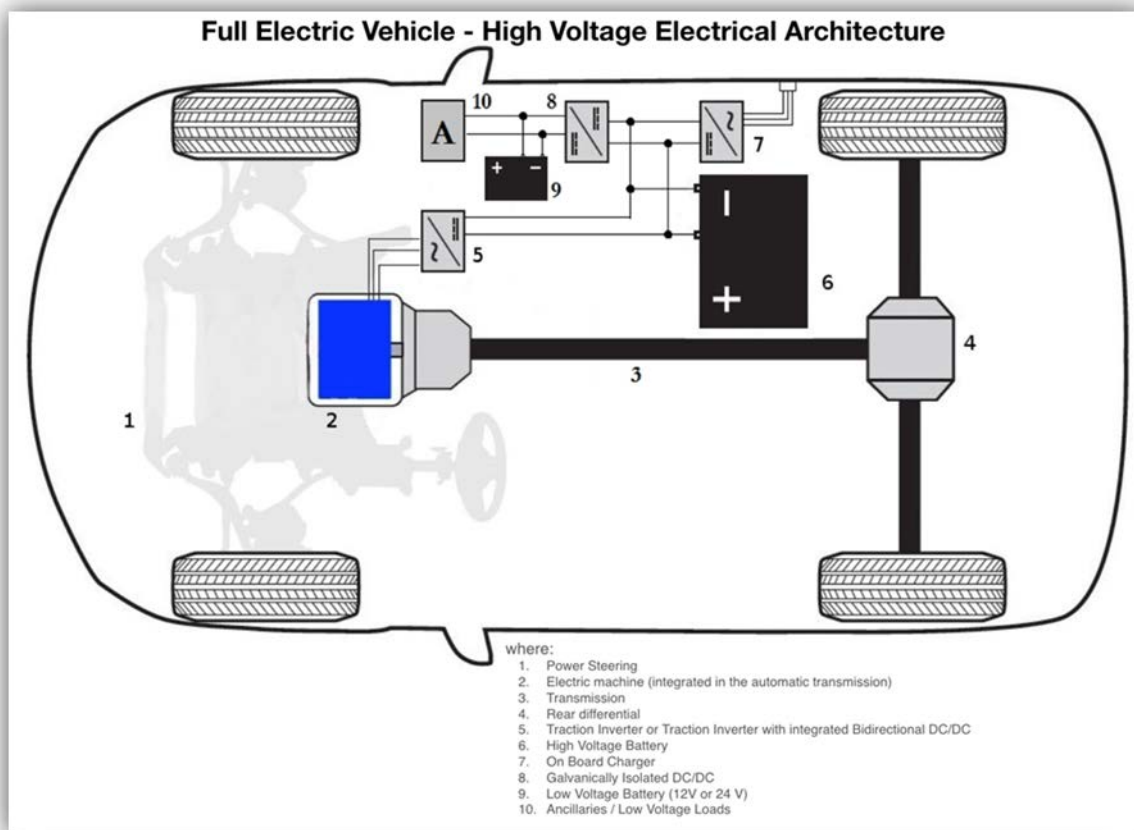
2.5. attēls. Hibrīds neironu fazilōģikas tīkls, slēptā slāņa attēlojums.

Šis otrais tīkls *UAV* vai robota gadījumā aktivizē izejas slāni, kas saistīts ar tā izpildmehānismiem un tā piedziņas aparāturu.

### 3. TIPISKĀ ELEKTRISKO TRANSPORTLĪDZEKĻU ARHITEKTŪRA

Autonomo bezpilota transportlīdzekļu (*AUV*) izstrāde un attīstība ir process, kas cieši saistīts ar transportlīdzekļu elektrizācijas procesu. Daļā autora pētījumu šis process tiek analizēts, izmantojot automobiļu lietojumprogrammas kā nozīmīgu pētījumu gadījumu.

Automobiļu tirgus elektrizācija nepārtraukti pieaug, un tiek prognozēts, ka jaunie noteikumi nostiprinās esošo tendenci. Patiesībā daudzas pilsētas un valstis visā pasaulē izvēlas stingrus “dīzeļdegvielas dzinēju” ierobežojumus pilsētu teritorijās, atsevišķos gadījumos – dažus būtiskus ierobežojumus arī “benzīna dzinējiem”. E-mobilitātes process ietekmēs visu pilsētas transportu (privāto un sabiedrisko), kas nozīmē, ka transportlīdzekļa lietojuma funkcijā jauno noteikumu izpildei ar viszemākajām ražošanas izmaksām tiks izmantota īpaša arhitektūra. *EV/HEV* raksturojuma dēļ vissvarīgākais regulējums, ko būtu īpaši jāuzsver, ir “*UN/ECE-R100*”. Šis noteikums nosaka galvenās prasības attiecībā uz elektrisko drošību un skaidri nosaka arhitektūru transportlīdzekļa *REESS* (uzlādējamas enerģijas uzglabāšanas sistēmas) funkcijās [4].



3.1. attēls: EV “Augstsprieguma arhitektūra” piemēra attēlojums.

## 4. TEORĒTISKAIS IETVARS

Promocijas darba projekta pamatā ir tāda *AUAV* kontrolera izgatavošana, kam piemīt mācīšanās funkcija. Autora pamatidejas ir saistītas ar “faziloģikas” un “neironu tīklu” jomu.

Faziloģikas algoritmi paredzēti tradicionāliem mikrokontrolleriem, kam ir zemas izmaksas, taču, ņemot vērā, ka to uzbūve nav paredzēta, lai apstrādātu faziloģiku, programmatūras piekaimētās izmaksas bieži padara veiktspēju neiespējamu. Īpašas faziloģikas procesora mikroshēmas var apmierināt visaugstākās veiktspējas vajadzības [5].

Promocijas darba sākumā aprakstīta augsta līmeņa projekta pieejas sīka izpēte. Augsta līmeņa aprakstu metodikas izmantošana faziloģikas kontroleru modelēšanai ievērojami samazina to izstrādes laiku, ļaujot ātri noformēt pielāgotu faziloģikas aparatūru. *VHDL* dizaina uztveršanai un uz *VHDL* balstīta loģikas sintēze izrādījās efektīva metode sarežģītas aparatūras izstrādei.

Tomēr, lai aprakstītu tādas ikdienišķas struktūras kā galīgi automāti, piemērotāka varētu būt cita pieeja. Lai aprakstītu šādas struktūras, var izmantot stāvokļa diagrammas. Turklāt komerciālais rīks, kam pamatā ir stāvokļa diagrammas, ietver *VHDL* ģenerēšanas iespēju sintezējama koda ģenerēšanai. Stāvokļa diagrammu formālisma izmantošana faziloģikas vadības sistēmas noteikumu bāzes uztveršanai ir visaptveroša zinātniskajā literatūrā izmantota pieeja.



Faziloģikas kontrolleris pakļaujas tradicionāliem saskarnes un informācijas apmaiņas principiem. Kontrollerī ārējās ierīces informācija (piemēram, sensors u. tml.) tiek pārveidota par izejas vadības signālu ierīces (vai vairāku ierīču) vadībai, izmantojot fazifikācijas, noteikumu novērtēšanas un defazifikācijas procesu. Šāda veida procesu pamatā ir dalības funkciju kopums un *FIS*. Vairākas publikācijas, piemēram, [5, 6, 7, 8 un 9], iezīmē procesu detaļas. Tomēr motivāciju faziloģikas kontrollera ieviešanai *VHDL* noteica nepieciešamība pēc lētas aparatūras vispārēja faziloģikas kontrollera rūpnieciskai un komerciālai izmantošanai. Šai pieejai ir vairākas citas priekšrocības. Lauka programmējamais ieejas bloks (*FPGA*) tiek izmantots kā aparatūras platforma, jo tas nodrošina ļoti lielu loģisko kapacitāti [10 un 11]. *FPGA* piemīt lielāka elastība nekā *ASIC*, jo mikroshēmu var pārprogrammēt, ļaujot pārveidot sistēmas ķēžu daļas to optimizācijai [12]. Izmantojot nelielu, ekonomisku *FPGA* faziloģikas kontrollera izstrādei, ir iespējams pilnībā izmantot faziloģikas (un neironu tīklu) paralēlās skaitļošanas iespējas [13].

