



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

Ruslans Muhitovs

# DZELZCEĻA PĀRMIJAS TERMĀLĀ STĀVOKĻĀ MULTI SENSORU VADĪBAS SISTĒMU IZVEIDES PRINCIPI UN TO IZPĒTE

Promocijas darbs



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte  
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

**Ruslans Muhitovs**

Doktora studiju programmas “Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**DZELZCEĻA PĀRMIJAS TERMĀLĀ  
STĀVOKĻA MULTI SENSORU VADĪBAS  
SISTĒMU IZVEIDES PRINCIPI UN TO IZPĒTE**

**Promocijas darbs**

Zinātniskie vadītāji:  
profesors *Dr. sc. ing.*  
MAREKS MEŽĪTIS

profesors *Dr. habil. sc. ing.*  
IVARS RAŅĶIS

Rīgas Tehniskā universitāte  
Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte  
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Šis promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projekta Nr. 8.2.2.0/20/1/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” ietvaros.

Šis pētījums ir tapis ar Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras grantu programmas atbalstu.

NACIONĀLAIS  
ATTĪSTĪBAS  
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA  
Eiropas Sociālais  
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



# ANOTĀCIJA

Pasaules pieaugošs elektroenerģijas patēriņš, energoefektivitātes uzlabošana un efektīvs atjaunojamo un neatjaunojamo resursu patēriņš, ir vieni no aktuālākajiem mūsdienu izaicinājumiem. Ņemot vērā Eiropas Savienības noteikto 2030. gada klimata mērķrādītāju plānu, siltumnīcefekta gāzu emisijas samazināšanu un tālāko plānu uz klimatneitralitāti, kas tiešā veidā ietekmē dzelzceļa kravu apgrozījuma palielināšanu, dzelzceļa infrastruktūras energoefektivitātes nodrošināšanai ir vitāli svarīga nozīme šī plāna izpildē.

Dotajā promocijas darbā dzelzceļa pārvadājumu procesa energoefektivitātes un drošības jautājumi transponējas caur pārmiju pārvedu attīrīšanas sistēmām no sniega un ledus. Pārmiju attīrīšanas process ir ļoti atkarīgs no dažādiem faktoriem: temperatūra, nokrišņu intensitāte, vēja stiprums un citi. Turklāt, iepriekš minētie mainīgie un to kombinācijas ir nejausi pēc būtības, kas nopietni apgrūtina efektīvas pārmiju apsildes sistēmas uzbūvi.

Darbā tiek aplūkotas vairākas iespējamās tehnoloģijas šīs problēmas risināšanai. Tomēr, ņemot vērā ieejas parametru specifiku un uzliktos darbības apstākļus, promocijas darbs tiek veltīts pārmiju elektriskās apsildes multisensoru vadības sistēmas integrācijai ar faziloģiku, kas dod iespēju loģiski un definēti apstrādāt nestriktus un mainīgus ieejas parametrus (vējš, nokrišņi, u.c.), un sistēma var tikt integrēta pusautomātiskā vai automātiskā vadības sistēmā, kas savietojama ar mūsdienu programmējamiem loģiskiem kontrolleriem.

Ievadā tiek sniegts stāvokļa apskats par visu pasauli, literatūras avotu analīze, pamatojums par uzlabojumu nepieciešamību, formulēts mērķis un uzdevumi. Ir iztīrītas citur pasaulē pielietotās pārmiju apsildes sistēmas to priekšrocības un galvenie trūkumi.

Pirmajā nodaļā tiek aprakstīta dzelzceļa pārmija kā regulēšanas objekts, tās uzbūve un realizācijas funkcionālā shēma, ar regresijas izteiksmi aprēķināti apsildes jaudu ietekmējošie faktori.

Otrajā nodaļā tiek iztīrītas efektīvas pārmiju apsildes regulēšanas realizācijas iespējas un sniegta to analīze.

Trešajā nodaļā tiek veikta multisensoru, tajā skaitā faziloģikas teorijas pielietojamības analīze konkrētajam uzdevumam, tiek pamatota sistēmas uzbūves racionalizācija, un tās pārnese pārmiju apsildes vadības sistēmas shēmā ar energoefektivitātes uzlabošanas nolūku. Tiek izstrādāts pārmiju apsildes vadības racionāls algoritms.

Ceturtajā nodaļā tiek izstrādāta pārmiju apsildes vadības prototipa iekārta uz programmējamā loģiskā kontrolera bāzes, kurā tiek realizēta multisensoru vadība un faziloģikas integrācija.

Piektajā nodaļā tiek aprakstīts veiktais eksperiments, kas izpildīts uz reālas dzelzceļa pārmijas ar diviem sildelementiem.

Par promocijas darba gaitā sasniegtiem rezultātiem ziņots VAS "Latvijas Dzelzceļš" vadības sapulcēs, kas tika atzīmēti ar pozitīvu slēdzienu. Tāpat par darba rezultātiem ziņots 7 starptautiskās zinātniskās konferencēs. Darba rezultāti publicēti 1 zinātniskā rakstā žurnālā un 9 konferenču rakstu krājumos, kas indeksēti *SCOPUS* datu bāzē.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras avotu saraksts, 56 attēli, 15 tabulas, divi pielikumi, kopā 103 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras avotu sarakstā ir 77 nosaukumi.

## ABSTRACT

The world's increasing consumption of electricity, improvement of energy efficiency and effective consumption of renewable and non-renewable resources are among the most topical modern challenges. Taking into account the European Union's 2030 climate target plan, reduction of greenhouse gas emissions and the further plan for climate neutrality, which directly affects the increase in railway cargo turnover, ensuring the energy efficiency of the railway infrastructure is of vital importance in the implementation of these plans.

In the given doctoral thesis, the issues of energy efficiency and safety of the transport process are “transposed” through the point cleaning systems of clearing snow and ice. Point clearing process is highly dependent on various factors; temperature, precipitation intensity, wind strength and others. In addition, the aforementioned variables and their combinations are random in nature, which significantly complicates the construction of the system.

The thesis considers several possible technologies for solving the aforementioned problem. However, taking into account the specifics of the input parameters and the imposed operating conditions, the doctoral thesis is devoted to the integration of the point electric heating control system with fuzzy logic, which makes it possible to logically and definedly process non-strict and variable input parameters (wind, precipitation, etc.), and the system can be integrated into a semi-automatic or in an automatic control system compatible with modern programmable logic controllers.

The introduction chapter provides an overview of the state of the whole world, an analysis of literature sources, justification for the need for improvements, formulated goals and tasks. The advantages and main disadvantages of the point heating systems used elsewhere in the world have been discussed.

The first chapter describes the railway switch as an object of regulation, its structure and the functional scheme of implementation, the factors affecting the heating capacity are calculated with the regression expression.

In the second chapter, the possibilities of effective regulation of the heating of exchanges are discussed and their analysis is provided.

In the third chapter, an analysis of the applicability of multi-sensors, including phasilogic theory, is performed for the specific task, the rationalization of the system structure is justified, and its transfer into the scheme of the heating control system with the aim of improving energy efficiency. A rational algorithm for the control of switch heating is being developed.

In the fourth chapter, a prototype device for the control of point heating is developed on the basis of the programmable logic controller, in which multi-sensor control and fuzzy logic integration are implemented.

The fifth chapter describes the experiment performed on a real railway turnout with two heating elements.

The results achieved in the course of the doctoral work were reported at the management meetings of VAS “Latvijas Dzelzceļš”, which were noted with a positive conclusion. Also, the results of the work were reported at 7 international scientific conferences. The results of the work were published in 1 scientific article in a journal and 9 conference proceedings indexed in the *SCOPUS* database.

The doctoral thesis is written in Latvian, contains an introduction, 5 chapters, conclusions, a list of literature sources, 56 figures, 15 tables, 2 appendices, a total of 102 pages, including appendices. There are 77 titles in the list of literature sources.

## PATEICĪBAS

Es vēlos pateikties cilvēkiem, kas man ir palīdzējuši, atbalstījuši un bijuši man līdzās visā studiju laikā un īpaši promocijas darba izstrādes posmā.

Vispirms vēlos pateikties promocijas darba vadītājiem, *Dr. sc. ing.*, prof. Marekam Mezītim par vadību doktora līmeņa studiju laikā, sniegtajiem padomiem un idejām promocijas darba praktiskās daļas realizācijā, rekomendācijām un nesavtīgo atbalstu, kā arī *Dr. habil. sc. ing.*, prof. Ivaram Raņķim par teicamām idejām un ieteikumiem vairāku promocijas darba nodaļu izstrādē.

Ļoti lielu paldies vēlos pateikt savai sievai Jevgēnijai par pacietību un sapratni par atņemto laiku promocijas darba izstrādes periodā.

## SATURS

ANOTĀCIJA .....	3
ABSTRACT .....	4
PATEICĪBAS .....	6
TERMINI UN APZĪMĒJUMI .....	9
IEVADS .....	10
1. DZELZCEĻA PĀRMIJU TERMĀLĀ STĀVOKĻA STABILIZĀCIJAS UZDEVUMI	18
1.1. Dzelzceļa pārmijas kā regulēšanas objekta raksturojums .....	18
1.2. Pārmiju attīrīšanas sistēmu salīdzinājums un uzdevumu formulējums pārmiju elektriskās apsildes sistēmai .....	19
1.3. Dzelzceļa pārmijas uzbūve un realizācijas funkcionāla shēma .....	22
1.4. Pārmijas darbības ietekmes faktori .....	25
1.5. Ietekmes faktoru analīze .....	29
2. PROGNOZĒTĀS JAUDAS NOTEIKŠANA UN REGULĒŠANAS SISTĒMAS IZVĒLE .....	31
2.1. Sistēmas definēšana .....	31
2.2. Sistēmas stāvoklis un darbība .....	32
2.3. Atgriezeniskās saites un tās funkcijas .....	34
2.4. Termālā stāvokļa tiešas regulēšanas realizācija .....	35
2.5. Termālā stāvokļa regulēšana ar atgriezenisko saiti .....	37
2.6. Apsildes jaudas regulēšana ar vadības sistēmu ar traucējuma ietekmi .....	40
2.7. Apsildes jaudas regulēšana pēc regresijas vienādojuma rezultātiem .....	43
3. DZELZCEĻA PĀRMIJU TERMĀLĀ STĀVOKĻA REGULĒŠANA AR FAZILOĢIKU .....	51
3.1. Heiristisku algoritmu dažādība un pielietojums .....	51
3.2. Faziloģikas realizācija elektrotehnoloģiju datorvadībā un PEAS .....	52
3.3. Faziloģikas modeļa konstruēšanas apraksts .....	56
3.4. Fazi–PI un fazi–PID regulatoru analīze .....	58
3.4. PEAS faziloģikas modeļa izveide MatLAB vidē .....	60
4. DZELZCEĻA PĀRMIJU ELEKTRISKĀS APSILDES VADĪBAS SISTĒMAS REALIZĀCIJA PĀRMIJU ATTĪRĪŠANAI NO SNIEGA UN LEDUS .....	65
4.1. Prasību formulējums pārmiju apsildes vadības sistēmai .....	65
4.2. Pārmiju elektriskās apsildes vadības sistēmas funkcionālās iespējas un tehniskās raksturlielnes .....	66
4.3. PEAS ierīču un tehnoloģijas izvēle efektīvai pārmiju apsildei .....	67
4.3.1. Izstrādājamās PEAS galveno uzdevumu noteikšana .....	67
4.3.2. Izstrādājamās PEAS un galveno konkurentu salīdzinājums .....	68
4.3.3. Dažādu PEAS vadības algoritmu trūkumu analīze .....	70



4.3.4. PEAS darbības tehnoloģijas un algoritma izstrāde.....	73
5. DZELZCEĻA PĀRMIJU ELEKTRISKĀS APSILDES VADĪBAS SISTĒMAS TESTĒŠANA REĀLOS APSTĀKĻOS.....	77
5.1. PEAVS shēmas un galveno ierīču apraksts.....	78
5.2. Eksperimenta apraksts.....	82
5.3. Eksperimenta norise .....	83
5.4. Eksperimenta rezultāti un to analīze .....	87
SECINĀJUMI UN DARBA GALVENIE REZULTĀTI.....	89
AVOTU UN IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS .....	91
PIELIKUMI .....	97

## TERMINI UN APZĪMĒJUMI

DP – dzelzceļa pārmija

IPM – impulsa platumu modulācija

LDz – VAS “Latvijas Dzelzceļš”

MPC – mikroprocesoru centralizācija

PAS – pārmiju attīrīšanas sistēma

PEAS – pārmiju elektriskās apsildes sistēma

PEAVS – pārmiju elektriskās apsildes vadības sistēma

PLK – programmējams loģiskais kontroleris

## IEVADS

Pasaules dzelzceļa pārmiju neefektīva apsilde ir viena no nozares aktuālākajām problēmām, kas tieši ietekmē elektroenerģijas, neatjaunojamo resursu patēriņu, CO<sub>2</sub> izmešus un ekoloģiju kopumā [1]. Ņemot vērā pasaules transporta attīstības tendences, īpaši dzelzceļā, un pieaugot kravu pārvadājumiem, jaunu dzelzceļa iecirkņu un staciju būvniecībai [2], [3], efektīva pārmiju apsilde ir viena no prioritātēm un drošas vilcienu kustības nodrošināšanas noteikumiem dzelzceļa sfērā ne tikai Latvijā, bet arī citās Baltijas valstīs [4], [5].

Patlaban koncernā “Latvijas Dzelzceļš” ekspluatējamās pārmiju apsildes sistēmas ir viena no koncerna nopietnākajām problēmām [6]. Ņemot vērā uzņēmumā notiekošo optimizāciju, tehnoloģisko procesu pārskatīšanu un izmaksu samazināšanu, rodas situācija, kad esošās pārmiju apsildes sistēmas netiek ieslēgtas ziemas apstākļos, jo tās patērē lielu daudzumu elektroenerģijas [6]. Tādējādi tiek samazināts elektroenerģijas patēriņš un ietaupīti finanšu līdzekļi, savukārt pārmiju attīrīšana no sniega notiek ar cilvēkspēka palīdzību. Šāda pieeja var radīt vilcienu kustības drošību apdraudošas situācijas, kad stipras snigšanas rezultātā liels skaits pārmiju būs apsnigušas ar sniegu un pārmiju attīrīšanai var nepietikt cilvēkresursu [7].

Ņemot vērā nacionālo tautsaimniecības attīstības programmu, kas paredz ostu kravas apgrozījuma palielināšanu, dzelzceļa kravu un pārvadājumu palielināšanu un “LDz” biznesa modeli, stabilai un drošai vilcienu kustības nodrošināšanai ir viens no prioritāriem izaicinājumiem Latvijā arī attiecībā uz pārmiju apsildi un attīrīšanu, ņemot vērā ierobežotos cilvēkresursus un finanšu līdzekļu efektīvu izmantošanu [8].

Atrisināt pārmiju apsildes zemas energoefektivitātes problēmu ļaus laika apstākļu savlaicīga un precīza prognoze, mūsdienīga un inovatīva pārmiju apsildes vadības sistēma, efektīva vadības algoritma pielietošana [9].

Dzelzceļa pārmiju apsildes uzlabošanai mūsdienās izmanto ģeotermālās, gāzes, indukcijas un citas apsildes sistēmas. Šajā promocijas darbā tiek piedāvāta vadības sistēmas uzlabošanas iespēja ar multisensoru integrāciju.

Tieši pārmiju elektriskās apsildes vadības sistēmas izpētei ar multisensoru integrēšanu ir liela nozīme pārmiju apsildes efektivitātes uzlabošanā. Promocijas darbā piedāvātai *PEAVS* ir virkne priekšrocību: spēja apstrādāt nestriktus un mainīgus ieejas parametrus (vējš, nokrišņi u. c.); tā var tikt integrēta pusautomātiskā vai automātiskā vadības sistēmā; savietojamība ar mūsdienu programmējamiem loģiskiem controlleriem.

### Literatūras apskats

Avotā [10] aprakstīts “LDz” plaši pielietotas pārmiju apsildes sistēmas patenta pieteikums. Patenta pieteikumā ir minēti vairāki sistēmas trūkumi, kā piemēram, nav paredzēta iespēja / neiespējamība operatīvi mainīt komutācijas ierīces vadības algoritmu, vadības personāla iejaukšanās dažādos līmeņos algoritmā, kas palielina ārkārtas situāciju un organizatorisko kļūmju iespējamību. Tāpat aprakstītā pārmiju apsildes sistēma neietver ierīces (sensorus, instrumentus) gaisa mitruma un vēja ātruma noteikšanai ar iespēju iegūt operatīvu informāciju un pārraidīt to signālu veidā uz attiecīgajām loģiskā bloka papildus ieejām, kopā ar paredzētiem ārējā gaisa temperatūras un nokrišņu sensoriem. Turklāt nav norādīta ierīces atgriezeniskās saites un diagnostikas iespēja/neiespējamība (izņemot izolācijas pretestības kontroli). Atšķirībā no [10], promocijas darbā piedāvātais prototips ir savienots ar meteostaciju, kura var noteikt patenta pieteikumā minētos niekļautos atmosfēras stāvokļus – vēja stiprums un gaisa mitrums, un līdz ar to atbilst perspektīvai sistēmai.

Avotos [4], [5] izskatīti drošuma un funkcionēšanas kvalitātes jautājumi un tos ietekmējošie faktori. Drošuma novērtēšanā izmantota statistika, kas apkopota ekspluatācijas laikā. Atšķirībā no [4], [5] promocijas darbā izskatīta pārmiju apsildes vadības sistēmas paaugstināšana, izmantojot multisensoru vadības sistēmas ieejas un izejas parametrus.

Avotā [11] detalizēti izskatīti sistēmas un elementu drošuma, gatavības un apkalpošanas jautājumi. Avotā [11] arī ir izskatīti atteices noteikšanas metodes teorijas jautājumi, kas balstīti uz procesa, signāla un atteices modelēšanas, signāla identificēšanas, uz lieluma limita pārbaudes, kā arī diagnosticēšanas metodēm, izmantojot atteices klasifikācijas paņēmienus. Atšķirībā no avota [11], promocijas darbā izstrādāta metode ir balstīta uz multisensoru integrācijas un faziloģikas teorijas pielietošanas.

Avotā [12] izskatīta diagnostikas metodes klasifikācija; diagnosticēšana, izmantojot sistēmas modeli; informācijas plūsmas optimizēšana; drošuma jautājumi un optimālās parametru virknes izvēle pēc izmaksas. Plūsmu optimizēšana nav atkarīga no informācijas pārraides veida. Nav izskatīti sistēmas drošības jautājumi. Atšķirībā no avota [12], promocijas darbā piedāvāta diagnostikas metode ar informācijas plūsmu, kas izmanto datus par elementa stāvokli nevis par elementu parametriem. Atšķirībā no avota [12], promocijas darbā piedāvātās diagnostikas apakšsistēmas kritēriji saistīti ar konkrētā elementa maksimālā parametru skaita novērošanu.

Rakstā [13] izskatīta ekspertu sistēma ar iebūvēto neironu tīklu, kas tiek izmantota atjaunošanas darba sākuma momenta optimizēšanai. Piedāvātā pieeja izmanto sistēmas elementa izmantošanas ilguma izmaksas aprēķinus (*LCC–Life Cycle Costs*). Rakstā [13] izskatītā ekspertu sistēma piemērota sliežu infrastruktūras novērtēšanai. Izskatītā ekspertu sistēma risinājuma pieņemšanai izmanto faziloģiku un kā rezultāts tiek veidota hibrīdu sistēma. Atšķirībā no raksta [13], promocijas darbā piedāvātā metode ir bāzēta uz multisensoru vadības metodēm un optimizē apsildes laika momenta sākumu atkarībā no sensoru datiem.

Rakstā [14] analizēta piedāvātā sistēma, kas bāzējās uz optiskā nokrišņu sensora. Piedāvātā sistēma izmanto optisko sensoru, lai noteiktu nokrišņu tipu – lietus vai sniegs, kas ir balstīts uz tiešu un izkliedētu atstarojumu kompleksa izmantošanu. Rakstā [14] nekas netika izklāstīts par sistēmas pielietošanu miglas laikā, kas Latvijas apstākļos ir bieža parādība. Atšķirībā no raksta [14], promocijas darba piedāvātais prototips ir savienots ar meteostaciju, kura ir spējīga noteikt nokrišņu tipu [15].

Rakstā [16] ir sniegts pārskats par Zviedrijas dzelzceļa pārmiju apsildes elektroenerģijas patēriņu un izmaksām. Šis raksts tiek izmantots par pamatu tēmas aktualitātei. Promocijas darbā izstrādātā pieeja ļauj samazināt elektroenerģijas patēriņu.

Avotā [17] ir sniegts sniega un ledus attīrīšanas iekārtu salīdzinājums ASV dzelzceļos. Tiek aprakstītas dažādas sniega attīrīšanas mašīnas gan uz riteņu bāzes, gan uz dzelzceļa gaitas. Sniega attīrīšanai no pārmijām un sliežu krustojumiem, avotā tiek aprakstītas auksta un karsta gaisa pneimatiskās attīrīšanas sistēmas. Gaisa uzkaršēšanai tiek izmantota gāze, šķidra degviela un elektriskā enerģija. Tāpat tiek aprakstīta elektriskās apsildes sistēma ar vadības blokiem, kas nodrošina augstu efektivitāti, bet netiek minēts vai sistēma izmanto multisensorus tās ieejā un vai tās jauda tiek regulēta kaut kādā veidā. Atšķirībā no avota [17], promocijas darbā piedāvātais risinājums izmanto sensorus ieejā un ļauj regulēt elektriskās apsildes jaudu. Tāpat avotā aprakstītas dabasgāzes, propāna un šķidrās degvielas apsildes sistēmas ir neefektīvas Latvijas apstākļos augsto cenu un būvniecības augsto kapitālieguldījumu dēļ.

Avotā [18] ir aprakstītas pārmiju apsildes sistēmas Vācijas dzelzceļos. Tika iztirzātas trīs tipu sistēmas – elektriskā apsilde, gāzes apsilde, ģeotermālā apsilde. Tika sniegts sistēmu apraksts, īpatnības un darbības principi. Tiek aprakstītas arī intelektuālās apsildes sistēmas un to efektivitātes paaugstināšanas pasākumi, kuri galvenokārt ir vērsti uz sistēmu vadības un monitoringa nodrošināšanu attālinātā veidā, izmantojot dažādas datu pārraides sistēmas. Avotā [18] netiek piedāvāts regulēt elektriskās apsildes jaudu vai izmantot sprieguma regulēšanas ierīces. Tāpat netiek minēts vai kāda no sistēmām ir integrēta ar multisensoru vadību. Atšķirībā no avota [18], promocijas darbā piedāvātais risinājums izmanto dažādus sensorus ieejā un ļauj regulēt elektriskās apsildes jaudu plašā diapazonā.

Publikācijā [19] un avotā [20] tiek aprakstītas pārmiju pārvedu indukcijas apsildes pielietošanas perspektīvas. Lai arī pats magnētiskās indukcijas princips nav jauns, tā pielietošana pārmiju apsildei ļauj ievērojami paaugstināt sistēmas un atsevišķu moduļu lietderības koeficientu. Tiek aprakstīts indukcijas apsildes fizikālais princips par virpuļstrāvu plūšanu vadītājā un virsmas efektu. Salīdzinot trīs indukcijas ķēdes izvietojuma veidus, tiek nonākts pie secinājuma, ka uzstādot magnētivada kontūru, apķerot visu sliedes kakliņa augstumu var panākt maksimālu siltuma izdalīšanos sliedē un tas tiek apstiprināts ar magnētiskā lauka diagrammu (spektrofotometriju). Lai arī piedāvātais risinājums ir novatorisks un parāda sevi kā efektīvu pieeju, rakstā [19] minēts, ka dotais risinājums ir pārbaudīts laboratorijas apstākļos. Lai precīzāk novērtētu sistēmas ērtības un ekonomisko iespējamību, ir jāveic testi uz reāli ekspluatētajām pārmiju pārvedām. Tāpat nekas nav minēts par kaut kāda prototipa izstrādi vai eksistēšanu un tā pagaidu ekspluatācijas rezultātiem. Atšķirībā no raksta [19] un avota [20], promocijas darba piedāvātais prototips ir savienots ar meteostaciju, kura ir spējīga noteikt nokrišņu tipu un tās darbības efektivitāte tika pārbaudīta praktisku eksperimentu gaitā uz ekspluatācijā esošas pārmiju pārvedas.

Avotā [21] ir sniegts pārmiju apsildes sistēmas *tripleS* apraksts. Šī sistēma tiek bāzēta uz ģeotermālās tehnoloģijas, kuras pamatā ir siltumsūkņi kopā ar jaunākajām vadības un regulēšanas ierīcēm. Tiek aprakstīta minētās sistēma efektivitāte un neliels CO<sub>2</sub> izmešu skaits – 200 kg uz 25 eiro enerģijas izmaksām salīdzinot ar elektrisko apsildi (virs 1200 kg uz 140 eiro) un gāzes apsildi (virs 1300 kg uz 250 eiro). Lai arī pagaidu ekspluatācijas rezultātā sistēma pierādīja savu efektivitāti, avotā [21] netiek minēts vai sistēma izmanto multisensorus tās ieejā un vai tās jauda tiek regulēta kaut kādā veidā. Atšķirībā no avota [21], promocijas darbā piedāvātais risinājums izmanto sensorus ieejā un ļauj regulēt elektriskās apsildes jaudu. Tāpat avotā [21] aprakstītā ģeotermālā apsildes sistēmas ierīkošanas augstie kapitālieguldījumi padara sistēmu par ekonomiski neefektīvu pielietošanai uz Latvijas dzelzceļiem.

Avotā [22] sniegts pārmiju ģeotermālās apsildes sistēmas patenta pieteikums. Sistēma tiek bāzēta uz ģeotermālās tehnoloģijas, kuras pamatā ir siltuma caurule, kuras sildītājs atrodas telpā starp gulšņiem balasta slāņa pamatnes līmenī, bet kondensācijas zona siltuma caurules uztvērējā atrodas zemē dziļumā, kas pārsniedz tā sasalšanas dziļumu ziemā. Avotā [22] aprakstītā ģeotermālā apsildes sistēmas ierīkošanas augstie kapitālieguldījumi padara sistēmu par ekonomiski neefektīvu pielietošanai uz Latvijas dzelzceļiem.

Avotā [23] ir aprakstīts izgudrojums saistīts ar dzelzceļu sliežu ceļu iekārtām, jo īpaši ar dzelzceļa pārmiju pārvedām. Ierīce ietver sevī impulsu zemsprieguma maiņstrāvas padeves avotu un zemas pretestības elektrisko sildītāju. Barošanas avots zemsprieguma barošanas galvaniskā izolācija elektriskajā sildītājā un barošanas kontūra lineāra ķēde ir iekārtota tā, lai varētu kontrolēt barošanas impulsu ilgumu. Elektriskais sildītājs ir sakārtots divu paralēlo

lentīšu veidā ar karstumizturīgu izolācijas slāni no nerūsējoša tērauda un siltumizolatora. Elektriskais sildītājs ir uzstādīts pārmiju grupē starp asmeņu paliktņiem un rāmjsliedi bez termiska kontakta ar to. EFEKTS: vienkāršots ierīces dizains un noteikumi par saražotā siltuma tēriņiem, praktiski, tikai pārmijas notekas telpas tiešās konvekcijas apsildei, un samazināta elektriskā sildītāja optiskā pretestība un attiecīgi barošanas sprieguma vērtība. Avotā [23] netiek minēts vai sistēma ir integrēta ar multisensoru vadību. Atšķirībā no avota [23], promocijas darbā piedāvātais risinājums izmanto dažādus sensorus ieejā un ļauj regulēt elektriskās apsildes jaudu.

Avotā [24] ir iztirzāta Krievijas dzelzceļos pielietotās pārmiju elektriskās apsildes sistēmas modernizācija un modernizētā sistēma. Uzlabošanas galvenie virzieni, kas tika aprakstīti – uzlabotā aparatūra, apsildes ierīču kontroles, vadības un monitoringa līdzekļi, elektroapgādes un elektrobarošanas kabeļu tīklu kontroles un vadības ierīces. Tāpat tika aprakstīta ieviestā automatizētā vadība, kas ir realizēta uz industriālo kontrolleru bāzes, kuras pamatā ir informācija no gaisa temperatūras, relatīvā mitruma devējiem un nokrišņu esamības kontrole pateicoties sasaistei ar meteostaciju, bet netiek minēts vai sistēma izmanto vēja ātruma noteikšanas sensoru un, vai apsildes jauda tiek regulēta kaut kādā veidā. Atšķirībā no avota [24], promocijas darbā piedāvātais risinājums izmanto sensorus ieejā un ļauj regulēt elektriskās apsildes jaudu.

Avotos [25], [26] ir aprakstītas mūsdienīgas pārmiju elektriskās apsildes vadības sistēmas. Aprakstītai sistēmai ir ierīču kontroles, vadības un monitoringa līdzekļi, elektroapgādes un elektrobarošanas kabeļu tīklu kontroles un vadības ierīces, sakaru un diagnostikas ierīces. Tāpat aprakstā ir minēts par vadības sistēmas integrāciju augstāka līmeņa vadības un kontroles centros. Avotos [25], [26] netika minēts par jaudas regulēšanu vai kāda intelektuāla algoritma (faziloģikas, neironu tīklu, u.c.) pielietošanu vadības sistēmā. Atšķirībā no avotiem [25], [26] promocijas darbā piedāvātais risinājums integrē multisensorus vadībā kopā ar faziloģikas teoriju un ļauj regulēt elektriskās apsildes jaudu plašā diapazonā.

### **Secinājumi par nodaļu.**

Dzelzceļa pārmiju apsildei pasaulē izmanto ģeotermālās, gāzes, indukcijas un citas apsildes sistēmas. Lai arī literatūras analizē tiek secināts par indukcijas vai ģeotermālās sistēmas efektivitātes pārkāpumu pār elektrisko apsildi ekspluatācijas izmaksu ziņā, šobrīd ekspluatējamu elektrisko apsildes sistēmu nomainas kapitālieguldījumi ir ievērojami augsti. Līdz ar to, šajā darbā tiek piedāvāta tieši pārmiju elektriskās apsildes vadības sistēmas uzlabošanas iespēja ar multisensoru integrāciju. Pārmiju apsildes vadības sistēmas izpēti ar multisensoru izpēti integrēšanu ir liela nozīme pārmiju apsildes efektivitātes uzlabošanā.

## Promocijas darba mērķis

Dzelzceļa pārmijas termālā stāvokļa inovatīvas multisensoru vadības sistēmas izstrādes principu noteikšana, izpēte un pielietošana vadības sistēmas izstrādē ar eksperimentālā algoritma integrāciju.

## Pētījuma uzdevumi

1. Aprakstīt un izanalizēt pētāmo objektu – pārmiju un faktoros, kas ietekmē tās darbību.
2. Veikt esošo pārmiju apsildes sistēmu stipro pušu, trūkumu un neefektivitātes analīzi.
3. Izpētīt regresijas vienādojumus un to izmantošanas iespēju ietekmes faktoru normalizēšanai un apsildes jaudas regulēšanas problēmas risināšanai.
4. Veikt faziloģikas teorijas pielietojamības analīzi un pārnest to pārmiju apsildes vadības sistēmas efektivitātes uzlabošanai.
5. Izstrādāt pārmiju apsildes multisensoru vadības algoritmu un realizēt to programmējamā loģiskā kontrollerī.
6. Integret faziloģikas teoriju iepriekš izstrādātajā algoritmā.
7. Salīdzināt eksperimentālās sistēmas elektroenerģijas patēriņu ar analogiskas sistēmas patēriņu un definēt galīgos promocijas darba rezultātus un secinājumus.

## PĒTNIECĪBAS METODES UN LĪDZEKĻI

### Pētniecības līdzekļi

- *Matlab Fuzzy Logic Designer.*
- *Weidmueller u–create WEB interface.*
- *Siemens Totally Integrated Automation (TIA) portal.*
- *Microsoft Office.*
- *Powersim (PSIM).*

### Izmantotie standarti

- *IEC 61508 (Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety related systems).*
- *IEC 61511 (Safety instrumented systems for the process industry sector).*
- *IEC 62061 (Safety of machinery).*
- *EN 50128 (Railway applications – Software for railway control and protection).*
- *EN 50129 (Railway applications – Safety related electronic systems for signalling).*

Nozares standarti:

- *OST 32. Dzelzceļa automātikas un telemehānikas drošība. (krievu val.: OCT 32. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики).*

### Teorētiskās metodes

- Matemātiskā modelēšana.
- Faziloģikas modelēšana.
- Regresijas vienādojumi.
- Statistiskā, salīdzinošā un korelācijas analīze.

### Eksperimentālās metodes

- Pārmiju apsildes vadība izmantojot eksperimentālo prototipa iekārtu kopā ar faziloģikas algoritmu.

- Eksperimenta gaitā iegūto datu apstrāde un analīze.

## **PĒTĪJUMA OBJEKTI**

- Dzelzceļa pārmija.
- Prototipa iekārta un algoritms, kas sastāv no diviem programmējamiem kontrolleriem, meteostacijas un sekundārām ierīcēm.
- Esošas pārmiju apsildes vadības sistēmas izpildelementi – transformatori, sildelementi u. c.

## **DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE**

- Noteikta pārmiju apsildes elektroenerģijas patēriņa optimizācijas iespēja.
- Sliedes silšanas un atdzišanas līknes noteikšana, izpēte un analīze.
- Zinātniski pamatota piedāvātā pārmiju apsildes vadības sistēmas algoritma efektivitāte.
- Inovatīva pārmiju apsildes vadības sistēmas algoritma izveide ar faziloģikas integrēšanu, ņemot vērā apkartējās vides, procesa un objekta datus.
- Izstrādāta pārmiju apsildes vadības iekārta uz programmējamu controlleru bāzes ar integrētu faziloģikas algoritmu.

## **AIZSTĀVAMĀS TĒZES**

- Faziloģikas algoritms kā dzelzceļa pārmiju apsildes sistēmas inteligentās vadības algoritms ar multinestriktu parametru apstrādi algoritma sintēzē.
- Precīza pārmiju apsildes sistēmas vadība ar faziloģikas komandām ļauj samazināt elektroenerģijas patēriņu par 20 – 30 %.
- Piedāvātais pārmiju apsildes vadības algoritms ar multisensoru apstrādi ir efektīvi pielietojams pārmijas apsildei vienlaikus ar energoefektivitātes uzlabošanu.