Pēc paralēlā skaitļošanas procesa norises būtiska *FPGA* izmantošanas priekšrocība ir iespēja iegūt uz maināmiem blokiem balstītu programmatūru, kurā elementi, kas saistīti ar katru “Likumbāzi”, norāda uz neatkarīgu “*VHDL* komponentu”. Katram “*VHDL* komponentam”, ja tiek izmantots standarta pārvešanas izkārtojums, varētu būt iespējams iestatīt kontrollerim galvenos stāvokļa mehānismu algoritmus, kas veiktu tikai divas darbības:

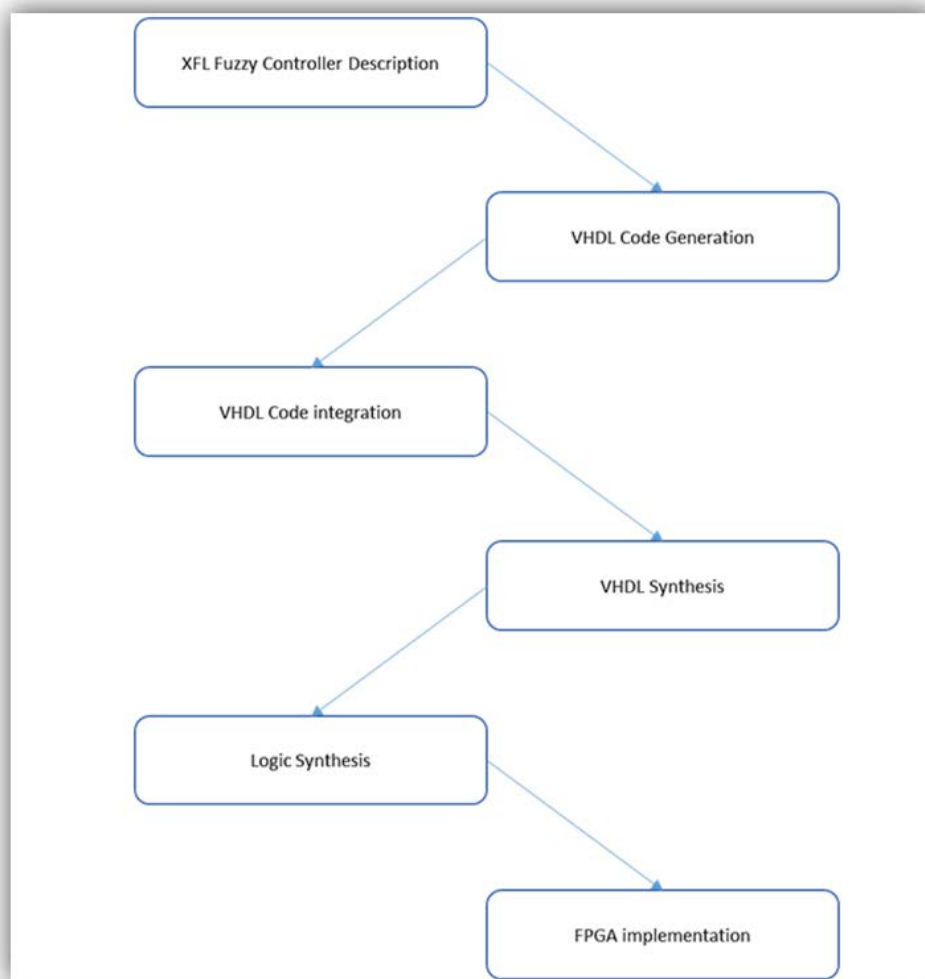
- pielāgotu algoritma elementus (“komponentu līmenī” pielāgotu vai aizstātu noteikumus, dalības funkcijas utt.);
- definētu katras “Likumbāzes” jauno svaru (algoritmus var apmācīt, lai sasniegtu perfekti noregulētu sistēmu) [13].

Šis risinājums nodrošina dinamisku *FIS* regulēšanu, izmantojot mākonī vai īpašu mācīšanās procesu, kas raksturīgs neironu tīkla plānojumam. Iespējot šo funkcionalitāti, tālāk ir iespējams ietekmēt konkrētas “ierīces” rīcību, pielāgojot “kontrollera rīcību” konkrētiem uzdevumiem vai vides apstākļiem.

Viens no faziloģikas sistēmu, neironu tīklu un neironu faziloģikas sistēmu rezultativitātes galvenajiem virzītājiem ir to spēja aptuveni noteikt nepārtrauktas nelineāras funkcijas. Šajā jomā faziloģikas un neironu faziloģikas sistēmām tiek minēts liels skaits darbu, kas atbalsta *FPGA* un *VHDL* izmantošanu sarežģītu nelineāru neironu faziloģikas kontrolleru izstrādāšanai.

Īpaša uzmanība tiek pievērsta jaunu aprakstu formātu izpētei, lai varētu neatkarīgi aprakstīt gan faziloģikas sistēmas struktūru, gan apstrādes algoritmu. Šāda veida aprakstu formāti ļauj izmantot valodas ierobežojumus, lai koncentrēti skatītu noteikumus, kas nosaka sistēmas rīcību. Ņemot vērā šo, ir izdevīgi izmantot integrētu programmatūru, kas spēj pārveidot uz faziloģiku orientētu valodu *VHDL* kodā [14 un 15].

“*XFUZZY XFL 3.5* versijas” *GUI*, kas izstrādāta “*Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE-CNM)*”, novērtējuma rezultāti ir nozīmīgi faziloģikas kontrolleru aprakstiem (vai neironu faziloģikas kontrolleriem – pēc mācīšanās/apmācības procesa), un pēc tam šo aprakstu pārveido par funkcionējošu *VHDL* kodu.



4.1. attēls. Izvēlētā plānojuma plūsma.

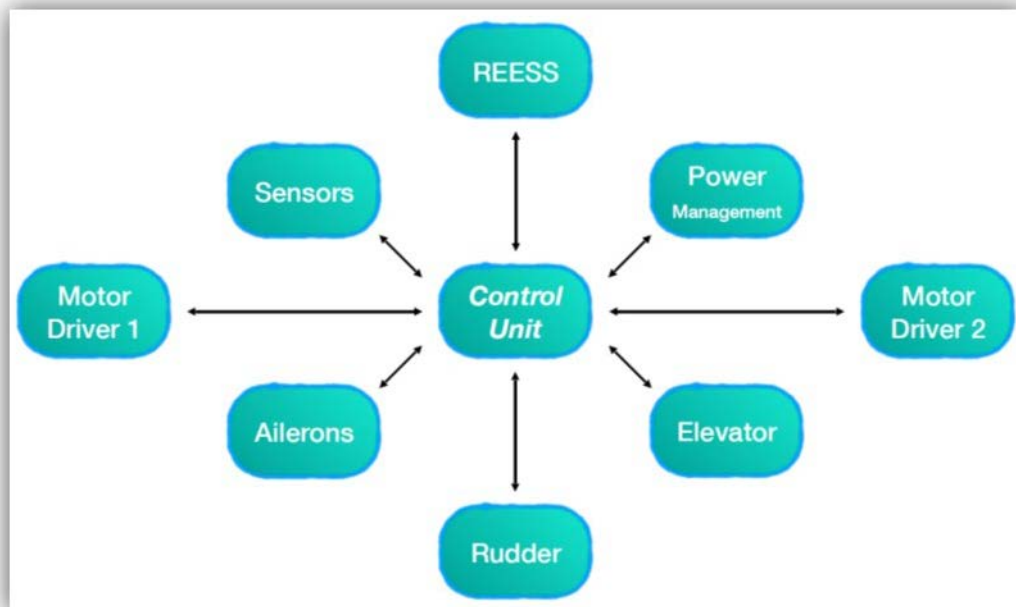
## 5. PRIEKŠLIKUMS SISTĒMAS APARATŪRAS PLĀNOJUMAM

Kā iepriekš minēts, tiek plānots izmantot vienkāršotu *RC* lidmašīnas mehānisko konstrukciju tikai kā pēdējo izskatāmo variantu kontrolera izveidei – paštaisītu, trīsdimensionāli izdrukātu lidaparātu procesa gaitā ar iepriekš minētajiem algoritmiem varētu pārveidot par *AUAV*. Divu motoru lidspārnu platforma tiek izmantota kā etalons kontrolera izveidei.