## **DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME**

Promocijas darba rezultātiem ir plašs praktiskais pielietojums dzelzceļa uzņēmumos, kas veic infrastruktūras ekspluatāciju un apkalpošanu. Izstrādātā inovatīvā dzelzceļa pārmiju elektriskās apsildes vadības sistēma, ko ir iespējams pielietot Latvijas Dzelzceļā, būvējamā ātrgaitas dzelzceļa līnijā “*Rail Baltica*”, kā arī citos dzelzceļos.

Faziloģikas algoritma pielietošana citās vadības sistēmās dzelzceļa infrastruktūrā paver plašas iespējas procesu pilnveidošanai un digitalizācijai.

## **Darba aprobācija**

1. International Conference on Recent Advances in Engineering and Technology (ICRAET), 2022. gada 1.–2. augusts. (Muhitovs, R., Mezītis, M., Iriškovs, V., Spunitis, A. Research and Modelling of Point Electric Heating Regulation Method Based on Regression Equation of Impact Factors).
2. LISBON 18th International Conference on “Innovations in Science, Engineering & Technology” (LCISET-22), 2022. gada 13.–15. aprīlis. (Muhitovs, R., Mezītis, M., Iriškovs, V., Spunitis, A. Analysis of Different Regulation Methods with Aim to Determine Most Efficient One for Point Electric Heating).
3. 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), 2021. gada 7.–8. oktobris. (Muhitovs, R.,



- Mezītis, M., Baranovskis, A., Spunitis, A. Modelling point electric heating algorithm using Fuzzy Logic).
4. 8th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE'2020), 2021. gada 22.–24. aprīlis. (Muhitovs, R., Mezītis, M., Spunitis, A., Iriskovs, V. Analysis of Experimental Railway Point Electric Heating System).
  5. Fifth Georgian–Polish International Scientific–Technical Conference “Transport Bridge Europe–Asia”, 2019. gada 15.–17. oktobris. (Mezītis, M., Muhitovs, R. Advanced and Multidisciplinary Railway Network Operators’ Training in Management of Emergency Train Situation).
  6. IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2019. gada 7.–9. oktobris, Rīga, Latvija (Muhitovs, R., Mezītis, M., Freimane, J. Intelligent Railway Point Electric Heating Control System).
  7. XI International Scientific Conference “Transport Problems 2019”, 2019. gada 26.–28. jūnijs, Katowice, Polija (Muhitovs, R., Mezītis, M., Korago, I. Development of Railway Point Electric Heating Intellectual Control Algorithm).

Par promocijas darba mērķiem un laboratorijā iegūtiem rezultātiem tika ziņots VAS “Latvijas Dzelzceļš” vadības sapulcēs, kā rezultātā tika saņemts pozitīvs slēdziens un atļauja veikt praktisku eksperimentu esošajā pārmiju apsildes sistēmā.

#### **Publikāciju saraksts**

1. **Muhitovs, R.**, Mezītis, M., Baranovskis, A., Spunitis, A. Modelling point electric heating algorithm using Fuzzy Logic, 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), DOI: 10.1109/ICECCME52200.2021.9590940. Indeksēts SCOPUS.
2. **Muhitovs, R.**, Mezītis, M., Spunitis, A., Iriskovs, V. Analysis of Experimental Railway Point Electric Heating System, 2020 IEEE 8th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), DOI: 10.1109/AIEEE51419.2021.9435805. Indeksēts SCOPUS.
3. **Muhitovs, R.**, Mezītis, M., Korago, I. Development of Railway Point Electric Heating Intellectual Control Algorithm. International Scientific Journal “Transport Problems” vol. 15, 2020. ISSN 1896–0596. Online edition: ISSN 2300–861X. DOI: 10.21307/tp–2020–007. Indeksēts SCOPUS.
4. Mezitis, M., Strautmanis, G., Baranovskis, A., **Muhitovs, R.** Environment Safety Improving Due to Railway Noise Management Decreasing of RMR Method Adaptation, Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 124: 505–563, ISSN: 23673370, DOI: 10.1007/978-3-030-42323-0\_9. Indeksēts SCOPUS.
5. **Muhitovs, R.**, Mezitis, M., Freimane, J. Intelligent Railway Point Electric Heating Control System, IEEE 60th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2019, ISBN: 978-172813942-5, DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982345. Indeksēts SCOPUS.
6. **Muhitovs, R.**, Mezītis, M., Freimane, J., Korago, I. Development of the Decision–Making Algorithm for Railway Maneuverer Park Equipment with Independent Controllers. Procedia Computer Science, vol. 149, 2019, 2018 ICTE in Transportation

- and Logistics, ICTE 2018; Code 146441, DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.124, ISSN: 18770509. Indeksēts SCOPUS.
7. Dolgoplov, P., Konstantinov, D., Rybalchenko, L., **Muhitovs, R.** Optimization of Train Routes Based on Neuro–Fuzzy Modeling and Genetic Algorithms. *Procedia Computer Science*, vol. 149, 2019, 2018 ICTE in Transportation and Logistics, ICTE 2018; Code 146441, DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.124, ISSN: 18770509. Indeksēts SCOPUS.
  8. Mezītis, M., **Muhitovs, R.**, Arpabekov, M., Sansyzbajeva, Z., Togizbayeva, B., Assiltayev, A. Optimization of Transport Logistical Flows between Railway and Urban Passenger Transportation Systems. Springer Nature book “ICTE in Transportation and Logistics 2019”. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer. Online ISBN: 978–3–030–39688–6. DOI: [https://doi-org.resursi.rtu.lv/10.1007/978-3-030-39688-6\\_5](https://doi-org.resursi.rtu.lv/10.1007/978-3-030-39688-6_5).
  9. Kargin, A., Panchenko, A., Ivaniuk, O., **Muhitovs, R.** Motion Control of Smart Autonomous Mobile System Based on the Perception Model. Springer Nature book “ICTE in Transportation and Logistics 2019”. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer. Online ISBN: 978–3–030–39688–6. DOI: [https://doi-org.resursi.rtu.lv/10.1007/978-3-030-39688-6\\_20](https://doi-org.resursi.rtu.lv/10.1007/978-3-030-39688-6_20).
  10. Mezītis, M., **Muhitovs, R.** Advanced and Multidisciplinary Railway Network Operators’ Training in Management of Emergency Train Situations. Fifth Georgian–Polish International Scientific–Technical Conference “Transport Bridge Europe–Asia”: Proceedings, Gruzija, Kutaisi, 15.–18. oktobris, 2019. Kutaisi: Akaki Tsereteli State University, 2019, 71.–76. lpp. ISBN 978–9941–484–82–7.

# 1. DZELZCEĻA PĀRMIJU TERMĀLĀ STĀVOKĻA STABILIZĀCIJAS UZDEVUMI

## 1.1. Dzelzceļa pārmijas kā regulēšanas objekta raksturojums

Lai risinātu dzelzceļa pārmiju (*DP* vai pārmija) termālā stāvokļa stabilizācijas uzdevumu, pirmkārt, tika noskaidrots par *DP* termālā stāvokļa parametriem, kas savukārt raksturo *DP* kā regulēšanas un automatizācijas sistēmas objektu [27]. Galvenie parametri ir objekta enerģētisko situāciju raksturojošie lielumi: siltumenerģijas patēriņš dažādās situācijās, turklāt, ievērojot gan paša objekta dabiskos parametrus, gan apkārtējās vides ietekmes radītos parametrus.

Minētie dabiskie parametri ir atkarīgi no katras pārmijas funkcionēšanas uzdevumiem, kas, savukārt, nosaka *DP* konstrukciju un tās parametrus [28], [29]. Funkcionālie uzdevumi ir saistīti ar vilcienu kustības maršrutu nodrošināšanu uzdotajos kustības apstākļos, ievērojot stingri noteiktās vilcienu kustības drošības prasības [30], [31]. Ņemot vērā maršrutu iespējamus variantus, kā arī to realizācijas apstākļus, kā, piemēram, vai *DP* ir ar rokas vadību vai automātiski vadāma, vai tā nodrošina augsta līmeņa kustības drošību, vai nepieciešamais drošuma līmenis ir pietiekami augsts, utt., var secināt, ka *DP* kā objekti ir ar ļoti lielu daudzveidību. Faktiski, ikviena *DP* ir unikāls maršruta objekts unikāliem realizēšanas uzdevumiem, kas stipri apgrūtina *DP* kā objekta raksturošanu. Veidojot šādu raksturojumu, pirmkārt, jāievēro maršrutēšanas varianti un tās realizācijas apstākļi.

Pētījuma galējais ietekmes objekts ir dzelzceļa pārmija (nr.9) stacijā Zaslauks, kuru ir iespējams redzēt attēlā 1.1. Šajā attēlā ir parādīta apsnigusi pārmijas pārveda ziemas apstākļos, bet pati pārmija ar asmeņiem un to rāmjsliedēm ir tīra no sniega, pateicoties elektriskai apsildei.



1.1. att. Ietekmes objekts – dzelzceļa pārmija

## 1.2. Pārmiju attīrīšanas sistēmu salīdzinājums un uzdevumu formulējums pārmiju elektriskās apsildes sistēmai

Pēdējā laikā Eiropā un pasaulē atzīmē pastāvīgu pārmiju elektriskās apsildes izmantošanas pieaugumu [1]. *PEAS* ir salīdzinoši nedārgas iekārtas, kas paredzētas *DP* attīrīšanai no sniega un ledus [8], [32]. Tās tiek vadītas no iekārtu skapjiem vai attālināti no stacijas dežurantes vai dispečera darba vietas. *PEAS* piedāvā pasaulē plaši atzīto ceļu uz drošu, savlaicīgu un garantēti izpildīto *DP* attīrīšanu ziemas klimatiskos apstākļos. *PEAS* tiek izmantotas, lai garantēti attīrītu pārmiju ziemas apstākļos un nodrošinātu vilcienu kustības drošību, ievērojot vilcienu kustības grafiku un tā uzturēšanu. Noteikto uzdevumu risināšanā visvairāk izmanto tieši *DP* elektriskās apsildes sistēmas (1.1. tab.).

1.1. tabula

*DP* attīrīšanas sistēmu salīdzinājums

Klase	Attīrīšanas veids	Kapitālieguldījumu lielums	Operacionālie izdevumi	Darbības efektivitāte	Efektīvas darbības temp. režīms
Pneimatiskā appūšana	Pneimatiskais	vidējs	vidēji	vidēja	-45 °C līdz +5 °C
Apsilde / apkure	Elektriskā apsilde	mazs	vidēji	augsta	-45 °C līdz +5 °C
Apsilde / apkure	Ģeotermālā apsilde	liels	mazi	augsta	-15 °C līdz +5 °C
Apsilde / apkure	Gāzes apkure	liels	augsti	augsta	-45 °C līdz +5 °C

Lai pieņemtu lēmumu par atbilstošākās pārmiju attīrīšanas (appūšanas vai apsildes) sistēmas izstrādi ir nepieciešams apskatīt un analizēt katras no Eiropā ekspluatējamās sistēmas stiprajām, vājām pusēm, iespējām un draudiem ar SVID analīzes palīdzību.

1.2. tabula

Pneimatiskās appūšanas pārmiju attīrīšanas sistēmas SVID analīze

Stiprās pusēs	Iespējas
<ul style="list-style-type: none"> <li>Viegli un ērti ekspluatēt</li> <li>Neliels ierīču skaits, kurās var rasties atteice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Netika noteiktas</li> </ul>
Vājās pusēs	Draudi
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lieli kapitālieguldījumi kompresoru stacijas un gaisa cauruļvadu izbūvei</li> <li>Nav iespējams vadīt attālināti</li> <li>Nav atgriezeniskās saites no sistēmas par tās stāvokli</li> <li>Nav sensoru kas kontrolētu sistēmas darbību</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cauruļvadu bojājuma gadījumā, visā appūšanas kontūrā iestājas avārijas režīms; nav iespējams izolēt bojāto vietu un padot gaisu uz citām pārmijām šajā pašā kontūrā</li> <li>Monitoringa aprīkojuma neesamības dēļ var nepamanīt avārijas situāciju</li> </ul>

Ģeotermālās pārmiju apsildes sistēmas SVID analīze

<b>Stiprās puses</b>	<b>Iespējas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efektīva pārmijas attīrīšana no sniega un ledus salīdzinājumā ar citām attīrīšanas sistēmām</li> <li>• Neliels CO<sub>2</sub> izmešu daudzums salīdzinājumā ar citām apsildes sistēmām</li> <li>• Zemāks elektroenerģijas patēriņš salīdzinājumā ar citām PEAS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salīdzinoši viegla salāgošana ar piedāvātajām multisensoru vadības sistēmām</li> </ul>
<b>Vājās puses</b>	<b>Draudi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lieli kapitālieguldījumi apsildes kontūru izbūvei zem zemes</li> <li>• “LDz” gadījumā būtu nepieciešams pilnībā pārbūvēt esošās pārmiju apsildes sistēmas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apsildes kontūra bojājuma gadījumā, visā kontūrā iestājas avārija un, ja vienā kontūrā ir vairākas pārmiju apsildes apakšsistēmas, tad tās visas ir avārijas režīmā</li> </ul>

Gāzes pārmiju apsildes sistēmas SVID analīze

<b>Stiprās puses</b>	<b>Iespējas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efektīva pārmijas attīrīšana no sniega un ledus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iespējama salāgošana ar dažādām vadības sistēmām</li> </ul>
<b>Vājās puses</b>	<b>Draudi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lieli kapitālieguldījumi apsildes kontūru izbūvei zem zemes</li> <li>• “LDz” gadījumā būtu nepieciešams pilnībā pārbūvēt esošās pārmiju apsildes sistēmas</li> <li>• Liels CO<sub>2</sub> izmešu daudzums salīdzinājumā ar citām apsildes sistēmām</li> <li>• Lielas ekspluatācijas izmaksas, gāzes augsto cenu dēļ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apsildes kontūra bojājuma gadījumā, gāze var nonākt apkārtējā vidē un ņemot vērā, ka dzelzceļš ir paaugstinātas bīstamības objekts, dažādu apstākļu sakritības dēļ, var notikt pat sprādziens</li> </ul>

## Pārmiju elektriskās apsildes sistēmas SVID analīze

Stiprās puses	Iespējas
<ul style="list-style-type: none"> <li>Efektīva pārmijas attīrīšana no sniega un ledus</li> <li>“LDz” un citu Baltijas valstu dzelzceļu gadījumā nav nepieciešams pārbūvēt esošās pārmiju apsildes sistēmas</li> <li>Salīdzinoši nelielas apkalpošanas izmaksas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Iespējama salāgošana ar dažādām vadības sistēmām</li> <li>Meteostacijas pielietošana var dot nepieciešamos ieejas datus vadības sistēmas uzlabošanai</li> </ul>
Vājās puses	Draudi
<ul style="list-style-type: none"> <li>Liels CO<sub>2</sub> izmešu daudzums, salīdzinot ar ģeotermālās apsildes sistēmu</li> <li>Bezregulēšanas PEAVS pastāv augsts elektroenerģijas patēriņš</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Monitoringa aprīkojuma neesamība var novest līdz avārijas situācijai, piemēram, kabeļu izolācijas bojājuma neatklāšana</li> </ul>

No SVID analīzes ir redzams, ka tieši PEAS pēc stipro un vājo pušu kopuma ir optimālākā pārmiju attīrīšanas sistēma ziemas sezonā. PEAS nodrošina iespēju garantēti attīrīt pārmiju no viegla vai slapja sniega un ledus. Ņemot vērā dažādu valstu dzelzceļu noteiktās prasības pret pārmijas tīrību ziemas apstākļos [6], [33], [34], PEAS tipa sistēmai ir virkne priekšrocību, salīdzinot ar citiem attīrīšanas veidiem.

Risinot DP attīrīšanas no sniega un ledus uzdevumus, PEAS ir būtiskas priekšrocības, salīdzinot ar citām attīrīšanas sistēmām:

- garantēta pārmijas attīrīšana no sniega un ledus;
- iespēja izveidot pilnīgi automatizētas sistēmas;
- sistēmas manuāla, lokāla un attālināta vadība;
- salīdzinoši ērta elektroapgādes pieslēgšana (nepieciešami elektriskie un vadības kabeļi);
- samazinātas prasības apkalpojošā personāla apmācībai un skaitam;
- pastāvīga monitoringa nodrošināšana 24 stundas diennaktī un trauksmju nosūtīšana uz vadības pulti attālinātas vadības režīma gadījumā;
- sistēmas darbība ārējās vides temperatūru diapazonā no  $-45\text{ °C}$  līdz  $+5\text{ °C}$ .

PEAS monitoringam var izmantot optisko sakaru kanālu, kas caur ciparu pārveidošanas ierīcēm izvada kontrolējamus signālus uz vadības datoru (stacijas dežuranta vai dispečera automatizētā darba vieta).

PEAS var tikt aprīkota ar šādām monitoringa ierīcēm: strāvas sensori, sprieguma sensori, temperatūras sensori, meteoroloģiskā stacija. Tādējādi, lai veiktu attālināto monitoringu un vadību, var izmantot dažādus sensorus un meteoroloģisko staciju ar nosacījumu, ka savāktie signāli tiek apstrādāti programmējamā loģiskajā kontrolerī (PLK) un nodoti tālāk uz vadības ierīcēm vai vadības datoru.