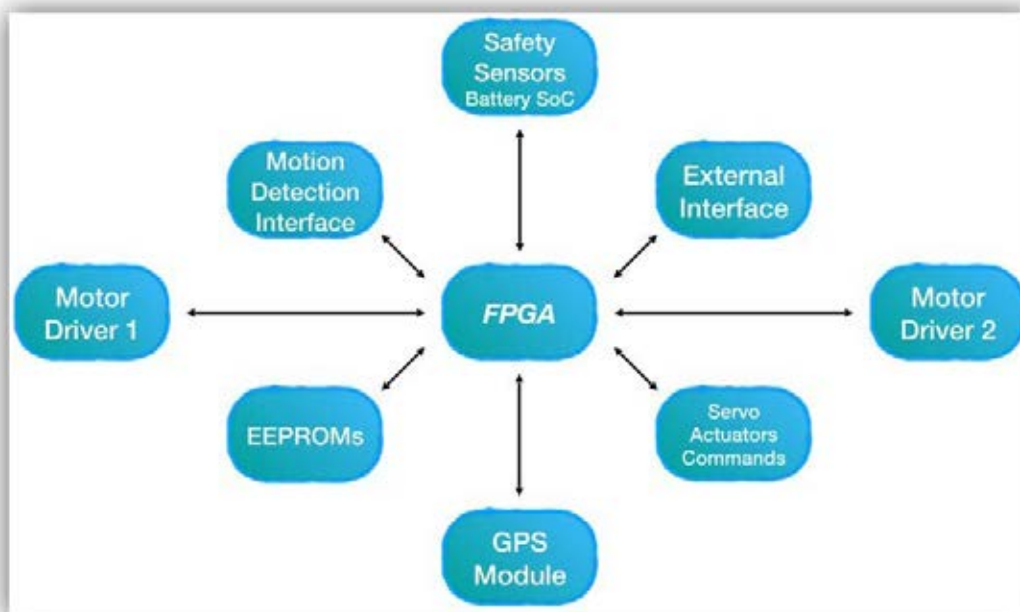
Konkrētajā gadījumā elektroniskās aparatūras projekts ir izstrādāts, lai veiktu dažas funkcijas, konkrētāk:

- definētu pamata elektroniku/aparatūru, kas nepieciešama “autonomajam lidojuma režīma controllerim”;
- definētu aparatūru, kas nepieciešama neironu faziloģikas controllerim;
- definētu aparatūru, kas nepieciešama mācīšanaš/apmācības procesam.

5.1. un 5.2. attēlā redzamas izmantotās elektroniskās aparatūras bloku diagrammas. Sistēmas galvenā vienība ir *FPGA*, kas vispirms darbojas kā sistēmas vārteja (apkopo un digitāli apstrādā visu perifērijas informāciju) un pēc tam darbojas kā sistēmas kontrolleris, veicot apkopotās informācijas paralēlu aprēķinu.



5.1. attēls. *HW* augsta līmeņa bloku diagramma.



5.2. attēls. *FPGA* perifērijas bloku diagramma.

## 6. PĒTĀMAIS GADĪJUMS, KONTROLLERA IZVEIDE

Kā aprakstīts iepriekš, darba pamatdoma ir samazināt aparatūras aprēķina slodzi, maksimāli piešķirot to *VHDL* neironu faziloģikas kontrollerim. Šī stratēģija ir īstenojama, samazinot transportlīdzeklī uzstādīto sensoru līdž minimumam, sameklējot izdevīgu kompromisu starp mehāniskajiem ierobežojumiem, pieejamo elektronikas aparatūru/sensoriem un lidojuma vadības principiem.

Pirmais solis kontrollera izveidē ir “sistēmas ieeju” identificēšana kā “sistēmas vides mainīgie lielumi” vai “korpusa mainīgie lielumi”, “izpildmehānismi” vai “sistēmas izejas” un pēc tam to sasaistīšana ar “pārvedes funkciju”. Promocijas darba centrā ir neironu faziloģikas kontrolleris, tāpēc “sistēmas pārvedes funkcija” ir visu *MIF*, visu *MOF* un visu “Likumbāzu” (vai “*Hedge Block*”) kopa [16].

Nākamās darbības mērķis ir definēt norādīto *VHDL* komponentu kopu. Katrs komponents ir saistīts ar konkrētas sistēmas perifēriju, kas darbojas kā sistēmas perifērijas saskarne. Tiek pieņemts, ka kontrollera kodolam ir nepieciešami šādi ievades parametri:

- a) augstums virs jūras līmeņa;
- b) ātrums;
- c) garensvārstību leņķis;
- d) rites leņķis;
- e) orpēšanas leņķis;
- f) aprēķinātā pozīcija;
- g) lidojuma atskaites parametri;
- h) tuvuma sensors;
- i) akumulatora SoC.

Tālāk izrietošais sistēmas projektēšanas pieņēmums ir tāds, ka neironu faziloģikas kontrolleris ģenerē šādus izejas signālus:

- a) kreisās puses *E-Motor* griezes momenta pieprasījums;
- b) labās puses *E-Motor* griezes momenta pieprasījums;
- c) eleroni *SERVO-Motor*, *PWM* vadības signāls;
- d) pacēlāji *SERVO-Motor*, *PWM* vadības signāls;
- e) virzienstūres *SERVO-Motor*, *PWM* vadības signāls.

Lidojuma kontrollera izstrādes pamats ir saistīts ar *FIS* izstrādi, ko var panākt, aprakstot piecu “Likumbāzu” kopu *XFL3* vidē.

*XFUZZY GUI* ietver dalības funkciju kopu “tipā”, kas parasti ir saistīts ar sensoru vai izpildmehānismu. Kontrollera fizisko “ievades mainīgo” un “izejas mainīgo” *GUI* definīcijai nepieciešams jau esošs vides “tips”, ar ko to sasaistīt.

Var droši apgalvot, ka **faziloģikas sistēmas izveide “*XFUZZY*” (vai “*XFL3 GUI*”) vidē parasti sākas ar “operatora kopas” definīciju.** “Operatora kopa” “*XFL3 GUI*” vidē ir objekts, kas satur matemātiskās funkcijas, kas piešķirtas katram faziloģikas operatoram. Faziloģikas operatori var būt bināri (piemēram, T normas un S normas, kas tiek izmantotas, lai attēlotu valodas mainīgos savienojumus, implikācijas vai noteikumu apkopojumus), unāri (piemēram, C normas vai operatori, kas saistīti ar valodas ierobežojumiem) vai arī tie var būt saistīti ar “defazifikācijas metodēm” [15].

**Faziloģikas sistēmas aprakstā otrais solis ir valodas mainīgo tipu izveide, izmantojot “tipa izveides saskarni”.** Jaunajam “tipam” nepieciešams identifikators un diskursa visums (minimums, maksimums un kopskaits). Saskaņā ietver vairākus iepriekš formulētus tipus, kas atbilst visparastākajām visumu sadalījumiem. Šie iepriekš formulētie tipi sastāv no viendabīga trijstūrveida, trapecveida, zvana formas un vienpusēja sadalījuma, kā arī no plecveida trijstūrveida (*shouldered-triangular*) un plecveida zvana (*shouldered-bell*) formu sadalījumiem. Citi iepriekš formulētie tipi ir simetriski zvana (*equal bells*) un vienpusēji (*singletons*), ko parasti izmanto kā pirmo opciju saistībā ar izejas mainīgo tiem. Kad tiek atlasīts kāds no minētajiem iepriekš formulētajiem tiem, jāievada sadalījuma dalības funkcijas numurs [15].

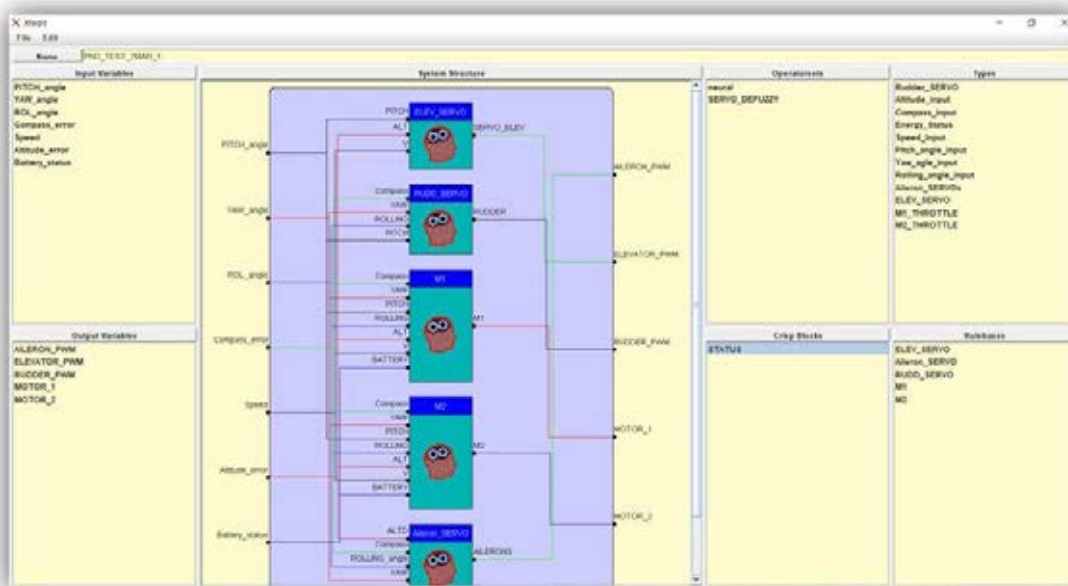
*XFL3* tips ir elements, ko raksturo valodas mainīgā paveids. Tas ietver tā diskursa visuma formulēšanu, visuma aptverošo valodas iezīmju nosaukšanu un dalības funkcijas, kas saistīta ar katru iezīmi, precizēšanu. Valodas iezīmes var formulēt divējādi: brīvas dalības funkcijas vai dalības funkciju saime. Otrajā gadījumā iepriekš jāformulē dalības funkciju saime. Brīva dalības funkcija izmanto savu parametru kopu, un saime koplieto šīs saimes parametru kopu. Tas noder, lai samazinātu parametru skaitu un parādītu ierobežojumus starp valodas iezīmēm (piemēram, secību vai noteiktu pakāpi, kas pārklājas) [15].

Šādi formulētie tipi automātiski pārņem diskursa visumu un to priekšteču iezīmes. Tipu kopumā formulētas iezīmes tiek vai nu pievienotas priekšteču iezīmēm, vai arī pārrakstītas, ja tām ir vienādi nosaukumi.

**Trešais solis faziloģikas sistēmas formulēšanā ir aprakstīt katru “Likumbāzi”, kas izsaka saistību starp sistēmas mainīgajiem.**

Precīzs “operatoru kopu”, “mainīgo tipu” un “Likumbāzes” formulējums ir propedeutiska attiecībā pret faziloģikas sistēmas izveides progresu. Globālo ievades un izvades mainīgo definīcija, izmantojot “mainīgo īpašību” saskarni (*GUI* logu), ir nākamais izveides solis.

**Noslēdzošais solis faziloģikas sistēmas formulēšanā ir tās hierarhiskās struktūras apraksts.**



6.1. attēls. *XFL3* GUI lidojuma kontrollera apraksts.

Pirms eksportēt faziloģikas lidojuma kontrolleri *VHDL* valodā, ieteicams īstenot vairākas simulācijas un optimizēt faziloģikas lidojuma kontrolleri, ja tas iespējams. Pastāv vairāki veidi, kā veikt faziloģikas kontrolera simulāciju. Autors dod priekšroku *XFUZZY* videi un tās *GUI* pieejamām funkcionalitātēm. Konkrētajā gadījumā tiek izmantotas šādas *GUI* funkcijas:

- kontrolera grafiskais attēlojums;
- tipa dalības funkciju optimizācija;
- likumbāzes optimizācija;
- faziloģikas kontrolera rīcības “monitorēšana”.

No minētajām funkcijām autors izvēlēties uzsvērt funkcionalitātes “pieņēmumu monitorēšana” izmantošanu, lai veiktu neapstrādātu kontrolera simulāciju. Neapstrādātas simulācijas “mērķis” ir pārbaudīt “kontrolera reakciju” noteiktos apstākļos, piemēram, pacelšanās, nosēšanās, maršruta pielāgošana, līdzsvara stāvokļa lidojums (vienmērīgs lidojums), brāzmaina vēja kompensācijas manevrs utt.

Mērķis ir izmantot šīs simulācijas iznākumu, lai īstenotu likumbāzes “svaru” un “funkciju” pielāgošanu, kam pamatā ir darbības atkārtojumi, pirms *VDLH* algoritmu eksportēšanas vai jebkādu mācīšanās procesu veikšanas.

Simulācijas process sniedz iespēju testēt *VHDL* kontrolera darbību, kas jāiekļauj sarežģītā fiziskā kontrolerī ar plašākām iespējām. Tam ir daudzslāņu struktūra, ko var saistīt ar jebkuru hierarhisku aparatūras shēmas izveidi. “Augšējais slānis” attiecas uz perifērijas vienību saskarnēm un mijiedarbību starp perifērijas vienībām un lidojuma kontrolera centru. Tipisks *VHDL* shematiskais *RTL* skats, kas radies pēc algoritma sintēzes, ļauj lietotājam pārredzēt visu sistēmu kā bloku masīvu, kas savienoti viens ar otru un ar datu kopni, kā arī individuāliem ciparu signāliem.

*VHDL* koda izveide iekļauj iepriekš minētās funkcijas datu ieguves darbību veikšanai (transportlīdzekļa telemetrija), kas paredzēts darbībai divos gadījumos – ja sistēma darbojas “autonomā režīmā” vai “apmācības režīmā”.

Pēdējā izstrādes iterācija ir saistīta ar mācīšanās/apmācības procesa izpildi. Promocijas darbā ir aprakstīts priekšlikums, kurā izmantots *XFUZZY GUI* “mācību rīks”. Sagatavošanās nosacījums ir izmantot apmācības failu, kas ir saderīgs ar “mācību rīku”. Tam nepieciešams, lai ārējā atmiņā saglabātie neapstrādātie dati tiktu pārsūtīti uz lietotāja datoru un pēc tam apstrādāti, lai nodrošinātu ievades/izvades informācijas modeļa atbilstību “mācību rīka” standartiem (kā arī failam jānorāda paplašinājums *.trn*).

Konfigurāciju jāsāk ar mācīšanās pieejas izvēli. Darba autors pamato savu izvēli par labu uzraudzītām mācīšanās metodēm ar to, ka tad uzmanības centrā ir sistēmas rīcība, kas rodas no apmācības ievades/izvades datu kopuma.

Nākamais konfigurācijas solis ir mācīšanās algoritma izvēle. Autors ir izvēlēties “gradienta nolaišanās algoritmus”, kas ir plaši pazīstami algoritmi, ko izmanto faziloģikas sistēmu mācīšanās procesos. Lai gan visizplatītākais variants ir “atpakaļizplatīšanas algoritms”, ieteicams izmantot “Manhetenas algoritmu”. Šī lēmuma galvenā doma ir algoritmu pamatā esošie principi. “Atpakaļizplatīšanas algoritms” modificē parametru vērtības proporcionāli kļūdas funkcijas gradientam, tādējādi sasniedzot lokālo minimumu. Šī algoritma konverģences ātrums ir lēns, tāpēc ir izdevīgas dažādas modifikācijas, piemēram, atšķirīgs katra parametra



apgaves ātrums vai heuristiska algoritma vadības mainīgo pielāgošana. “*RProp* algoritmam” ir tieši šī stratēģija, un tas ievērojami uzlabo konverģences ātrumu, ņemot vērā divu secīgu iterāciju gradienta vērtību, sniedzot informāciju par kļūdas funkcijas izliekumu. Savukārt “Manhetenas algoritms” ir izvēlēts tāpēc, ka tas nodrošina veiksmīgu kompromisu starp algoritma precizitāti un nepieciešamo skaitļošanas jaudu.

Nākamais konfigurācijas solis ir kļūdas funkcijas izvēle. Autors kā atbilstošu opciju pieņem noklusējuma funkciju “vidējā kvadrātiskā kļūda”.