Viena no *PEAS* ar *PLK* integrāciju kombināciju galvenajām priekšrocībām ir iespēja integrēt citas *PEAS*, kurās ir uzstādītas *PLK slave* ierīces, un kuras var tikt apvienotas vienā tīklā ar *master* ierīci [35], [36]. Šādā konfigurācijā ikdienas monitoringa uzdevumi sastāv no katras fāzes sprieguma, darba strāvas, sliedes temperatūras, izolācijas pretestības mērīšanas un šo kontroles un stāvokļa datu pārsūtīšanas no kontrolējamiem objektiem (*slave* ierīces) uz *master* ierīci. Ārējā gaisa temperatūras un nokrišņu mērīšanu veic atsevišķa meteostacija, kas pieslēgta *master* ierīcei. Snigšanas laikā, saskaņā ar dzelzceļa instrukciju prasībām, var nodrošināt snigšanas monitoringu un analīzi 24 stundu laikā, vai kamēr snigšana nav beigusies. Parasti *PEAS* pārraida visu sensoru datus atpakaļ un ģenerē darba *log* failu uz vadības datoru reālā laika režīmā. Pārmijas tīrbū un īpaši zonas starp rāmjsliedi un kustīgo asmeni atseko, izmantojot temperatūras sensoru, kas ir piestiprināts uz rāmjsliedes un pārraida to caur *PLK* uz vadības datoru. Tālāk pēc speciāla algoritma notiek *PEAS* darbība un sniega kausēšana, kas norisinās visu snigšanas laiku, vai arī, ja snigšana ir beigusies, tad vēl 4–6 stundu laikā, lai garantēti izkausētu sniegu un novērstu atkārtota apledojuma varbūtību.

Pārmiju apsildes monitoringam ir nepieciešama nepārtraukta apsildes parametru novērojumu veikšana laikā, vadoties no tekošiem laika apstākļiem. Monitoringa sistēmai ir jābūt attālai, jākontrolē sensori un jānolasa parametri no tiem. Tai arī jābūt automatizētai [37].

*PEAS* izmantošana pārmiju attīrīšanai no sniega un ledus dzelzceļa stacijās palīdzēs novērst bīstamas vilcienu kustības situācijas, paaugstinās pārmiju darbīgumu, ļaus paaugstināt vilcienu kustības drošību dažādos dzelzceļa iecirkņos ar pasažieru un kravas kustībām. *DP* uzturēšanas atbildīgās organizācijās būs iespēja pāriet uz stāvokli balstītu uzturēšanu un pamazām atteikties no uzturēšanas pēc reglamenta. *PEAS* ar *PLK* pielietošana, izmantojot dažādus sensoru tipus, būtiski paaugstinās izmēramo parametru ticamību un precizitāti, un ļaus precīzāk apsildīt pārmiju. *PEAS* jānodrošina sekojošo uzdevumu izpildīšanu:

- *PEAS* parametru nepārtraukts monitorings;
- *PEAS* parametru monitorings dinamikā apsildes laikā;
- apkārtējās vides faktoru mērīšana, izmantojot pieslēgto meteostaciju;
- nokrišņu tipa noteikšana;
- operatīvās informācijas nodrošināšana dzelzceļa darbiniekiem atteices gadījumā.

### **1.3. Dzelzceļa pārmijas uzbūve un realizācijas funkcionāla shēma**

#### 1.3.1. Dzelzceļa pārmijas uzbūve

*DP* ir metāla rāmjsliežu, asmeņu un vilktņu kopums, kas paredzēta ritošā sastāva novirzīšanai no viena sliežu ceļa uz otru. Citiem vārdiem sakot, pārmija ļauj ritošajam sastāvam pārvietoties no galvenā sliežu ceļa uz vienu (vai vairākiem) blakus esošiem sliežu ceļiem [38].

*DP* uzbūve ir parādīta 1.2. attēlā:



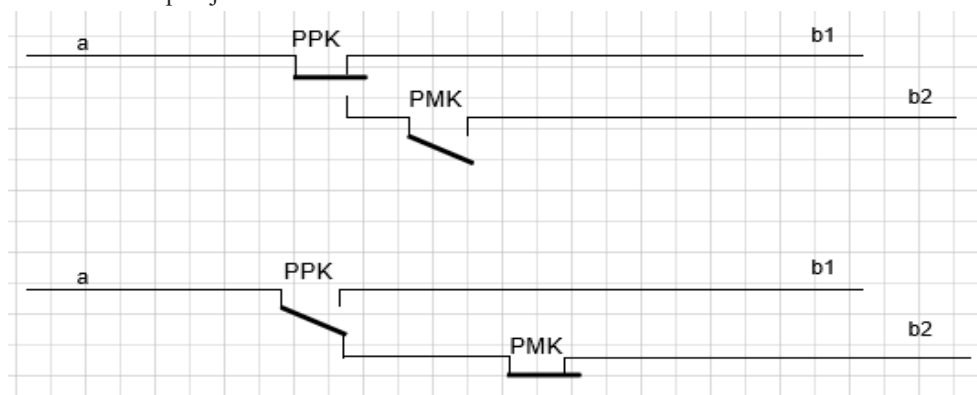


kontrolvilktniem, kas savienoti ar 2 kustīgiem asmeņiem 7 un 8 (1.2. att.). Pārmijas elektropiedziņa pārvieta līko asmeni (7) pretējā virzienā (uz leju 1.3. att.) līdz rāmjsliedei. Vienlaicīgi tiek atslēgti iepriekš saslēgtie autopārslēdzēja kontakti un tādējādi var tikt sagatavots maršruts kustībai taisnajā virzienā izmantojot rāmjsliedi 6 no a uz b1. Pārmiju asmeņu apakšējā stāvoklī (1.2. att.) otrs kustīgais asmens (taisnais asmens) tiek pievienots jeb piespiests likai slidei 5, tā nodrošinot taisna virziena kustību maršrutā a–b1 līdz krustenim ar kaklu 15.

Ja pārmijas asmeņi ir augšējā stāvoklī (skat. 1.2. att.), taisnā virziena slidei 6 klāt tiek piespiests likais asmens 7, kas dod iespēju šai slidei nodrošināt maršruta atzarojumu uz b2 caur krusteņa ieeju 15. Savukārt, taisnais asmens 8 šajā stāvoklī tiek atvirzīts no taisna virziena rāmjsliedes, nodrošinot atslēgšanos no taisnā virziena kustības, bet kustību būs iespējams turpināt caur statisko līko rāmjsliedi 5. Kustība maršrutējas virzienā no a uz b2.

Tāpat maršrutā a–b1 rāmjsliede taisnā 6 nekad netiek atslēgta no taisnā maršruta, bet maršrutā a–b2 no taisnā maršruta netiek atslēgta otra likā rāmjsliede 5, kas nodrošina riteppārim tiešu pāreju no maršruta b1 uz b2.

Visvienkāršāk attēlot pārmijas darbību elektriskā aizvietošanas shēmā (1.4. att.). Tajā ir 2 pārslēdzošie kontakti – viens starp punktu “a” vienai slidei un līko asmeni 7, kas vilktņu augšējā stāvoklī ir noslēgts, otrs starp punktu a otrais slidei un taisno asmeni 8, un vilktņu augšējā stāvoklī ir vaļējs, t.i. maršrutēšana uz b1 nevar notikt. Tādējādi darba vilktnes izvilkta stāvoklī notiek pāreja no a uz b2 maršrutu.



1.4. att. Pārmijas darbības elektriskā aizvietošanas shēma

Kad vilktņi ir apakšējā stāvoklī, kontakts a–b2 ir vaļā (maršruts a–b2 nevar notikt), bet kontakts a–b1 apakšējai slidei ir noslēgts, nodrošinot pāreju uz maršrutu a–b1 [39].

No konstrukcijas apraksta var izprast, ka drošai pārmijas darbībai svarīgi nodrošināt katra asmeņa drošu atslēgšanu–pieslēgšanu (likā asmens 7 attiecībā pret vienu taisnā virziena sliedi; taisnā asmens 8 attiecībā pret otru taisnā virziena sliedi). Tāpat no drošības viedokļa kritiski ir pārslēdzošu vilktņu 3 un 4 tiešās iedarbības punkti attiecībā pret līko un taisno asmeni.

Svarīga loma pārmijas darbībā ir krustenim 13, kura sānu malas ir pārslēdzamo maršrutu b1 un b2 starpleņķī  $\alpha$  attiecībā pret krusteņa kakla matemātisko centru C. Lai labāk nodrošinātu šo leņķi, ap krusteņa serdi izvietotas divas fiksējošas spārnsliedes 11 un 12.

Pārmija īsumā sastāv no diviem asmeņiem – speciāli frēzētiem kustīgiem sliežu elementiem (profilēm) ar smailu (tievgali) un resnu galu (resgali), un divām rāmjsliedēm – sliedes pie kurām tiek piespiests vai no kurām tiek atvirzīts asmens.

Pārmijas var būt dažāda garuma, kas ir atkarīgs no pārmijas krusteņa markas, sliežu ceļa nozīmes un pārmijas tipa, bet parasti tiek apsildīta tā pārmijas daļa, kur asmens pieguļ pie rāmjsliedes un neliels rezerves garums uz pārmijas krusteņa pusi [29]. Netiek sildīta visa pārmija, jo ziemas apstākļos ir jānodrošina pārmijas tīrība tieši asmeņu piegulšanas zonā, lai nodrošinātu to ciešu piegulšanu un malējā stāvokļa kontroli uz vilcienu kustības operatora (stacijas dežuranta vai vilcienu dispečera) vadības pulsts vai datora.

## 1.4. Pārmijas darbības ietekmes faktori

Lai novērtētu pārmiju kā regulētu termālo objektu, ir jāzina siltumtehniekie parametri: apsildāmā masa, iedarbes un stabilizētā temperatūra, reakcijas laiks.

Pārmijas materiāls ir tērauds, kura īpatnējā siltumietilpība ir  $460 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ . Parasti pārmijas ar krusteņa marku 1/9 garums ir 8 metri, bet apsildāmais sliedes garums ir 5 metri. Tieši 5 metru garumā uz pārmijas rāmjsliedes ir izvietoti un piespīrināti apsildes elementi. Tā kā tiek apsildīta rāmjsliede, tad aprēķinos tika izmantoti tieši rāmjsliedes parametri. Rāmjsliedei ir sliedes tips (marka) R50, kas praksē nozīmē, ka viena tekoša metra sliedes masa ir 50 kg. Kopējā apsildāmā masa ir 250 kg.

Piemēram, lai uzsildītu vienu pārmijas rāmjsliedi līdz  $+5 \text{ }^\circ C$  temperatūrai, ja apkārtējā gaisa temperatūra ir  $-15 \text{ }^\circ C$ , ir nepieciešams siltuma daudzums, ko aprēķina pēc formulas:

$$Q = m * c * (\theta_b - \theta_0), \quad (1.1.)$$

kur ir  $Q$  – siltumenerģija  $J$ ,  $m$  – masa  $kg$ ,  $c$  – materiāla īpatnējā siltumietilpība  $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ ,  $\theta_b$  – materiāla beigu temperatūra pēc uzsilšanas,  $\theta_0$  – materiāla sākuma temperatūra.

$$Q = 250 * 460 * (5 - (-15)) = 2\,300\,000 \text{ J} = 2\,300 \text{ kJ}$$

Ja nepieciešams uzsildīt šādu masu 1 minūtē, tad pievadīto jaudu var aprēķināt sekojoši:

$$P = \frac{Q}{T} = \frac{2\,300\,000}{60} = 38\,333,33 \text{ W} \approx 38,33 \text{ kW},$$

kur  $T$  ir nepieciešamais uzsilšanas jeb reakcijas laiks. Protams, reālajos apstākļos nav nepieciešamības uzsildīt pārmijas rāmjsliedi līdz stabili pozitīvai temperatūrai tik īsā laikā. Parasti, rāmjsliedei jābūt uzsildītai līdz stabili pozitīvai temperatūrai, kas nodrošina sniega kausēšanu starp to un asmeni ne vairāk kā 10 minūšu laikā no apsildes ieslēgšanas brīža. Līdz ar to pārrēķinot rezultātu pēc formulas (X), rezultāts sanāk:

$$P = \frac{Q}{T} = \frac{2\,300\,000}{600} = 3\,833,33 \text{ W} \approx 4 \text{ kW},$$

kas ir pareizs rezultāts, jo sildelementa nominālā jauda ir 2,3 kW.

Lai iegūtu visu ietekmes faktoru ietekmi uz jaudu, tika izveidota jaudas izteiksme:

$$P = P_0 + a_1 \theta_{\bar{a}r} + a_2 N + a_3 V \quad (1.2.)$$

Temperatūras korekcijai  $\theta_b = +5 \text{ }^\circ C$ ,  $\theta_{\bar{a}r \min} = -45 \text{ }^\circ C$ ,  $\theta_{\bar{a}r \max} = +5 \text{ }^\circ C$ , nokrišņu ietekmei  $N_{\max} = 30 \frac{mm}{h}$ ,  $N_{\min} = 0 \frac{mm}{h}$ , vēja ātrumam  $V_{\min} = 0 \frac{m}{s}$ ,  $V_{\max} = 30 \frac{m}{s}$ .

Tiek pieņemti trīs ietekmes koeficienti – **a1 (ārgaisa temperatūra)**, kas var ieņemt vērtības  $-1$  ( $-45 \text{ }^\circ C$ ) un  $+1$  ( $+5 \text{ }^\circ C$ ), **a2 (nokrišņi sniega un ledus veidā)**, kas var ieņemt vērtības  $-1$

(snigšanas intensitāte ir 0 mm/h) un +1 (snigšanas intensitāte ir 30 mm/h) un **a3 (vēja ātrums)**, kas var ieņemt vērtības -1 (0m/s) un +1 (30 m/s).

Formula, lai aprēķinātu ietekmes koeficientu  $a_i$

$$a_i = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i * a_{1i}}{8} \quad (1.3.)$$

Rāmjslides sildīšanas procesu ietekmē vairāki faktori: pats galvenais ir ārējais temperatūra silšanas procesa gaitā  $\theta_{\text{ār}}$ , kura Latvijas klimatiskajos apstākļos var mainīties no  $-35^\circ\text{C}$ , atliekot uz lineārās skalas – galēji kreisais punkts ar relatīvo vērtību -1 un līdz  $+5^\circ\text{C}$  ar relatīvo vērtību +1 uz lineārās skalas. Pie  $\theta_{\text{ār}} \geq +5^\circ\text{C}$  faktiski sildīt vajag tikai, ja ir nokrišņi lietūs veidā un vējš ir tik stiprs, ka visu radīto siltumu izkliedē apkārtējā vidē un rodas risks, ka asmens var piesalt pie rāmjslides. Par stipru vēju var uzskatīt vēju ar ātrumu  $v \geq 30 \text{ m/s}$  (+1 uz lineārās skalas). Ja ir pilnīgs bezvējš un nav nekādu nokrišņu lietūs vai ledus veidā, tad pie  $\theta_{\text{ār}} \geq +5^\circ\text{C}$  pārmiju var nesildīt. Tātad, ļoti būtisks faktors ir nokrišņu apjoms – ja nokrišņu intensitāte ir zema vai tā notiek stabilas pozitīvas temperatūras laikā  $+1^\circ\text{C} \leq \theta_{\text{ār}} \leq +5^\circ\text{C}$ , tad sildīšanas apjoms var tikt samazināts vai sildīšana var nenotikt vispār. Ja nenotiek snigšana un  $N = 0 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ , tad to pieņem lineārā skalā kā -1, bet, ja snigšanas intensitāte ir  $N = 30 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ , tad to pieņem kā +1.

Visu trīs faktoru ietekmi uz nepieciešamo sildīšanas jaudu var novērtēt ar šādu regresijas izteiksmi:

$$P = P_0 + a_1\theta_{\text{ār}}^* + a_2N^* + a_3V^*, \quad (1.4.)$$

kur:  $P_0$  ir nepieciešamā jauda pie visu trīs ietekmes faktoru vidējām vērtībām (nulle uz lineārās skalas).

Ja izmanto tikai linearizēto skalu galējās vērtības -1 un +1, tad nepieciešams sākotnēji izveidot nepieciešamo jaudu tabulu ar  $2^3 = 8$  iespējamām faktoru situācijām. Šādu tabulu vislabāk ir veidot eksperimentālā veidā, taču tad jārod iespēja mainīt visus trīs faktorus plašā diapazonā. Tāpēc parasti tiek izmantota ekspertu metode ar jaudas tuvinātu aprēķinu – eksperta novērtējumu pēc ietekmes lieluma.

Iestatot minimālo vērtību (-1), maksimālo vērtību (+1) tika iegūta jaudu tabula ar sekojošām jaudām, kas 10 minūšu režīmam ekspertu ieskatā izskatās šādi:

1.6. tabula

Nr.p.k. / ietekmes koeficients	$\theta_{\text{ār}}^*$	$N^*$	$V^*$	Jauda $P$ , kW
1	-1	-1	-1	$P_1 = 8$
2	-1	-1	+1	$P_2 = 13$
3	-1	+1	-1	$P_3 = 12$
4	-1	+1	+1	$P_4 = 8$
5	+1	-1	-1	$P_5 = 8$
6	+1	-1	+1	$P_6 = 2$
7	+1	+1	-1	$P_7 = 1,5$
8	+1	+1	+1	$P_8 = 2$

\* Gadījumā, ja jauda pārsniedz sildīšanas maksimālo jaudu, šis parametrs liecina par apsildes laika palielināšanos.

Vidējo jaudas vērtību nosaka, vienkārši summējot visus astoņus jaudas mērījumus un summu dalot ar 8 (trīs faktori):

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i}{8} = \frac{8 + 13 + 12 + 8 + 8 + 2 + 1,5 + 2}{8} = 6,81 \text{ kW}.$$

Ārējā gaisa temperatūras ietekmes faktoru nosaka, summējot katra mērījuma rezultāta reizinājumu ar faktora relatīvo vērtību mērījumā:

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^8 P_i \cdot a_{i1}}{8} = \frac{-8 - 13 - 12 - 8 + 8 + 2 + 1,5 + 2}{8} = -3,44.$$

Līdzīgi nosaka nokrišņu ietekmes koeficientu:

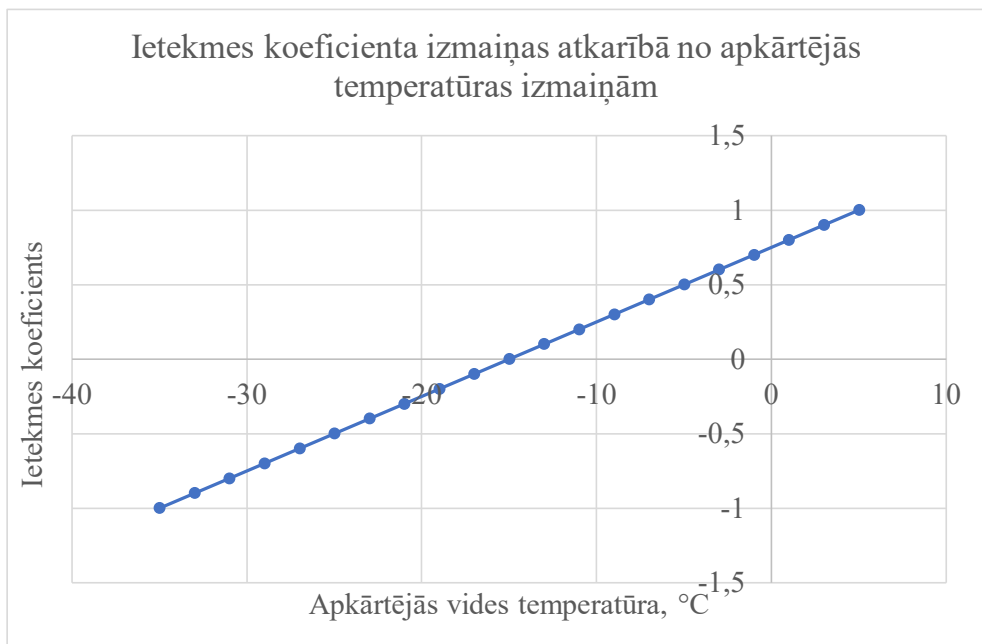
$$a_2 = \frac{-8 - 13 + 12 + 8 - 8 - 2 + 1,5 + 2}{8} = -0,94.$$

un vēja ietekmes koeficientu:

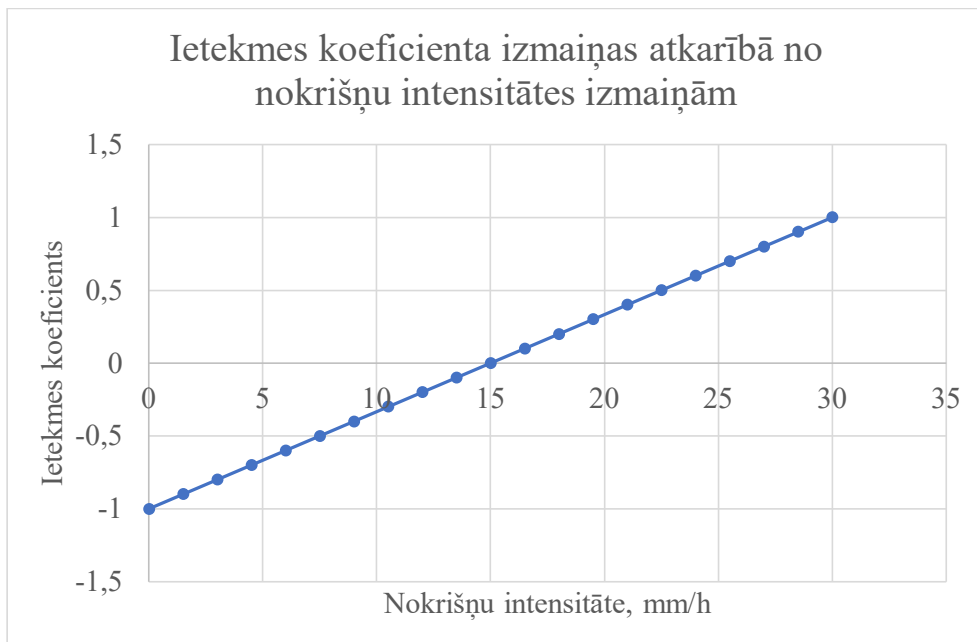
$$a_3 = \frac{-8 + 13 - 12 + 8 - 8 + 2 - 1,5 + 2}{8} = -0,56.$$

Kopumā:

$$P = 6,81 - 3,44\theta_{\text{ār}}^* - 0,94N^* - 0,56V^* \text{ (kW)}. \quad (1.5.)$$



1.5. att. Ietekmes koeficienta izmaiņas atkarībā no temperatūras izmaiņām



1.6. att. Ietekmes koeficienta izmaiņas atkarībā no nokrišņu intensitātes izmaiņām

Maksimālā jauda būs nepieciešama pie zemas ārējā gaisa temperatūras, lieliem nokrišņiem un stipra vēja:

$$P_{maks} = 11,8 \text{ kW}.$$

Minimālā nepieciešamā jauda novērtējumu zonā būs pie  $\theta_{\text{ār}} = +5 \text{ }^\circ\text{C}$ , nenosegtām sliedēm un bezvēja:

$$P_{min} \geq 0 = 1,88 \text{ kW}.$$

Patiesībā pie  $\theta_{\text{ār}} = +5 \text{ }^\circ\text{C}$  sildīšanu var pārtraukt.

Vēlreiz jāatgādina, ka saite starp relatīvo un reālo vērtību pie 1.5. att. un 1.6. att. attēlotajām sakarībām tiek izteikta kā:

$$\theta_{\text{ār}}^* = -1 + \frac{2(\theta_{\text{ār}} - \theta_{\text{min}})}{\theta_{\text{ār max}} - \theta_{\text{ār min}}} \quad (1.6.)$$

Ja  $\theta_{\text{min}} = -45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta_{\text{max}} = +5 \text{ }^\circ\text{C}$  un, piemēram,  $\theta_{\text{ār}} = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ , tad relatīvā vērtība ir:

$$\theta_{\text{ār}}^* = -1 + \frac{2(-15 - (-45))}{5 - (-45)} = -1 + \frac{60}{50} = 0,2.$$

Ja nokrišņu intensitāte ir 5 mm/h, tad relatīvā vērtība:

$$N^* = -1 + \frac{2(5 - 0)}{30 - 0} = -1 + \frac{10}{30} = -0,67,$$

bet ja vēja ātrums ir 3 m/s, tad relatīvi tas ir

$$V^* = -1 + \frac{2(3 - 0)}{30 - 0} = -0,8.$$

Ja ir iegūta regresijas izteiksme ar ietekmes koeficientiem, tad var iegūt nepieciešamo jaudu vērtības pie visām ietekmes faktoru reālajām vērtībām, šo vērtību izpētes diapazons, t.i. ārējā

gaisa temperatūrai no  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nokrišņu intensitātei no  $1\text{ mm/h}$  līdz  $30\text{ mm/h}$ , vēja stiprumam no  $0\text{ m/s}$  līdz  $30\text{ m/s}$ , t.i. iegūt  $P = f(\theta_{\text{ār}}, N, V)$ .

Patiesībā ir ļoti grūti novērtēt nepieciešamo jaudu, jo tā atkarīga gan no stacionāriem parametriem (masa, siltumietilpība, daļēji starpība starp nepieciešamo pārmijas temperatūru un apkārtējās vides temperatūru), gan dinamiskajiem – vides temperatūras izmaiņas ātrums, klimatisko apstākļu izmaiņas atkarībā no klimatiskajiem dinamiskajiem ietekmes faktoriem – vēja stipruma, mitruma, atmosfēras spiediena. Pētījumā [16] veikta jaudas izmaiņas izpēte atkarībā no dažādiem vides faktoriem. Pētījums veikts Zviedrijā, kur klimatiskie apstākļi ir tuvu Latvijas apstākļiem. Pēdējais ietekmes faktors ir objekta ģeogrāfiskais stāvoklis (vieta), kas ir ļoti būtisks un šī ģeogrāfiskā novietne lielā mērā nosaka pārmijas apsildes sistēmas izveides prasības. Kustības maršruts var sākties (beigties) ģeogrāfiskā punktā, kur speciāla apsilde nav nemaz vajadzīga, un beigties (sākties) bargos klimatiskos apstākļos. Tas nozīmē, ka pat vienam maršrutam, ja tas ir garš, katram posmam var iznākt veidot individuālu sistēmu pēc nepieciešamās nominālās jaudas, kā arī maksimālās jaudas ekstrēmām situācijām, kurās ir jānodrošina pārmijas funkcionēšana.

Ievērojot maksimāli spēcīgus ietekmes faktorus, jauda būs ļoti liela, taču reāli šāda situācija ir maz iespējama un sistēma darbosies ar samazinātu, pret maksimāli iespējamo, jaudu.

Minētais parāda, ka ietekmes faktoru izpēte ir ļoti būtisks jautājums, kas jārisina, jo no tā atkarīga racionāla un efektīva sistēmas darbība.

## 1.5. Ietekmes faktoru analīze

Pēc pētījumu [16], [40], [41] analīzes tika secināts, ka pamata pārmijas apsildes ietekmes faktori jeb ieejas lielumi/parametri ir:

- apkārtējās vides temperatūra –  $\theta_{\text{ār}}$ ;
- sniegs un tā intensitāte –  $N$ ;
- vēja stiprums –  $V$ ;

Izejas lielums:

- elektriskā sildelementa jauda.

Turklāt pētījumos [16], [33] galvenais uzsvars tiek likts uz ieejas lielumiem – apkārtējās vides temperatūra, sniegs un tā intensitāte. Tieši šie faktori atstāj lielāko ietekmi uz elektriskās apsildes ilgumu / jaudu / nepieciešamību.

Taču procesu būtiski ietekmē vairāki faktori: vējš, kas ne tikai izkļiedē apsildes sistēmas ģenerēto siltumenerģiju, bet arī uzpūš jaunus sniega slāņus; bez tam sildīšanas efektivitāti samazina sniega slāņa sākotnējais biežums un snigšanas intensitāte. Ja apkārtējās vides temperatūra ir ietekmes faktors  $\theta_{\text{ār}}$ , tad sniegs un tā intensitāte ir faktors  $N$ . Abi faktori ir viegli izmērāmi ar attiecīgiem sensoriem. Faktors  $V$  ir vēja stiprums – jo stiprāks vējš, jo apsildes sistēmas efektivitāte ir zemāka. Arī apkārtējās vides mitrums ir ļoti svarīgs faktors un, ja vēl līst lietus, tad pie negatīvas gaisa temperatūras notiek apledošanas, kas ir sevišķi bīstama situācija. Nokrišņu esamības pārbaudes rezultāts nosaka elektriskās jaudas izmantošanas efektivitāti. Ja ir zināmi reālie faktori  $X_i$ , tad to ietekme pieņemtajā reālā faktora izmaiņas diapazonā  $x_{i\text{ max}} \dots x_{i\text{ min}}$  var tikt izteikta nosacītā linearizētā faktorā:

$$x_i^* = -1 + \frac{2(x_i - x_{i\text{ min}})}{x_{i\text{ max}} - x_{i\text{ min}}} \quad (1.7.)$$

Piemēram, ja maksimālais vēja ātrums ir  $V_{max} = 35 \text{ m/s}$ , minimālais vēja ātrums ir  $V_{min} = 0 \text{ m/s}$ , tad izmērītais reālais vēja stiprums dod nosacīto faktoru:

$$V^* = -1 + \frac{2(5 - 0)}{35 - 0} = -0,71$$

Tātad, temperatūru starpības noteiktā jauda ir jākorrigē, jo tā noteikta pie  $V^* = -1$ . Korekcijas koeficienta realizācija vēja stiprumam atkarībā no tā lieluma.

### **Secinājumi par pirmo nodaļu.**

Nodaļā ir apskatīta dažādu ietekmes faktoru ietekme uz pārmijas apsildes nepieciešamo jaudu. Tika aprakstīta pārmijas darbības funkcionālā shēma, iztīrīta pārmijas darbība un piedāvāta pārmijas darbības elektriskā aizvietošanas shēma. Tika aprēķināti ietekmes faktoru koeficienti un noteikti ietekmīgākie – āra gaisa temperatūra un nokrišņu daudzums. Termālā stāvokļa stabilizācijas uzdevumi ir sekojoši:

1. uzturēt zonu starp pārmijas rāmjsliedi un asmeni tīru jebkuros laika apstākļos;
2. uzturēt sliedes temperatūru  $+5 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  robežās;
3. būt savietojamai ar vadības un regulēšanas sistēmu, lai būtu iespēja regulēt apsildes jaudu, ilgumu un citus parametrus no vadības datora;
4. būt savietojamai ar meteostaciju, temperatūras sensoru vai anemometru laika apstākļu noteikšanai un monitoringam;

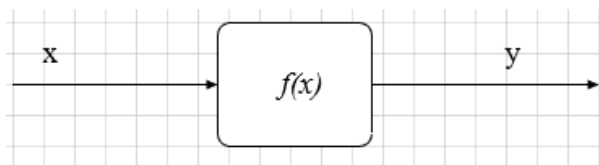
Galvenais secinājums – laika apstākļu ietekme uz pārmiju apsildes jaudu var variēt atkarībā no pārmijas ģeogrāfiskā stāvokļa, un nosakot katra ietekmes koeficienta ietekmi, ir iespējams pielāgot apsildes jaudu katram ģeogrāfiskam reģionam ar attiecīgiem dominējošiem laika apstākļiem.

## 2. PROGNOZĒTĀS JAUDAS NOTEIKŠANA UN REGULĒŠANAS SISTĒMAS IZVĒLE

Lai dziļāk izpētītu jaudas regulēšanas sistēmu, tika apskatīti vadības sistēmu uzdevumi un sistēmu klasifikācija.

Sistēmas var pētīt vairākās zinātnes jomās, taču tām ir vispārīgas īpašības [42], [43]:

- sistēma sastāv no daļām – ieejas ( $x$ ), izejas ( $y$ ) un funkcionālā bloka ( $f(x)$ ) (2.1. att.);
- sistēmai ir jaunas īpašības, salīdzinot ar elementiem;
- elementi ir savstarpēji saistīti kādā struktūrā;
- sistēma laika gaitā mainās (pēc saviem likumiem vai ārējās iedarbības ietekmē), var būt dažādos stāvokļos.



2.1. att. Vienkāršas noslēgtas sistēmas blokshēma

### 2.1. Sistēmas definēšana

Sistēmas jēdzienam ir daudz un dažādu definīciju. Kā sistēmas definīcijas piemēru var minēt, ka sistēma ir noteikts savstarpēji saistītu elementu kopums, kas veido stabilu vienotību un integrātā, kam piemīt neatņemamas īpašības un likumi [44].

Sistēmu dažreiz sauc arī par tādu selektīvi iesaistītu komponentu kompleksu, kurā mijiedarbojas un attiecības iegūst komponentu mijiedarbības raksturu, lai iegūtu mērķtiecīgi noderīgu rezultātu [45].

Darbā tika apskatīti daži raksturīgi šīs definīcijas punkti:

– ... *tikai tāds selektīvi iesaistītu komponentu komplekss* ... – tas nozīmē, ka, pirmkārt, ne visi objekta komponenti var kļūt par sistēmas elementiem, un, otrkārt, šādi selektivitātei ir zināms iemesls;

– ... *kurā mijiedarbība un attiecības iegūst komponentu mijiedarbības raksturu ar mērķi iegūt mērķtiecīgu rezultātu* ... – definējot sistēmu parasti nav svarīgs mijiedarbojošos komponentu kopums, bet gan mijiedarbības kopums, lai sasniegtu kaut ko konkrētu un noteiktu.

Elements ir kompleksa veseluma neatņemama sastāvdaļa. Elements ir nedalāma sistēmas daļa, kas ir neatkarīga no šīs sistēmas. Elementa nedalāmība tiek uzskatīta par uzskaites nelietderīgumu tās iekšējās struktūras noteiktās sistēmas modelī [46], [47]

Pašu elementu raksturo tikai tā ārējās izpausmes savienojumu un attiecību veidā ar citiem elementiem.

Sistēmas elementu kopu  $A$  var raksturot sekojošā veidā:

$$A = \{a_i\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2.1.)$$

kur  $a_i$  ir sistēmas  $i$ -tais elements;  $n$  ir elementu skaits sistēmā. Katram  $a_i$  elementam ir raksturīgas  $m$  specifiskas īpašības  $Z_{i1}, \dots, Z_{im}$  (svars, temperatūra, utt.), kas to unikāli definē šajā sistēmā [45].