Pēc konfigurācijas rīku izvēles tiek identificēts labākais apstrādes algoritms, ko varētu izmantot izveidotās faziloģikas sistēmas vienkāršošanai. Apstrādes algoritmus var piemērot sistēmai pirms pielāgošanas procesa (pirmapstrādes opcija) vai pēc tā (pēcmapstrādes opcija).

Autors izvēlas izmantot “pēcmapstrādes opciju”. Lai pabeigtu procesu, ir jāizvēlas atzarošanas algoritms, kas saīsina noteikumus un samazina dalības funkcijas. Autors dod priekšroku visneveiksmīgāko “N” likumu atzarošanas metodei.

Pēdējais konfigurācijas solis ir gala nosacījuma formulēšana. Obligāti jānorāda, kā noslēgsies mācīšanās process. Šis nosacījums ierobežo atkārtojumu skaitu, maksimālo kļūdas mērķi vai maksimālo absolūto vai relatīvo novirzi (ņemot vērā gan apmācību, gan testa kļūdu iespējamību).

Autora sākotnējā “galīgā stāvokļa” iestatīšana nosaka 25 atkārtojumu limitu. Turpmākajos autora pētījumos galvenā uzmanība varētu būt pievērsta sarežģītāku un lietojumprogrammām pielāgotu iestatījumu uzlabojumu noteikšanai. Šajā promocijas darbā nav aplūkotas obligātās rīku konfigurācijas, lai gan tās potenciāli var izmantot turpmākajā izpētē.

## 7. SECINĀJUMI

Promocijas darba ievadā sniegts pārskats par bezpilota transportlīdzekļiem pašreiz pieejamajām tehnoloģijām un nākotnes tehnoloģisko attīstību. Ievada daļa noslēdzas ar autora pētījumu analīzi, kurā definēta:

- promocijas darba aktualitāte;
- promocijas darba galvenā hipotēze un ieceres;
- pētniecības un attīstības metodes;
- promocijas darba zinātniskā novitāte;
- promocijas darba pētījumu rezultātu praktiskais lietojums;
- pētījuma rezultātu izplatīšana.

Darba otrā daļa veido promocijas darba pieteikuma teorētisko pamatu. Šajā daļā ir skaidri noteikti darba mērķi un izstrādāta stratēģija to sasniegšanai. Īpaša uzmanība tiek pievērsta faziloģisko kontrolleru un neironu faziloģikas kontrolleru lietojuma un izstrādes akadēmisko pētījumu analīzei. Darbības mērķis ir izveidot pamatus, uz kuriem balstīt idejas kontrollera izstrādes stratēģijai. Sākotnējā pētījuma rezultāti ir šādi:

- darba galīgais mērķis ir izstrādāt kontrolleri, kas spēj atdarināt cilvēka pilota rīcību, vadot nelielu *RC* lidmašīnu;
- otrais darba mērķis ir izveidot kontrolleri, ko varētu noregulēt atbilstoši aparatūras funkcijām (maza fiziska *UAV* vai *RC* lidmašīna, kas spēj veikt autonomas darbības);
- neironu faziloģikas kontrolleris kļūst par vadības stratēģiju, kas paredzēta nelielam *UAV*;
- ņemot vērā šī brīža pieņēmumus, neironu faziloģikas kontrollerim ir septiņas ieejas un piecas izejas;
- pēc detalizētas akadēmiskās literatūras apskata ir skaidrs, ka *FPGA* var izmantot kontrollera apstrādei;
- *FPGA* izvēli nosaka spēja to pielāgot un paralēli apstrādāt vairākas funkcijas (paralēlas skaitļošanas iespējas);
- *VHDL* tiks izmantota kā sistēmu darba platforma, lai gan *VHDL* valodai ir daži ierobežojumi, salīdzinot ar citu uz faziloģiku orientētu valodu pielāgojamību un izteiksmīgumu;
- lai īstenotu rīcības modelēšanu, autors iesaka izmantot *VHDL* apraksta stilu, kurā sistēmas struktūras apraksts (faziloģikas kopas, likumbāze) un operatora apraksts (savienojamība, faziloģiskas darbības) ir formulēti atsevišķi (tas ļauj neatkarīgi aprakstīt gan faziloģikas sistēmas struktūru, gan apstrādes algoritmu);
- apraksta formāts ļauj izmantot valodas ierobežojumus, lai noteikumus, kas nosaka sistēmas rīcību, padarītu lakoniskākus (izmantojot šo pieeju, būtiska priekšrocība ir tāda rīka pieejamība, kas spēj iztulkot uz faziloģiku orientētu valodu *VHDL* kodā ar *GUI* saskarni);

- konkrētais darbs, kurā aprakstīts faziloģiskais kontrolleris un pēc tam šis apraksts pārveidots atbilstošā *VHDL* kodā, izmantojot *XFUZZY XFL 3.5 GUI* (jeb *XFL3*), kas izstrādāts *Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE-CNM)*;
- *XFL3* apraksta valoda ir izstrādes vide, kas atvieglo faziloģikas pieņēmumu sistēmu specifiku, verifikāciju un sintēzi;
- būtisko funkciju kopums, saukts par *XFL* bibliotēku, veic *XFL* specifiku parsēšanu un semantisko analīzi, kā arī uzglabā tās, izmantojot abstraktu sintakses koku.

Darba trešajā daļā aprakstīta nelielas *RC* lidmašīnas, ko var pārveidot par nelielu *AUAV*, aparatūra. Aparatūras apraksts aptver gan elektronikas aparatūras aprakstu, gan mehānisko aparatūras aprakstu. Mehāniskais apraksts ietver vienkāršas *RC* lidmašīnas aprakstu, kas darbojas, pateicoties zemsprieguma *REESS* (saskaņā ar “Reg.100” zema sprieguma *REESS* formulējumu) un divu neatkarīgu zemsprieguma *BLCD* E-Motoru komplektu. Elektronisko sistēmu apraksts ir visaptverošs, ņemot vērā to, kā tika veikts formulējums. Darba galvenais mērķis, kā pamatā ir pārvietot izstrādes noslogojumu no mehāniskās konstrukcijas uz kontrollera konstrukciju, ir izmantot neironu faziloģikas kontrolleri, lai to pielāgotu transportlīdzekļa īpašībām, ļaujot vienkāršot bezpilota lidaparāta (vai *RC* lidaparāta) mehānisko konstrukciju.

Pētniecības un tehniskā darba pamatā ir kontrollera izveide, kas balstās uz daudzslāņu struktūru. Kontrollera izveide sākas ar “sistēmas ieeju”, “izpildmehānismu” vai “sistēmas izeju” identificēšanu un tad sasaista iepriekš minēto ar “pārvedes funkciju”. Promocijas darba centrā ir neironu faziloģikas kontrolleris, tāpēc sistēmas pārvedes funkcija tiek īstenota ar īpašas *MIF*, *MOF*, *FIS* (“Likumbāžu”) kopas palīdzību, kā arī ar mācīšanās procesu no apmācības faila.

*VHDL* kontrollera daudzslāņu struktūra ir saistāma ar jebkuru hierarhisku aparatūras shēmas projektējumu. “Augšējais slānis” attiecas uz perifērijas vienību saskarnēm un mijiedarbību starp perifērijas vienībām un lidojuma kontrollera centru.

Pirmā *VHDL* “augšējā slāņa” daļa sastāv no neatkarīgu bloku kopuma, kas īpaši paredzēts “sistēmas ievades” apstrādei. Katrs bloks neatkarīgi (paralēli) pārvalda kādu noteiktu sensoru un pēc tam digitāli apstrādā relatīvo informāciju, pirms pārraidīt datus uz “neironu faziloģikas kontrolleri” (kontrollera kodolu).

Otrā *VHDL* “augšējā slāņa” algoritma daļa ietver *VHDL* algoritmus, kas eksportēti no *XFUZZY GUI*. Neironu faziloģikas lidojuma kontrolleris ietilpst *VHDL* komponentā, ko sauc par *NEURAL*, un tā *VHDL* kods ir algoritma struktūras otrais hierarhiskais slānis. *NEURAL VHDL* komponents izmanto piecu apakškomponentu kopumu, no kuriem katrs ir veidots uz īpašas “likumbāzes”. Hierarhiskās sistēmās katrai “likumbāzei” tiek ģenerēts *VHDL* apraksts, kas pastāv neatkarīgi un ietilpst saistītajā apakškomponentā. Šajā apakškomponentu sastāvā esošais *VHDL* kods kļūst par trešo fiziskās kontrollera struktūras hierarhisko slāni.