## 2.2. Sistēmas stāvoklis un darbība

Procesus, kas notiek sarežģītās sistēmās, parasti nevar uzreiz attēlot matemātisku attiecību vai vismaz algoritmu veidā. Tāpēc, lai kaut kā raksturotu stabilu situāciju vai tās izmaiņas, nepieciešams izmantot īpašus terminus.

*Stāvoklis.* Ar jēdzienu *stāvoklis* parasti raksturo tūlītēju ekrānšāviņu, sistēmas “izgriezumus”, apstāšanos tās attīstībā. To nosaka vai nu ar ieejas darbībām un izejas signāliem (rezultātiem), vai ar makroparametriem, makro īpašībām (spiediens, ātrums, paātrinājums). Ar jēdzienu “stāvoklis” parasti apraksts sistēmas miera stāvokli (stabiliem ieejas un izejas signāliem), vienmērīgas taisnas kustības stāvokli (stabilu ātrumu), utt [35].

*Sistēmas stāvoklis* ir tās  $n$  elementu un sakaru starp tiem stāvokļu kopums (sistēmā ar  $n$  elementiem var būt ne vairāk kā  $n(n - 1)$  divpusēju sakaru). Ja sakari sistēmā nav mainīti, tās stāvokli var attēlot kā

$$Z = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_k, \dots, Z_m) \quad (2.2.)$$

Konkrētas sistēmas piešķiršana tiek vienkāršota līdz tās stāvokļu piešķiršanai, sākot ar sākumu un beidzot ar pastāvēšanas beigām vai pāreju uz citu sistēmu.

Reāla sistēma nevar būt ikvienā stāvoklī. Vienmēr ir zināmi ierobežojumi – daži iekšēji un ārējie faktori. Reālas sistēmas iespējamie stāvokļi sistēmas stāvokļu telpā veido noteiktu apakšapgabalu  $Z_{at}$  (apakštelpa) – sistēmas pieļaujamo stāvokļu kopums.

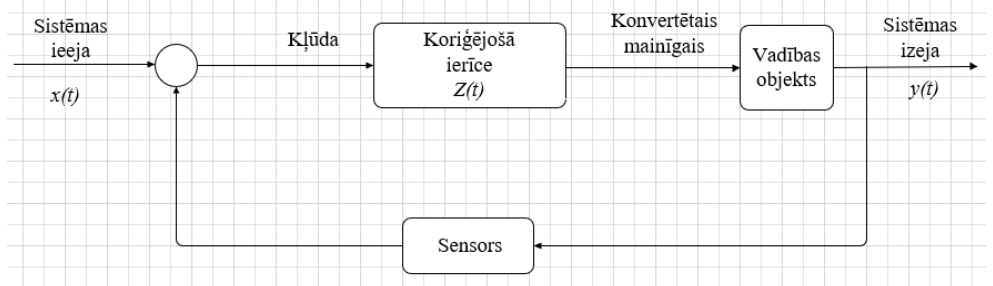
*Uzvedība.* Ja sistēma ir spējīga pāriet no viena stāvokļa uz citu (piemēram,  $s1 \rightarrow s2 \rightarrow s3 \rightarrow \dots$ ), tad uzskata, ka tai piemīt uzvedība. Šis jēdziens tiek izmantots, ja nav zināmi modeļi (noteikumi) pārejai no viena stāvokļa uz otru. Tad uzskata, ka sistēmai ir sava veida uzvedība, un uzzina tās būtību, algoritmu. Ņemot vērā ieviestos apzīmējumus, uzvedību var attēlot kā funkciju:

$$s(t) = [s(t - 1), y(t), x(t)]. \quad (2.3.)$$

*Līdzsvars.* Līdzsvara jēdziens tiek definēts kā sistēmas spēja uzturēt savu stāvokli cik vien ilgi tas iespējams, ja nav ārēju traucējošu ietekmju (vai arī pie pastāvīgas ietekmes). Šo stāvokli sauc par līdzsvara stāvokli.

*Stabilitāte.* Stabilitāti saprot kā sistēmas spēju atgriezties līdzsvara stāvoklī pēc tam, kad tā tika izvesta no šī stāvokļa ārēju (bet sistēmās ar aktīviem elementiem – iekšēju) traucējošu ietekmju ietekmē. Šī spēja parasti piemīt sistēmām ar konstantu izeju  $y$  tikai tad, ja novirzes nepārsniedz noteiktu robežu.

Līdzsvara stāvokli, kurā sistēma spēj atgriezties, sauc par stabilu līdzsvara stāvokli. Atgriešanos šajā stāvoklī var pavadīt svārstību process. Attiecīgi sarežģītās sistēmās ir iespējami nestabili līdzsvara stāvokļi.



2.2. att. Sistēmas blokhēma ar vienu atgriezenisko saiti

Sistēmas ieejas  $x_i$  ir dažādi ārējās vides ietekmes pielietošanas punkti uz sistēmu (2.2. att.).

Vispārinātu ieeju ( $X$ ) sauc par kaut kādu (jebkuru) visu sistēmas  $r$  ieeju stāvokli, ko var attēlot kā vektoru

$$X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_r). \quad (2.4.)$$

Sistēmas izeja  $y_i$  ir informācijas, vielas un enerģijas pārveidošanas rezultāts. Atgriezeniskā saite – saite, kas savieno izeju ar sistēmas ieeju un tiek izmantota, lai kontrolētu izejas izmaiņas (2.2. att.).

Sistēmas ierobežojumi nosaka tās funkcionēšanas nosacījumus (procesa īstenošana). Ierobežojumi var būt iekšēji un ārēji. Viens no ārējiem ierobežojumiem ir sistēmas darbības mērķis. Iekšējo ierobežojumu piemērs var būt resursi, kas nodrošina konkrēta procesa īstenošanu.

Sistēmas kustība ir secīgs stāvokļa izmaiņu process, bet Piespiedu sistēmas kustība ir tās stāvokļa maiņa ārējās vides ietekmē. Piespiedu kustības piemērs ir resursu kustība pēc pavēles (ievadīts sistēmā no ārpuses).

Paškustība – izmaiņas sistēmas stāvoklī bez ārējās vides ietekmes (tikai iekšēju iemeslu ietekmē).

Sistēmas  $Z(t)$  stāvoklis jebkurā laika brīdī  $t$  ir atkarīgs no ieeju funkcijas  $X(t)$

$$Z(t) = F_c[X(t)], \quad (2.5.)$$

kur  $F_c$  – sistēmas stāvokļa funkcija (pārejoša funkcija).

Sistēmas  $Z(t)$  stāvoklis jebkurā brīdī  $t$  ir atkarīgs arī no tā iepriekšējiem stāvokļiem laika brīžos  $Z(t-1)$ ,  $Z(t-2)$ , ..., t.i. no tā stāvokļu funkcijām (pārejām)

$$Z(t) = F_c[X(t), Z(t-1), Z(t-2), \dots] \quad (2.6.)$$

kur  $F_c$  – sistēmas stāvokļa (pāreju) funkcija.

Saiti starp sistēmas ieejas funkciju  $X(t)$  un izejas funkciju  $Y(t)$ , neņemot vērā iepriekšējos stāvokļus, var attēlot kā

$$Y(t) = F_B[X(t)], \quad (2.7.)$$

kur  $F_B$  – sistēmas izeju funkcija.

Sistēmu ar tādu izeju funkciju sauc par statisku.

Ja sistēma ir atkarīga ne tikai no ieeju funkcijām  $X(t)$ , bet arī no stāvokļu (pāreju) funkcijām  $Z(t-1)$ ,  $Z(t-2)$ , ..., tad

$$Y(t) = F_B[X(t), Z(t), Z(t-1), Z(t-2), \dots, (Z-v)]. \quad (2.8.)$$

Sistēmas ar šo izejas funkciju sauc par dinamiskām (vai uzvedības sistēmām).

Atkarībā no sistēmu ieejas un izejas funkciju matemātiskajām īpašībām tiek izdalītas *diskrētas un nepārtrauktas* sistēmas.

Nepārtrauktām sistēmām izteiksmes (2.9) un (2.10) izskatās šādi:

$$\frac{dZ(t)}{dt} = F_c[X(t), Z(t)]; \quad (2.9.)$$

$$Y(t) = F_B[X(t), Z(t)]. \quad (2.10.)$$

Vienādojums (2.9.) nosaka sistēmas stāvokli un tiek saukts par sistēmas stāvokļu mainīgo vienādojumu. Vienādojums (2.10.) nosaka novēroto sistēmas izeju, un to sauc par novērojumu vienādojumu.

Funkcijas  $F_c$  (sistēmas stāvokļu funkcija) un  $F_B$  (izeju funkcija) ņem vērā ne tikai  $Z(t)$  pašreizējo stāvokli, bet arī sistēmas ieeju iepriekšējos stāvokļus  $Z(t-1)$ ,  $Z(t-2)$ , ...,  $Z(t-v)$ .

Iepriekšējie stāvokļi ir sistēmas “atmiņas” parametrs. Tāpēc vērtība  $v$  raksturo sistēmas atmiņas apjomu (dziļumu).

*Sistēmas procesi* ir secīgu izmaiņu kopums sistēmas stāvokļi, lai sasniegtu mērķi. Sistēmas procesi ietver:

- ieejas process;
- izejas process;
- sistēmas pārejas process.

*Ieejas process* ir ieejas ietekmju kopums, kas laika gaitā mainās. Ieejas procesu var uzdot, ja katram laika momentam  $t$  noteikt saskaņā ar noteiktu likumu  $\omega$  ieejas darbības  $x \subset X$ . Laika momenti  $t$  ir noteikti uz kopas  $T$ ,  $t \in T$ . Rezultātā šis ieejas process būs laika funkcija  $X[x] = \omega(x)$ .

*Izejas process* ir izejas ietekmju uz vidi kopums, kas laika gaitā mainās.

Sistēmas ietekmi uz vidi nosaka izejas lielumi (reakcijas). Izejas lielumi laika gaitā mainās, veidojot izvades procesu, kas atspoguļo funkciju  $Y[X] = \gamma(X)$ .

*Sistēmas pārejas process (sistēmas process)* ir sākotnējā stāvokļa un ievades darbību pārveidojumu kopums izejas daudzumos, kas laika gaitā mainās saskaņā ar noteiktiem noteikumiem.

### 2.3. Atgriezeniskās saites un tās funkcijas

Atgriezeniskā saite ir viens no sistēmu teorijas pamatjēdzieniem. Sistēmā parasti pieņem, ka ir parametri  $x$  un  $y$ , kas laika gaitā var mainīties [36]. Parametra  $x$  monotona izmaiņa (piemēram, pieaugums) noved pie zināmām parametra  $y$  izmaiņām (piemēram, arī pieauguma), kas savukārt ietekmē  $x$ . Ja šī ietekme paātrina  $x$  izmaiņas vienā un tajā pašā virzienā (veicina izaugsmi), tad šādu saiti sauc par pozitīvu atgriezenisko saiti. Tādējādi procesa rezultāts nostiprina pašu procesu, sistēma attīstās un virzās arvien tālāk no sākotnējā stāvokļa [35].

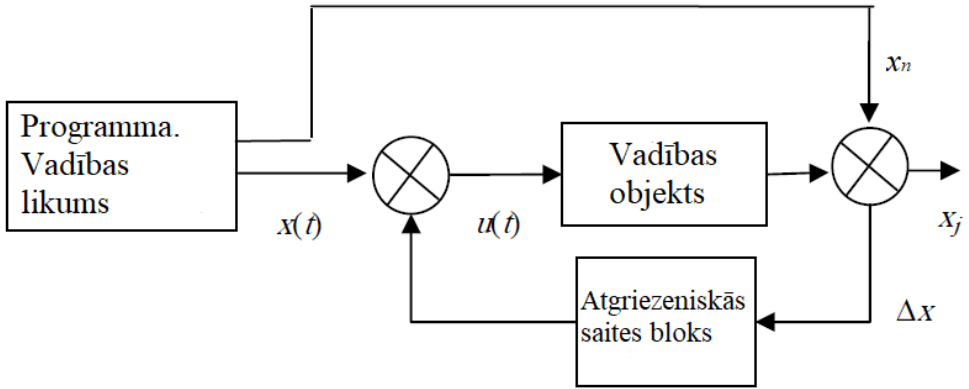
Kopumā vadības sistēma pēc ieejas informācijas apstrādes nodrošina iedarbes signālu nosūtīšanu no vadības apakšsistēmas uz izpildelementiem (sildelementi). Tai pat laikā sistēmai ir jāsniedz brīdinājumi par tās nepareizu darbību, kļūmēm un atteicēm. Ja, gadījumā, kontrolējamie tehniskie rādītāji ir pieļaujamo vērtību diapazonā, tad var secināt, ka arī pati sistēma ir darbderīgā stāvoklī.

Atgriezenisko saiti parasti ilustrē ar shēmām, kas līdzīgas tai, kas parādīta 2.3. attēlā, kur  $x(t)$  ir likums vai vadības algoritms (programma),  $x_n$  – regulējamā parametra nepieciešamā vērtība (“iestatītā vērtība”),  $x_i$  – regulējamā parametra faktiskā vērtība,  $\Delta x$  – neatbilstība starp  $x_n$  un  $x_i$ .

Izmantojot atgriezeniskās saites jēdzienu bieži aprobežojas tikai ar neatbilstības  $\Delta x$  fiksēšanu starp nepieciešamo vērtību  $x_n$  un kontrolētā parametra faktisko  $x_i$  vērtību, bet ir jāņem vērā un jāīsteno visi elementi, neaizmirstot noslēgt atgriezeniskās saites kontūru, atgriezeniskās saites blokā izstrādājot atbilstošās vadības darbības, kas koriģēs vadības likumu  $x(t)$ .

Atgriezeniskās saites var būt:

- negatīvas – kas darbojas pretī izejas parametra izmaiņu tendencēm, t.i. kuru mērķis ir saglabāt, stabilizēt nepieciešamo parametra vērtību;
- pozitīvas – kas saglabā izmaiņu tendenci viena vai otra izejas parametra sistēmā (ko izmanto izstrādes sistēmu modelēšanā).



2.3. att. Sistēmas ar atgriezenisko saiti struktūra

Atgriezeniskā saite var būt:

1. apakšsistēmas atsevišķa procesa objekts;
2. apakšsistēmas integrētā procesa objekts;
3. objekts ar laika ierobežojumu, kas atgriež apakšsistēmas izeju ar augstāku prioritāti (vēlākais pēc laika) salīdzināšanai ar apakšsistēmas kritēriju ar zemāku prioritāti (agrākais pēc laika).

Atgriezeniskā saite var būt negatīva vai pozitīva atkarībā no novirzes jeb kļūdas signāla formēšanas veida. Ja novirzes signāls  $X(t)$  formējas kā sistēmas ieejas signāla un atgriezeniskās saites signāla starpība ( $X(t) = X_{ie0} - X_{as}(t)$ ), sistēmai ir negatīva atgriezeniska saite. Visās tehnoloģisko parametru (temperatūras, spiediena, līmeņa, ātruma u.c.) automātiskās stabilizācijas sistēmās lieto tikai negatīvu atgriezenisko saiti, jo tā likvidē stabilizējamā parametra novirzi no uzdotā lieluma un paaugstina sistēmas darbības stabilitāti un precizitāti [36]. Ja novirzes signāls  $X(t)$  formējas kā sistēmas ieejas signāla un atgriezeniskās saites signāla summa ( $X(t) = X_{ie0} + X_{as}(t)$ ), tad sistēmai ir pozitīva atgriezeniska saite. Pozitīva atgriezeniskā saite paaugstina sistēmas jutību un padara to nestabilu, jo kontrolējamā parametra novirzi no uzdotā lieluma nevis samazina, bet vēl pastiprina. Tāpēc pozitīvu atgriezenisko saiti galvenokārt izmanto nestabilās (svārstīgās) sistēmās, piemēram, impulsu ģeneratoros. Automātiskās stabilizācijas sistēmās pozitīvu atgriezenisko saiti izmanto tikai kā negalveno (vietējo) saiti, ar kuru aptver atsevišķus sistēmas blokus, lai paaugstinātu to jutību.

## 2.4. Termālā stāvokļa tiešas regulēšanas realizācija

Tiešas regulēšanas gadījumā uz ietekmes objektu visu laiku tiek padots laikā nemainīgs signāls. Tajā pat laikā vadības sistēmā nenonāk informācija no vadāmā objekta par tā stāvokli.

Sanāk, ja tiek pārtraukta atgriezeniskā saite, piemēram, summatora tuvumā (2.4. att.), tad šajā gadījumā izejas signāls ir  $Y_{oc}(p)$ , un pārvades funkcija ir attiecība  $Y_{oc}(p)$  pret  $U(p)$ :

$$W = \frac{Y_{oc}(p)}{U(p)} \quad (2.11.)$$

Izmantojot atpakaļgaitas kustības metodi, tiek izveidots operatoru vienādojums atvērtai sistēmai (arguments  $p$  tiek izlaists):

$$Y_{oc} = K_{oc}Y = K_{oc} K E = K_{oc} K U \quad (2.12.)$$

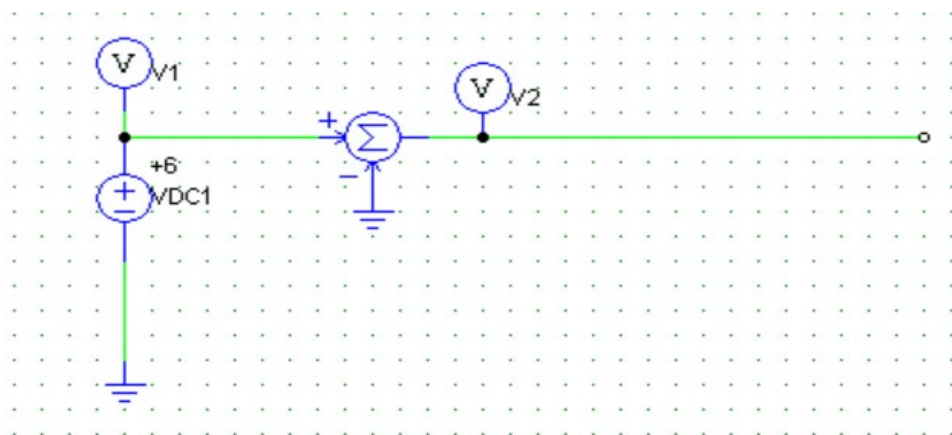
Tas ir, saskaņā ar (2.11 un 2.12) atvērtās sistēmas pārvades funkcija būs:

$$W(p) = K_{oc}(p)K(p) \quad (2.13.)$$

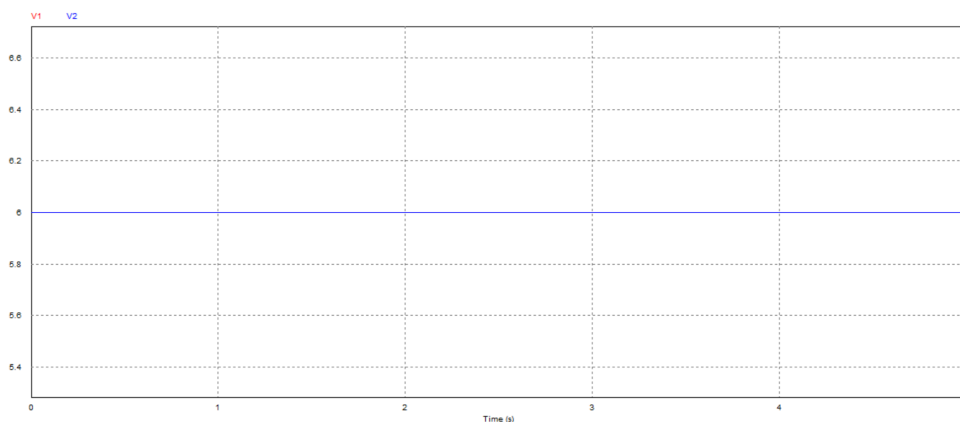
Ja saites  $K(p)$  vietā ir jau savienotu saišu grupa ar pārvades funkciju  $W_1(p)$ , formula paliek nemainīga:

$$W(p) = K_{oc}(p)W_1(p) \quad (2.14.)$$

Atvērtās cilpas sistēmas pārvades funkcija raksturo sistēmas dinamiskās īpašības.



2.4. att. Tiešās regulēšanas simulācijas shēma PSIM vidē



2.5. att. Tiešās regulēšanas sprieguma grafiks (V1 līkne sakrīt ar V2)

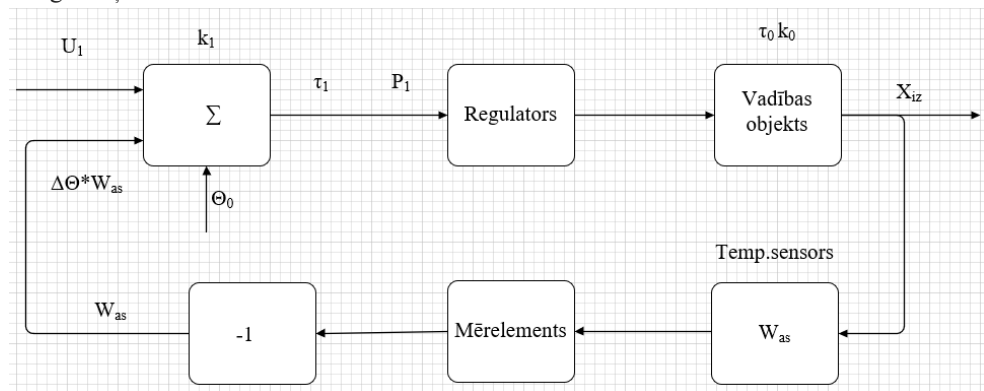
Uz summatoru tiek padots laikā nemainīgs ieejas signāls ar vērtību 6 V. 6 V ir izvēlēti, jo šī sprieguma vērtība ir skaitliski vienāda ar nepieciešamo sliedes temperatūras vērtību un aizstāj to simulācijas laikā. Shēmā ir ievietoti divi voltmetri V1 un V2, kuri mēra signāla vērtību pirms un pēc summatora. Tā kā uz summatoru tiek padots tikai viens laikā nemainīgs signāls, tad abu voltmetru rādījumi ir vienādi 6 V.

Dzelzceļa pārmiju apsildē šādu regulēšanas sistēmas veidu var raksturot kā “ieslēdz un aizmirst”. Tas nozīmē, ka pēc operatora komandas tiek ieslēgta elektriskā apsilde. Uz apsildes elementu tiek padots laikā nemainīgs spriegums un notiek pārmijas apsilde ar nominālu jaudu, un tas ilgst nenoteiktu laiku. Sprieguma lieluma regulēšana nenotiek nekādā veidā, jo shēmā nav sensoru pēc kuru rādījumiem varētu veikt regulēšanu. Šeit ir jāatzīmē, ka šī metode, lai arī izkausēs sniegu, tomēr ir ļoti neefektīva, lieki patērē elektroenerģiju un neatbilst mūsdienu izvirzītajiem klimatiskiem mērķiem.

## 2.5. Termālā stāvokļa regulēšana ar atgriezenisko saiti

Viens no sistēmas regulēšanas veidiem ir tiešā regulēšana pēc kāda parametra. Dotajā apakšnodaļā tika apskatīta regulēšana pēc sliedes temperatūras. 2.6. att. parādīta šāda regulēšanas paņēmiena piedāvātā blokskhēma.

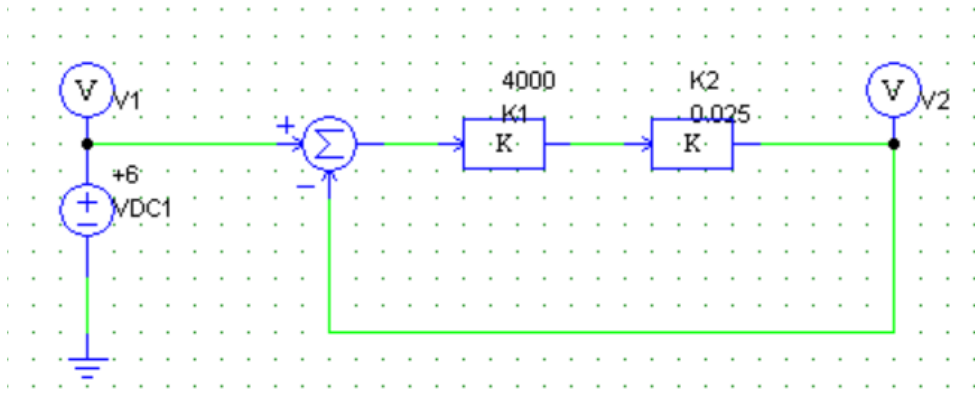
Darbības apraksts – sliedes temperatūra nedrīkst būt zemāka par uzdoto (piem. neatkarīgi no ģeogrāfiskās vietas, tā ir +6 °C). Ja temperatūra ir augstāka, tad sistēma neizpilda regulēšanu, bet, ja zemāka, tad ieslēdz elektrisko apsildi. Sistēmā ir viens sliežu temperatūras sensors, kas piestiprināts uz pārmijas rāmjsliedes. Tiek izmantots šī sensora rādījums, to salīdzina ar references (uzdoto), un atkarībā no temperatūru starpības ieslēdz attiecīgu jaudu, kas var būt proporcionāla starpībai (jaudas regulēšanas sistēma). References signāls var būt konstants, bet var būt arī koriģēts pēc dažādu citu ietekmes sensoru rādījumiem, piemēram, sniega slāņa biezuma.



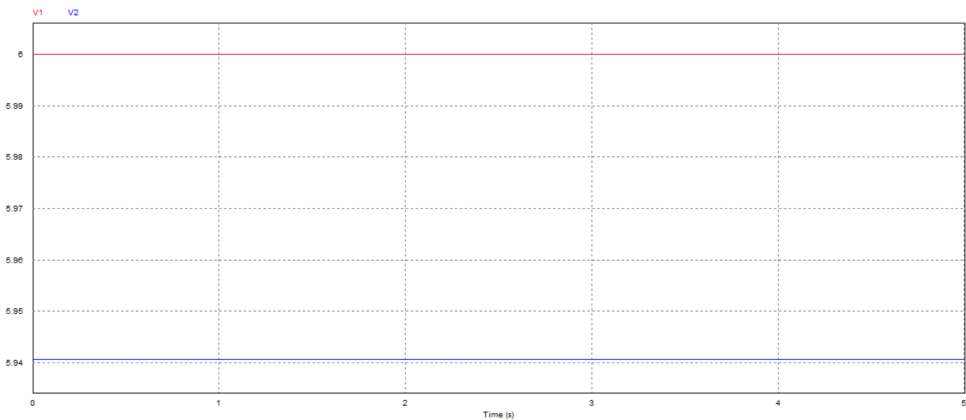
2.6. att. Regulēšanas shēmas ar atgriezenisko saiti modeļa darbības funkcionālā shēma

2.6. attēlotajā tehniskajā piemērā summējošais elements  $\Sigma$ , kurā summējas ieejas signāls  $\Theta_0$  un atgriezeniskās saites izejas signāls  $-x_{iz}(s) * W_{as}(s)$ . Regulators ir pastiprinātājs  $P$ , kura ieejā ir reducētā kļūda  $\sigma_{xr}(s)$ : šajā piemērā temperatūras devēja signāls nonāk vadības sistēmā un radītā starpība starp uzdoto references temperatūru un izmērīto ir par pamatu vadības sistēmas iedarbībai uz vadības objektu. Objekts ir sildelements – apsildes elements, kas ir piestiprināts pie pārmijas rāmjsliedes, ko shēmās un aprēķinos reducētā veidā var aizvietot ar aktīvu pretestību.

Darbā tika modelēta shēmas darbība simulāciju vidē ar mērķi noteikt kā un cik lielā mērā mainās signāls pēc regulatoru un atgriezeniskās saites iedarbes. Rezultātā tika novērots, ka izmērītais signāls ir tuvu uzdotajam, jo kļūda sastādīja tikai 1% lielumu.



2.7. att. Regulēšanas shēmas ar atgriezenisko saiti teorētiskā modeļa darbības elektriskā shēma



2.8. att. Regulēšanas shēmas ar atgriezenisko saiti teorētiskā modeļa darbības sprieguma grafiks

Vispārīgā gadījumā 2.7. att. attēlotajā regulēšanas sistēmas (RS) reducētā kļūda tika aprēķināta sekojoši:

$$\sigma_{xr}(s) = X_0(s) - x_{iz}(s) * W_{as}(s) \quad (2.15.)$$

kur  $X_0(s)$  ir regulēšanas ieejas lielums (parasti laikā maz mainīgs).

Izveidojušos reducēto kļūdu  $\sigma_{xr}(s)$  apstrādāja regulators, kura izejā tika iegūts

$$x_R(s) = \sigma_{xr}(s) * W_R(s) \quad (2.16.)$$

Savukārt objekta izejā tika iegūts:

$$\begin{aligned} x_{iz}(s) &= x_R(s) * W_{ob}(s) = \sigma_{xr}(s) * W_R(s) * W_{ob}(s) \\ &= X_0(s) * W_R(s) * W_{ob}(s) - x_{iz}(s) * W_R(s) * W_{ob}(s) \\ &\quad * W_{as}(s) \end{aligned} \quad (2.17.)$$

No šejienes regulēšanas sistēmas pārvades funkcija tika aprakstīta sekojošā veidā:

$$\Phi_{RS}(s) = \frac{x_{iz}(s)}{X_0(s)} = \frac{W_R(s) * W_{ob}(s)}{1 + W_R(s) * W_{ob}(s) * W_{as}(s)} \quad (2.18.)$$

Tātad sistēmas izejas lielums:

$$x_{iz}(s) = X_0(s) * \Phi_{RS}(s) \quad (2.19.)$$

Ja kļūdas nebūtu nemaz, tad  $\sigma_{xr}(s)$  visu laiku būtu nulle un izejas lielums tiktu aprēķināts:

$$x_{izo}(s) = \frac{X_0(s)}{W_{as}} \quad (2.20.)$$

Reāli nulles kļūda var būt tikai atsevišķās situācijās, bet parasti eksistē regulēšanas kļūda:

$$\sigma_x(s) = x_{izo}(s) - x_{iz}(s) = \frac{X_0(s)}{W_{as}(s)} - x_0(s) * \Phi_{RS}(s) \quad (2.21.)$$

Regulēšanas gaitā tika uzstādīts laikā minimāli mainīgs  $X_0$ , kas noteica gaidāmās regulēšanas sistēmas izejas signāla lielumu. Ja  $x_{iz}(s) * W_{as}(s)$  ir mazāks par  $X_0$ , tad  $\sigma_{xr}(s) > 0$ , un regulatora izejā rodas lielākas jaudas signāls  $x_{RS}(s)$ , kas nodrošina objekta izejas signāla palielināšanos.

Regulējošā iedarbe  $X_r(t)$  uz vadības objektu tika izstrādāta pamatojoties uz informāciju par regulējamā lieluma  $X_{iz}(t)$  novirzi no uzdotās vērtības, tātad sistēma darbojās pēc novirzes, jeb atgriezeniskās saites principa.

Atgriezeniskā saite tika realizēta ar jutīgo elementu – mērīšanas pārveidotāju, kurš mērīja regulējamo parametru – temperatūru un pārveidoja to elektriskā signālā  $X_{as}(t)$ , kas proporcionāls sistēmas izejas lielumam  $X_{iz}(t)$  un tika padots uz diferenciālo shēmu. Tā tika salīdzināta atgriezeniskās saites signāls  $X_{as}(t)$  ar sistēmas ieejas signālu  $X_{ie0}$  un veidots novirzes signāls:

$$X(t) = X_{ie0} - X_{as}(t) \quad (2.22.)$$

Automātiskās vadības iekārta savukārt formē vadības signālu  $X_v(t)$  izpildiekārtai, kas izmaina regulējošo iedarbi uz vadības objektu tā, ka izejas parametrs tiek uzturēts uzdotajā līmenī neatkarīgi no perturbāciju izmaiņas.

Modelēšanas rezultātā tika secināts, ka vadības sistēma ar atgriezenisko saiti veido noslēgtu informācijas pārvades kontūru, kas dod iespēju nepārtraukti kontrolēt vadības objektā notiekošos procesus un formēt atbilstošas regulējošās iedarbes.

Darbā tika pieņemts, ka sistēmai bez vadības iedarbības  $U(p)$  tika pieslēgta traucējošā iedarbība  $Z(p)$ . Shēma tika papildināta ar traucējumu kanālu. Rezultātā ir sistēma, kurai ir divas ieejas un viena izeja.

Traucējumu pārvades funkcija ir definēta kā sistēmas  $Y(p)$  izvades daudzuma attēla attiecība pret ievades daudzuma  $Z(p)$  attēlu:

$$W_z(p) = \frac{Y(p)}{Z(p)} \quad (2.23.)$$

Saskaņā ar superpozīcijas principu katrs signāls iziet cauri sistēmai neatkarīgi no pārējiem. Tas nozīmē, ka katram būs sava pārvades funkcija. Pēc traucējuma,

$$W_z(p) = \frac{W_2(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)} \quad (2.24.)$$

un pēc vadības:

$$\bar{W}(p) = \frac{W_1(p)W_2(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)} \quad (2.25.)$$

$W_1(p)$  un  $W_2(p)$  reizinājums ir atvērtās cilpas sistēmas  $W(p)$  pārvades funkcija. Tāpēc formulu (2.24) var ierakstīt sekojošā formā:

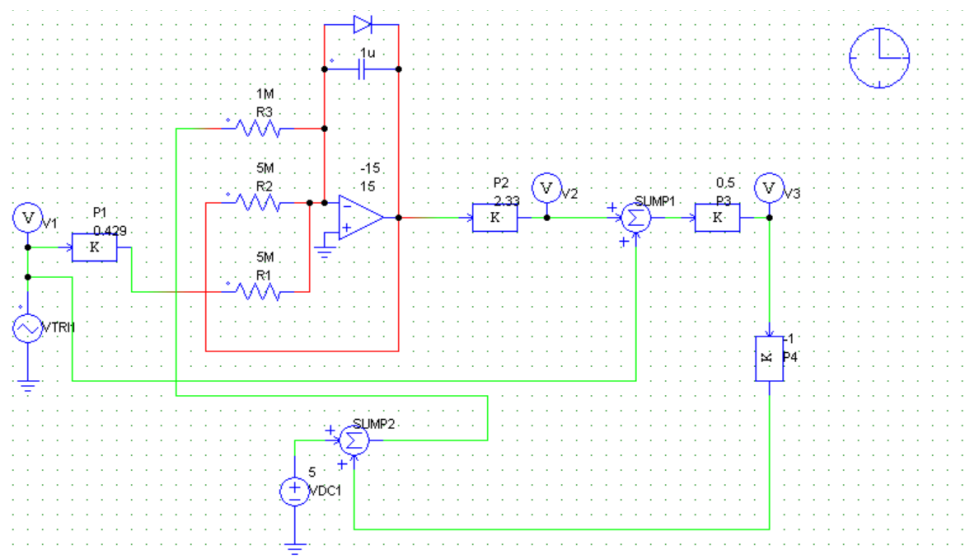
$$W_z(p) = \frac{W_2(p)}{1 + W(p)} \quad (2.26.)$$



Traucējuma pārvades funkcija ir traucējuma kanāla saites pārsūtīšanas funkcijas attiecība pret atvērtās cilpas sistēmas pārvades funkciju, kas palielināta par vienu.