Trešā *VHDL* “augšējā slāņa” algoritma daļa sastāv no neatkarīgu komponentu kopuma, kas īpaši paredzēts “sistēmas izejas” apstrādei. Katrs *VHDL* komponents ir saistīts ar vienu neironu faziloģikas kontrollera izeju. Katrs bloks neatkarīgi (paralēli) tiek sasaistīts ar neironu faziloģikas kontrolleri un digitāli apstrādā relatīvo informāciju pirms vadības signālu raidīšanas elektromehāniskajiem izpildmehānismiem.

Kontrollera izveidē galvenā uzmanība tiek pievērsta “neironu faziloģikas vienībai”. Šajā konstrukcijā tieši *XFUZZY GUI* ir ārkārtīgi efektīvs kontrolera aprakstam, izveidei, simulācijai, optimizēšanai un mācīšanās/apmācības procesam. Tehniskie priekšnosacījumi ir:

- ir pieņēmums, ka tiek panākta ievērojama aparatūras izstrādes vienkāršošana (mehāniska un elektroniska);
  - galīgais mērķis ir kompensēt aparatūras vienkāršošanu ar kontrolleri, ko var viegli noregulēt un kam ir mācīšanās funkcija;
  - mehāniskās aparatūras arhitektūra ir nedefinēta kā kontrolera konstrukcijas pamatlīnija;
  - elektroniskās aparatūras arhitektūra ir nedefinēta kā kontrolera dizaina pamatlīnija.
6. nodaļā veiktie pētījumi sniedz šādus nozīmīgus rezultātus:

- sintezējamās sistēmas *VHDL* koda *RTL* skati;
- pilnīgs “neironu faziloģikas” kontrolera apraksts;
- „kontrolera” optimizācijas stratēģija;
- kontrolera mācīšanās/apmācības izpildes stratēģija;
- detalizēta neapstrādāta, faziloģikas lidojuma kontrolera simulācijas analīze.

Ar iesniegtajiem pētījumiem un atvasināto “neironu faziloģikas” kontrolera konstrukciju autors vēlas panākt precīzu gala rezultātu – nodemonstrēt to, ka var pastāvēt pielāgojams un rentabls kontroleris, kas spēj atdarināt cilvēka pilota rīcību, kā arī spēj veikt korekcijas rīcībā, kas saistīta ar mācīšanās/apmācības procesiem.

Autors ļauj uz simulācijas analīzi, kas sniegta 6. nodaļā, lai demonstrētu kontrolera pamata rīcību, pielāgojamību, izturību un iespējamo attīstību nākotnē. Lai gan simulācijas analīze aptver plašu gadījumu loku, īpaša uzmanība tiek pievērsta kontrolera rīcībai sarežģītu manevru laikā, piemēram, pacelšanās un nosēšanās laikā.

Katrā manevra analīzē aprakstīts, ka kontroleris veic vienu darbību pēc otras, un ir sagaidāms, ka cilvēks pilots, visticamāk, varētu veikt tādas pašas darbības, ja saskartos ar līdzīgiem vides apstākļiem. Pārsteidzoši, bet kontroleris, kas vēl nav optimizēts un vēl nav apmācīts, var uzrādīt izcilus rezultātus. Lai gan rezultāts atbilst veiktajiem teorētiskajiem pētījumiem, varētu būt, ka pirms sistēmas (kas spēj veikt pilnīgi autonomu lidojumu) izveidošanas var būt nepieciešams veikt vēl virkni mācīšanās/apmācības darbību.

### **Konkrētās vadības stratēģijas kvalitātes analīze un secinājumi**

“Kontrolera kvalitātes” novērtējums *AUAV* jomā, kas konstruēts uz pielāgotas nelielas *RC* lidmašīnas, ir gan atšķirīgs, gan subjektīvs. Ir izteikti daudzi apgalvojumi par “kontrolera kvalitāti” un spēju veikt individuālus manevrus ārpus iepriekš noteiktiem vides apstākļiem. Mācīšanās/apmācības procesa ierobežojums ir tāds, ka neparedzamos apstākļos mācīšanās/apmācības process pēc definīcijas nav piemērojams (pēc definīcijas nav iespējams noformulēt apmācību neparedzamos apstākļos). Tas nozīmē, ka autors nevar pilnībā paļauties uz mācību procesa ieguldījumu, lai gan tas būtu svarīgs stratēģiskais ieguvums.

Līdz šim bijusi skaidra kontrolera spēja veikt manevrus iepriekš zināmos vides apstākļos, kur reljefs ir zināms un tiek kontrolēta transportlīdzekļa atrašanās vieta telpā, kā arī ir zināms sagaidāmais mērķa manevrs (konkrēts manevrs, ko cilvēks spēj noformulēt un pēc tam

atdarināt), tātad ir iespējams sagaidīt, ka kontrolleris attiecīgi reaģēs ar nelielu kļūdas iespējamību.

Kontrollera efektivitāti var ietekmēt konkrēta veida sensoru precizitāte/uzticamība, informācijas kvalitāte, kas saistīta ar “sistēmas vides mainīgajiem” (vai “globālā vides informācija”). Mācīšanās/apmācības procesa kvalitātes mērķi ir šāda riska mazināšana. Turpmākajos pētījumos ir sagaidāms šī mazinošā faktora “raksturojums”.

## 8. PLĀNOTIE PĒTĪJUMI

Konkrētais apraksts sniedz visu informāciju, kas nepieciešama projekta virzībai un nepieciešamo ekonomisko resursu iegūšanai, kas vajadzīgi šādu sistēmu augstajām izstrādes izmaksām. Visu sistēmas fiziskai realizācijai nepieciešamo komponentu iegūšana nav vienīgais kavēšanās cēlonis, kas nodrošinātu pareizu testēšanas vidi un iespējas, lai rezultāti būtu nozīmīgi bremsēšanas elementi fizisko testu veikšanai. Šobrīd notiek sistēmas fiziska uzstādīšana reālajā vidē, un tas ir promocijas darba rezultāts.

Turpmākie pētījumi būs jāpapildina ar “fiziskā transportlīdzekļa” pilnīgu neironu tīkla pieejamību un 6. nodaļā aprakstītā mācīšanās/apmācības procesa rezultātiem. Papildu plānos ietilpst dažādu *RC* lidmašīnu modeļu pielāgošana, lai pārvestu 5. nodaļā aprakstīto elektronisko aparatūru un pēc tam pārbaudītu kontrolera fleksibilitāti un spēju pielāgoties jaunām mehāniskajām īpašībām, izmantojot mācīšanās/apmācības procesu.

Nākotnes pētījumi ietvers:

- uz *FPGA* balstītā “neironu faziloģikas kontrolera” rūpnieciskie lietojumi;
- mākonī izvietoti neironu tīkli rūpnieciskām vajadzībām;
- mākonī izvietoti neironu tīkli vides drošības kritiskai uzraudzībai;
- uz *FPGA* balstītā “neironu faziloģikas kontrolera” lietojums automobiļos;
- *FPGA* lietojums automobiļos;
- mākslīgā intelekta lietojums automobiļos;
- pašvadāmu sistēmu lietojums automobiļos;
- datu vākšana pseidoatmiņu lietojumam;
- praktiski lietojumi spieta robotikas manipulācijām, ievācot atmiņu;
- liela attāluma izpētes tehnoloģijas pilnībā autonomiem transportlīdzekļiem;
- drošības modelēšana slēgtas vides robotikai;
- atbilstošu datu piekļuves vadības metožu izpēte, ieskaitot *MOB*, mākoņa vai citas piekļuves metodes atsevišķiem robotiem, spieta robotiem vai attālās izpētes robotiem;
- darbinieka vai spieta aprīkojuma pilnīga izstrādāšana, lai papildinātu sistēmu.

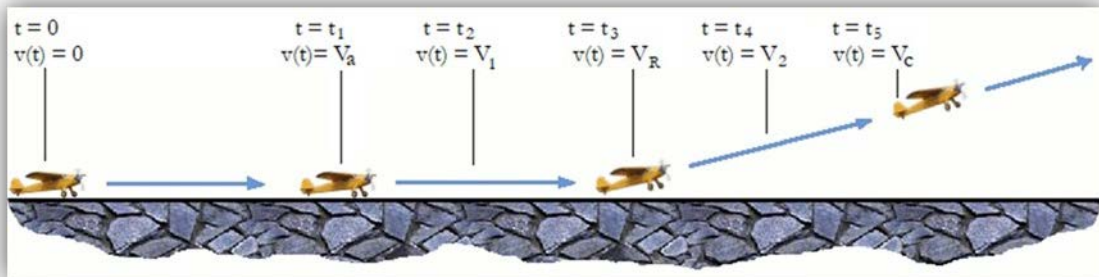


## LITERATŪRAS SARAKSTS

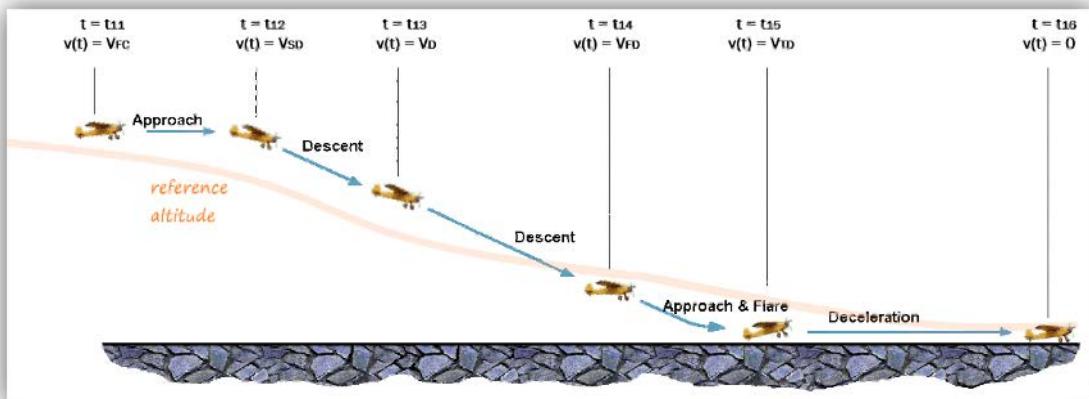
- [1] A. Barriga, S. Sánchez-Solano, P. Brox, A. Cabrera, I. Baturone, “Modelling and implementation of fuzzy systems based on VHDL”, *International Journal of Approximate Reasoning*, 41. sējums, 2. izdevums, 2006. g., 164.–178. lpp, ISSN 0888-613X, <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2005.06.018>.
- [2] How J. P., Frazzoli E., Chowdhary G. V. (2015) *Linear Flight Control Techniques for Unmanned Aerial Vehicles*. In: Valavanis K., Vachtsevanos G. (eds) *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer, Dordrecht.
- [3] Girish C. V., Emilio F., Jonathan H. P., Hugh L. (2015) *Nonlinear Flight Control Techniques for Unmanned Aerial Vehicles*. In: Valavanis K., Vachtsevanos G. (eds) *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer, Dordrecht.
- [4] UN/ECE-R100/Rev.2, Regula Nr. 100, 2. revīzija.
- [5] K. Tanaka (T. Niimura tulkojums), 1997. g., “An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications”, Springer- Verlag, Ņujorka, 4., 5. nodaļa, 86.–136. lpp.
- [6] Zadeh, L. A., “Fuzzy Sets”, *Information and Control*, 8, 338–353, 1965. g.
- [7] Brubaker, David I., “Fuzzy Logic Basics: Intuitive Rules Replace Complex Math,” EDN, 18. jūnijs, 1992. g., 111. lpp.
- [8] Glenn A, “Fundamentals of Fuzzy Logic Part I & II”, *SENSORS*, 1993. g.
- [9] Earl Cox, *The Fuzzy Systems Handbook* (1994), ISBN 0-12-194270-8.
- [10] SHABIUL ISLAM, NOWSHAD AMIN, M.S.BHUYAN, MUKTER ZAMAN “FPGA Realisation of Fuzzy Temperature controller for industrial application” *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL* Manuskripts saņemts 16. jūnijā, 2007. g.; koriģēts 17. septembrī, 2007. g.
- [11] Brown, S. D., Francis, R. J., Rose, J., un Vranesic, Z. G., *Field-Programmable Gate Arrays*, Kluwer Academic Publishers, 1996. g.
- [12] K. T. Tho, K. H. Yeow, F. Mohd-Yasin, M. S. Sulaiman, un M. I. Reaz, *VHDL Modeling of Boolean Function Classification Schemes for Lossless Data Compression*, *WSEAS Transactions on Computers*, 3. sējums, Nr. 2, 2004. g., 365.–368. lpp.
- [13] D. Repole and L. R. Adrian, “Introduction to Parallel MAS Control for MAS – Smart Sensor Networks”, 2019. g. IEEE Rīgas Tehniskās universitātes 60. starptautiskā enerģētikas un elektrotehnikas zinātniskā konference (RTUCON), Rīga, Latvija, 2019. g., 1.–5. lpp.
- [14] A. Barriga, S. Sánchez-Solano, P. Brox, A. Cabrera, I. Baturone, “Modelling and implementation of fuzzy systems based on VHDL”, *International Journal of Approximate Reasoning*, 41. sējums, 2. izdevums, 2006. g., 164.–178. lpp, ISSN 0888-613X, <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2005.06.018>.
- [15] FUZZY LOGIC DESIGN TOOLS, Xfuzzy 25th, V. 3.5, marts, 2018. g., Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE-CNM), [http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/Xfuzzy\\_3.5/download.html#DISTRIBUTION](http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/Xfuzzy_3.5/download.html#DISTRIBUTION).

- [16] Silvio Cammarata, “Reti Neuronali, Dal Perceptron alle reti caotiche e neuro-fuzzy”, seconda edizione, ETASLIBRI, 1997. g.

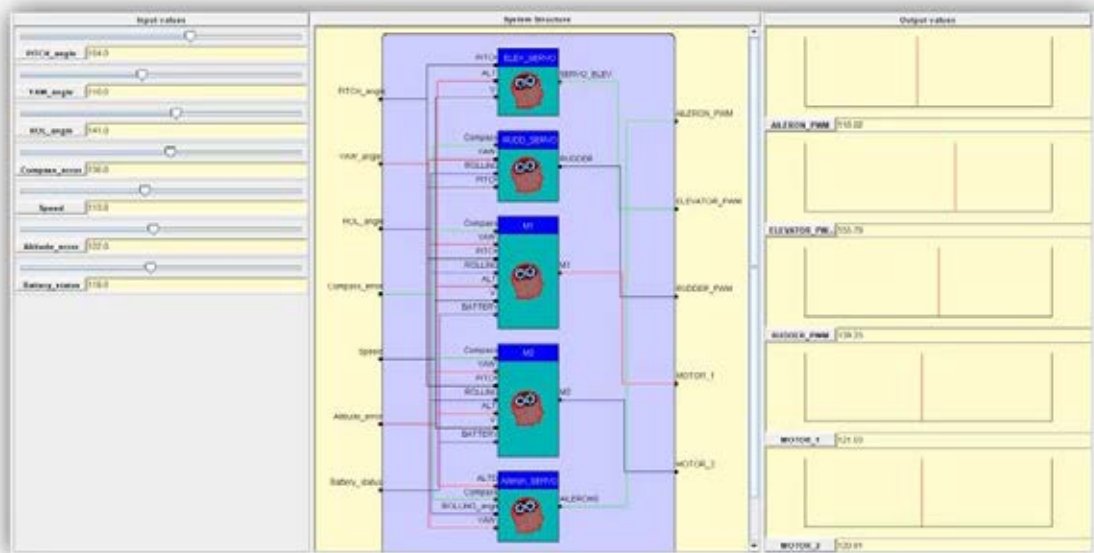
## PIELIKUMI



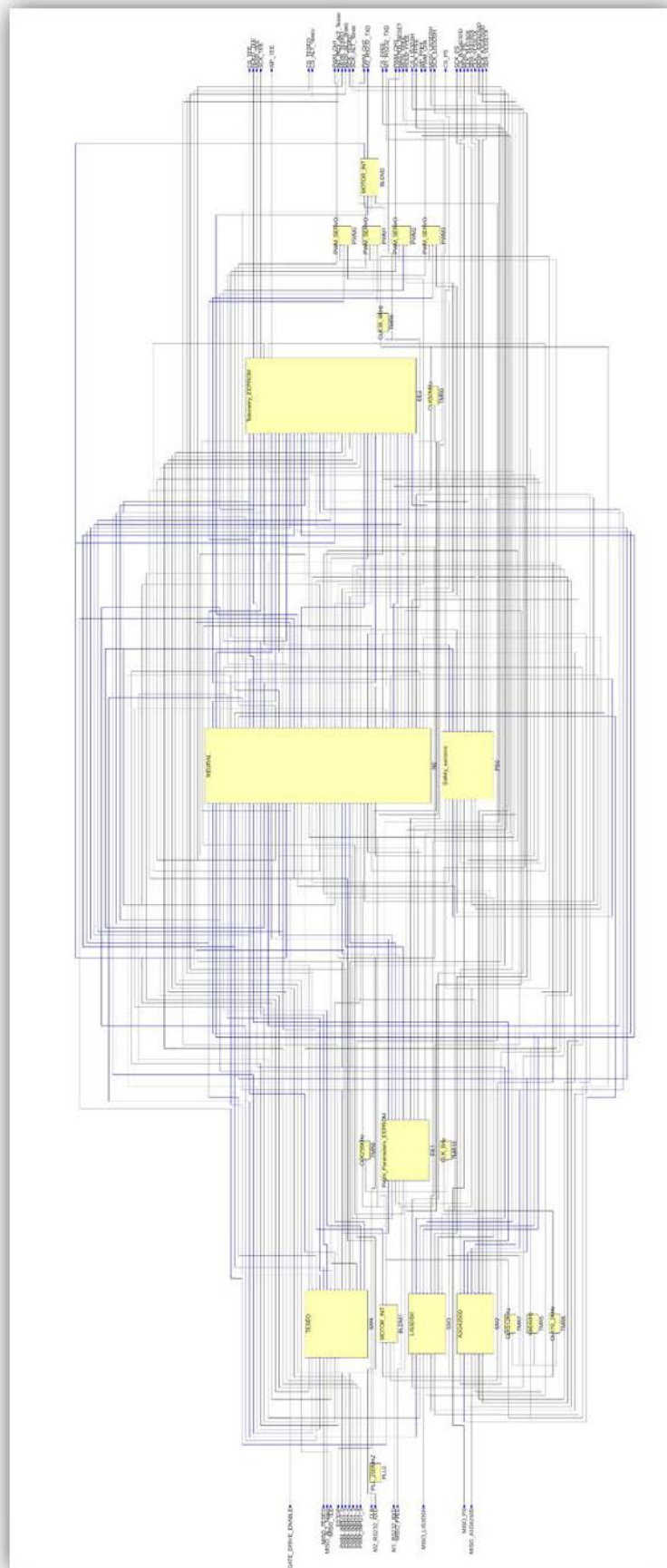
A.1. attēls. Pacelšanās manevrs, grafiskā animācija.



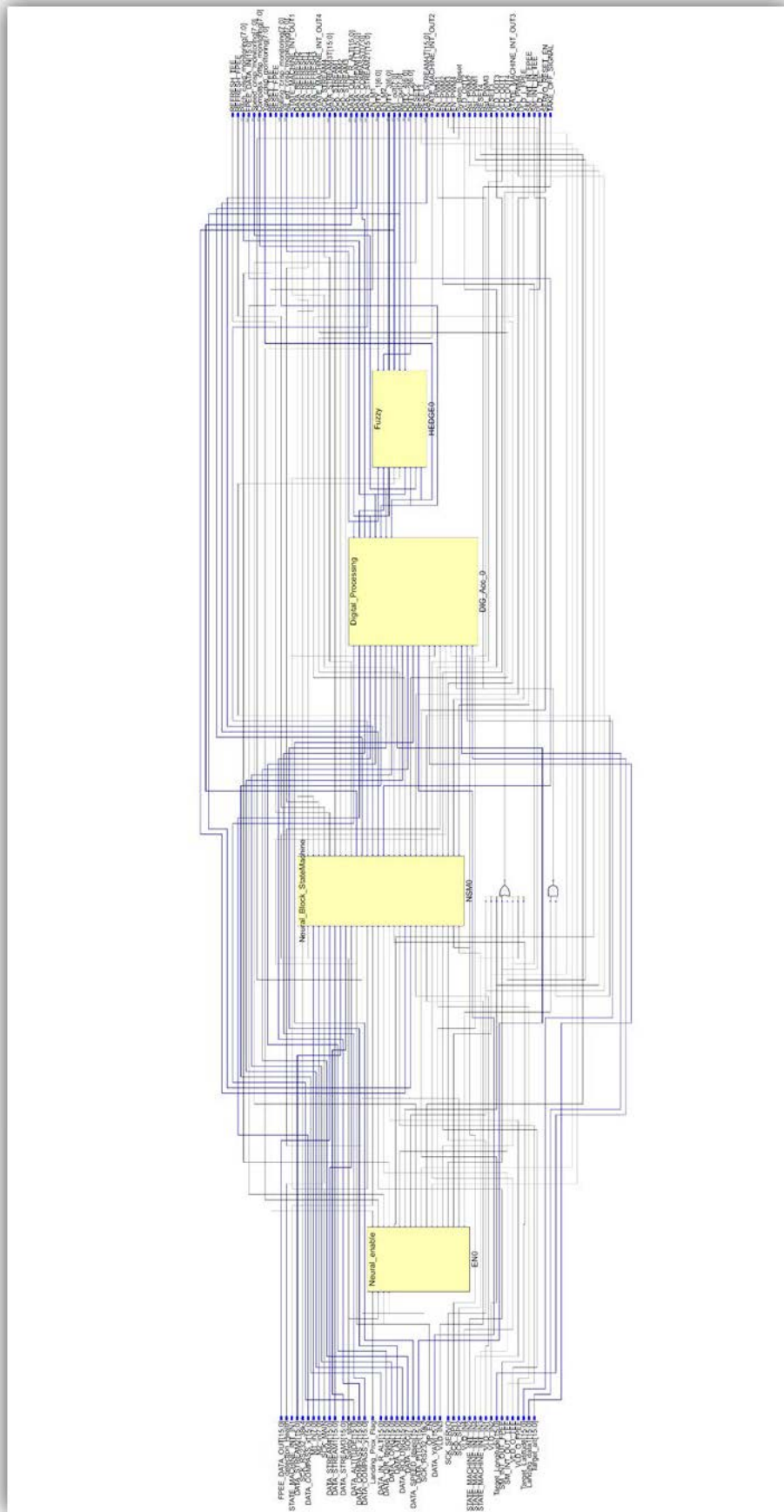
A.2. attēls. Atskaites augstums nolaišanās manevram pret transportlīdzekļa manevra pozīciju, grafiskā animācija.



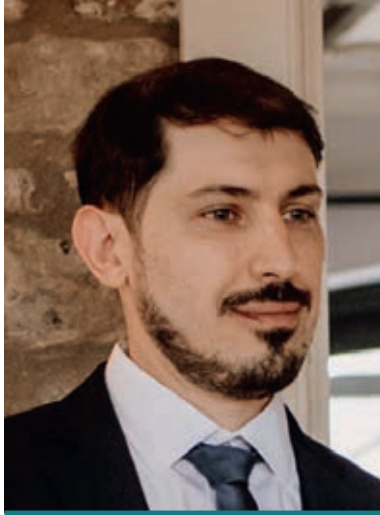
A.3. attēls. XFUZZY Inference Monitor rīks, kas piemērots piedāvātajam kontrollerim.



A.4. attēls. RTL skats, galvenā VHDL algoritma sintēzes rezultāts.



A.5. attēls. RTL skats, “NEURAL” VHDL komponenta kodu sintēzes rezultāts.



**Donato Repole** ir ieguvis bakalaura grādu elektronikas inženierijā Salerno Universitātē Itālijā un maģistra grādu Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūtā, elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē Rīgas Tehniskajā Universitātē Latvijā.

Donato ir automobiļu energoelektronikas sistēmu eksperts un doktora grāda kandidāts Rīgas Tehniskās universitātes elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātes industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūta "Elektriskās Tehnoloģijas un Automātikas" doktora studiju programmā.