## 2.6. Apsildes jaudas regulēšana ar vadības sistēmu ar traucējuma ietekmi

Promocijas darba autors attīstot piedāvāto modeli un ieviešot papildus elementus, darbā tika iegūta shēma ar traucējuma ietekmi, kas padod signālu uz otru summatoru, tādējādi pastiprinot ieejas signāla vērtību.



2.9. att. Regulēšanas shēmas ar traucējuma ietekmi modeļa elektriskā shēma

$$\Delta\theta_{max} = \Delta\theta_m^* \quad (2.27.)$$

Shēmu var aizstāt ar posmiem, no kuriem galvenie ir summējošais posms  $\Sigma$ , regulators  $R$ , objekts “Vadības obj.” un mērelements  $ME$   $\theta$ , kas realizē atgriezenisko saiti AS. Katram posmam darba gaitā tika definēta sava algebriskā pārvades funkcija (attiecīgi  $W_R(s)$ ,  $W_{ob}(s)$  un  $W_{as}(s)$ ), kas rada iespēju visu sistēmu aprakstīt ar kopēju algebrisku pārvades funkciju.

Darbā tika pieņemts ka pārmiju elektriskās apsildes regulēšanas sistēmā ir noslēgta regulēšanas sistēma ar sliedes temperatūras sensoru  $S_{sl}$ , kura izejas signāls atbilst sliedes temperatūrai  $\theta_{sl}$ . Šis signāls caur mērelementu tiek reducēts uz lielumu  $(-\theta_{sl})$  un salīdzināts ar uzdotās temperatūras signālu  $\theta_0$ , un starpības signāls  $(\theta_0 - \theta_{sl})$  iedarbojas uz sildelementiem pievienotās elektriskās jaudas pārveidotāju, kura izejas jauda ir

$$P = k_c * (\theta_0 - \theta_{sl}) \geq 0 \quad (2.28.)$$

Šī jauda nosaka sildelementu ģenerēto temperatūru  $\theta_1 = W_s(S) * k_c * (\theta_0 - \theta_{sl})$ , kur  $W_s(S)$  ir sildelementu sistēmas pārvades funkcija (izeja pret ieeju),  $S$  – izmaiņu operators. Parasti šī pārvades funkcija var tikt apskatīta atbilstoši pirmās pakāpes aperiodiskā posma funkcijai ar pastiprinājuma koeficientu  $k_s$  un laika konstanti  $T_s$ :

$$W_s(S) = \frac{k_s}{1 + T_s * S} \quad (2.29.)$$

Ģenerētā temperatūra kopā ar vides temperatūru vienlaikus iedarbojas uz sliedi (kuru ir nepieciešams sildīt), veidojot tās temperatūru kā

$$\theta_{sl} = k_{pārv.}(\theta_1 + \theta_v), \quad (2.30.)$$

kur  $k_{pārv.}$  ir koeficients, kas ievēro enerģijas atdevi no sildelementa un ir robežās no (0,33 līdz 0,5). Tādā veidā, izmantojot minētās sakarības:

$$\theta_{sl} = \frac{k_s k_c (\theta_0 - \theta_{sl}) + \theta_v}{2(1 + T_s S)} \quad (2.31.)$$

Regulēšanas sistēmas kopējā pārvades funkcija

$$W_{Rs}(S) = \frac{\theta_{sl}}{\theta_0} = \frac{k_c k_s (\theta_0 - \theta_{sl}) + \theta_v}{2\theta_0 * (1 + T_s S)}. \quad (2.32.)$$

Regulēšanas sistēmas regulējams lieluma relatīvā kļūda

$$\Delta\theta_{sl}^* = \frac{\theta_{sl} - \theta_0}{\theta_0} = \frac{\theta_v - \theta_0}{2\theta_0(1 + k_c W_s(S))}. \quad (2.33.)$$

Stacionārajā režīmā  $S=0$ , un tad relatīvā kļūda ir

$$\Delta\theta_{sl}^*(0) = \frac{\theta_v - \theta_0}{2\theta_0(1 + k_c k_s)}. \quad (2.34.)$$

Parametrs  $k_s$  nosakāms no sildelementu sistēmas diferenciālvienādojuma:

$$P = a \frac{d\theta_1}{dt} + b(\theta_1 - \theta_v), \quad (2.35.)$$

kur  $a [\frac{Ws}{°C}]$ ,  $b = \frac{W}{°C}$  un laika konstante  $T_s = \frac{a}{b}$  (s).

Sildīšanas sistēmas pieslēgšanas sākuma momentā var uzskatīt, ka  $\theta_{10} = \theta_v$ , un tad parametru  $a$  var izteikt kā

$$a = \frac{P_m * T_s}{\Delta\theta_{1m}}, \quad (2.36.)$$

kur  $\Delta\theta_{1m}$  ir ģenerētās sildīšanas temperatūras nepieciešamais pieaugums pie maksimālās jaudas laika konstantes intervālā pēc pieslēgšanas. Pieņemot, ka  $P_m = 5000W$  (kā tas ir esošās "LDz" pārmiju apsildes sistēmās 1/9 pārmijām), laika konstante varētu būt 20s, un  $\Delta\theta_{1m} = 50 °C$ , parametru  $a$  var izteikt kā

$$a = \frac{5000 * 20}{50} = 2000 Ws/°C.$$

Parametrs  $b$  tad ir

$$b = \frac{a}{T_s} = 100 Ws/°C.$$

Tādā veidā sildelementu sistēmas diferenciālais vienādojums ir:

$$P = 2000 \frac{d\theta_1}{dt} + 100(\theta_1 - \theta_v) \quad (2.37.)$$

un kas tika modelēts operacionālā pastiprinātāja shēmā integrējot summu:

$$\theta_1 = - \int \frac{d\theta_1}{dt} = - \int \frac{P - 100(\theta_1 - \theta_v)}{2000} dt. \quad (2.38.)$$

Tā kā parasti OP barošanas spriegumi nepārsniedz 15V, bet  $\theta_1$  var būt arī lielāks par 35 °C,  $\theta_1$  modelēšanas nolūkos tika pieņemts mēroga parametrs  $m_{\theta_1} = \frac{35}{15} = 2,33 °C/V$ , t.i.

$\theta_1 = m_{\theta_1} * [\theta_1]$ , kur  $[\theta_1]$  ir volts mērāmā temperatūra. Savukārt, ievērojot procesa lielās laika konstantes var rēķināt paātrināti uzstādot  $m_t > 1$ , t.i. reālais laiks

$$t = m_t * T, \quad (2.39.)$$

kur T – laiks modelēšanas sistēmā

Ja  $m_t = 4$ , tad rēķina 4 reizes ātrāk un operacionālā diferenciāļa izpildes laiks ir

$$S = \frac{d}{dt} = \frac{1}{m_t} S_{op}. \quad (2.40.)$$

Ievērojot mērogus, izteiksme (9) transformējas kā

$$P = 2000 * 0,25 S_{op} * 2,33[\theta_1] + 100 * 2,33[\theta_1] - 233[\theta_v]. \quad (2.41.)$$

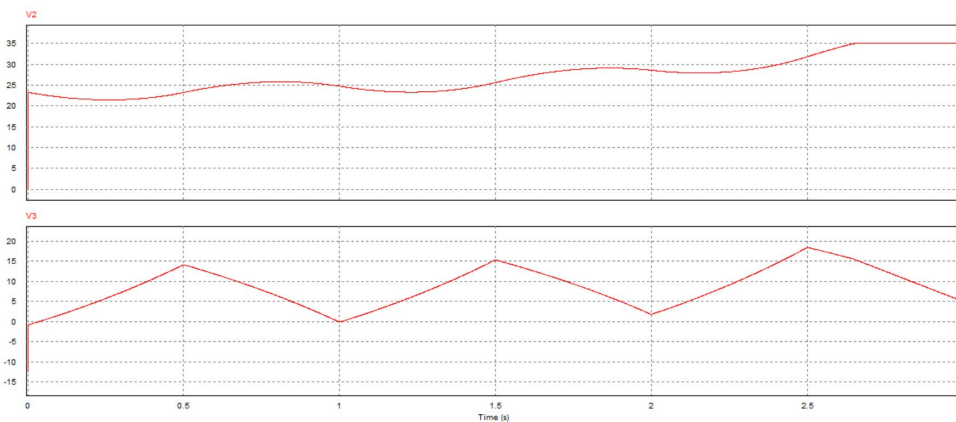
Ja pieņem, ka  $P = 5000W$ , tad

$$S_{op}[\theta_1] = \frac{5000 - 233[\theta_1] + 233[\theta_v]}{500 * 2,33} \quad (2.42.)$$

*Modeļa shēmas darbības apraksts.*

Signāla avots ir trīsstūra formas signāla avots, kas caur pastiprinājuma bloku P1 ar koeficientu  $K = 0,429$  ir pieslēgts pie elektriskās apsildes bloka, ko veido trīs paralēli slēgtas aktīvās pretestības ar nomināliem  $1 \text{ M}\Omega$ ,  $5 \text{ M}\Omega$  un  $5 \text{ M}\Omega$ . Tālāk, signāls caur nākamo pastiprinājuma bloku P2 ar koeficientu  $K = 2,33$  nokļūst summatorā S1. Pēc summatora S1, kur jau shematiski atrodas apsildāmā sliede ir ievietots pastiprinājuma koeficients  $K = 0,5$ , kas saskaņā ar vienādojumu (2.33) daļa izteiksmi ar 2. Pēc tam seko nākamais pastiprinājuma bloks ar koeficientu  $K = -1$ , kas izpilda atgriezeniskās saites funkciju. Uzstādītā temperatūra ( $t_0 = +5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) tiek padota no avota VDC1, kas tālāk ir ieslēgts elektriskās apsildes blokā.

Regulēšanas shēmas ar traucējuma ietekmi modelī (2.12. att.) ir parādīts pārmiju apsildes vadības vienkāršotais modelis, kurā jau ir ietverta vadības sistēmas reakcija un apsildes vadība balstoties uz traucējuma ietekmi, kas nāk no sliedes temperatūras devēja  $\theta_{sl}$ .



2.10. att. Regulēšanas shēmas ar traucējuma ietekmi signālu grafiks

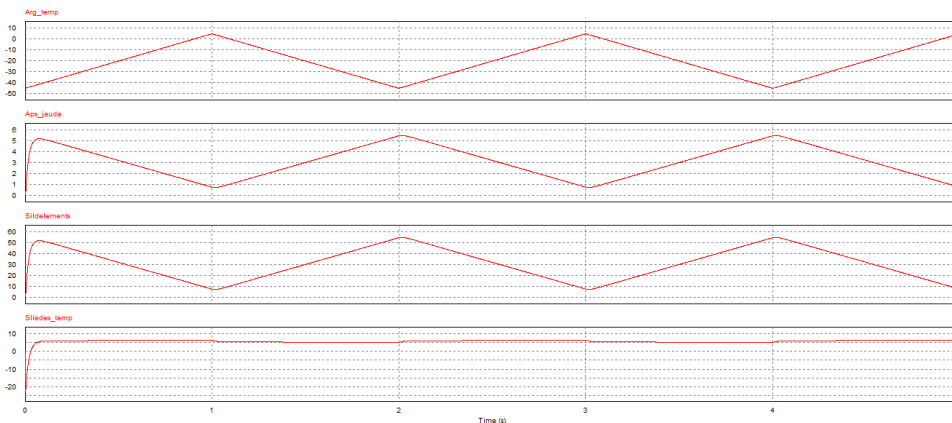
Analizējot signālu grafikus (2.13. att.) tika secināts, ka sildelementa temperatūra aug lēzeni un 2,5 sekunžu laikā sasniedz maksimumu un nostabilizējošos režīmu ar temperatūras līmeni  $+35$  grādi. Savukārt sliedes temperatūra paaugstinās atbilstoši trīsstūra formai, jo arī ieejas signāls ir trīsstūrveida. Pēc 2,5 sekunžu simulācijas sliedes temperatūra sasniedz aptuveni  $+18$  grādu līmeni un zemākajā punktā nenoslīd zem 0. Aprēķinātā kļūda saskaņā ar

$$\Delta\theta_{sl}^* = \frac{\theta_0 - \theta_{sl}}{\theta_0} \quad (2.43.)$$

sasniedz aptuveni 21–25%. Sākotnēji šāda kļūda šķiet augsta, taču jāņem vērā, ka ar precīzāku traucējumu avotu, kas simulēs apkārtējās vides temperatūru un tehnisko risinājumu, kas

ierobežos apsildi, kad apkārtējās vides temperatūra sasniedz  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , var panākt zemāku kļūdas līmeni.

Simulācijas laikā tika izveidoti apkārtējās vides temperatūras, apsildes jaudas, sildelementa temperatūras un sliedes temperatūras grafiki (2.17. att.), lai analizētu simulācijas rezultātus. Analīzes rezultātā tika secināts, ka simulācijas modelis pilda savus uzdevumus, jo pat zemākās apkārtējās temperatūras apstākļos apsildes jauda tiek piegādāta pietiekama, lai noturētu sliedes temperatūru  $5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$  diapazonā, kas atbilst iestatītai jeb uzdotai temperatūrai ( $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



2.11. att. Apsildes jaudas atkarības no nokrišņiem un vēja stipruma grafiks

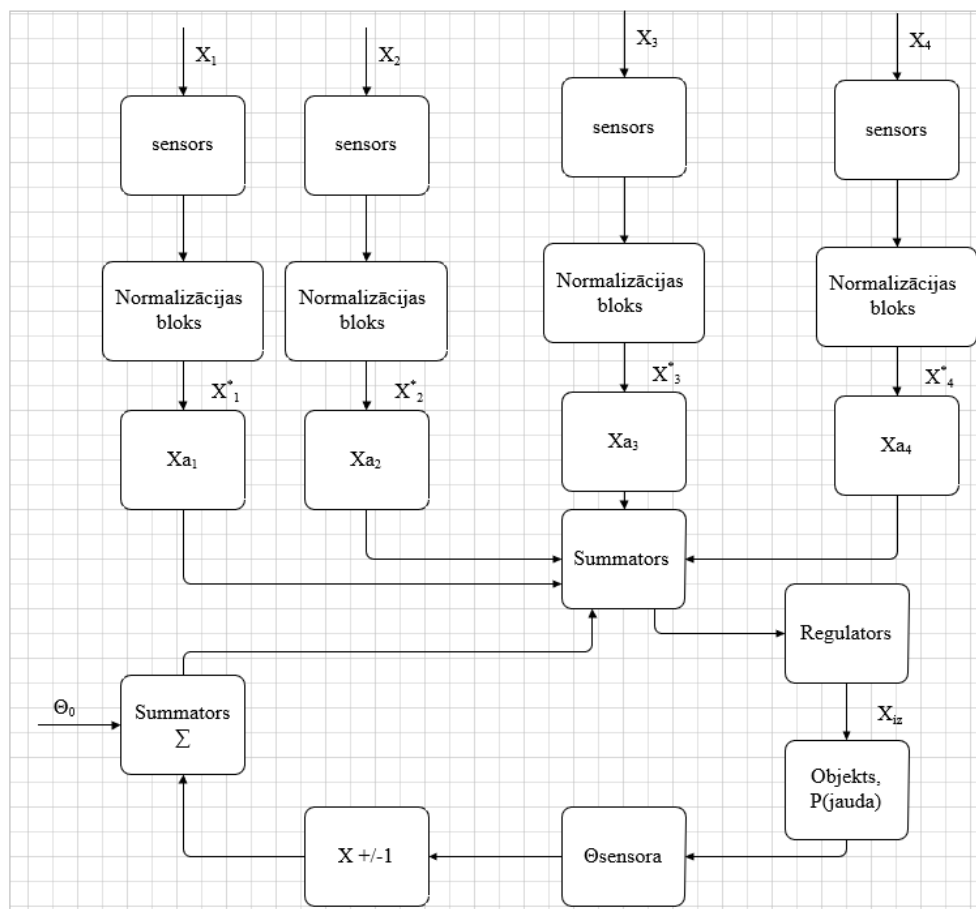
Izanalizējot iegūtos rezultātus, darbā tika pieņemts lēmums pārskatīt ieejas funkcijas un aizvietot ārējās temperatūras ieejas parametru ar trīsstūra signāla formu, kas vislabāk atbilst temperatūras izmaiņas raksturam. Pārveidotais modelis tika simulēts programmdrošinājumā *PSIM* ar mērķi uzlabot iepriekšējos paragrāfos apskatītās shēmas. Sliedes temperatūra ir ārējās temperatūras un sildelementa temperatūras summa, kas tiek dalīta ar 2, jo pastāv siltuma zudumi starp sildelementu un sliedi. Šī summēšana notiek summatorā un tālāk nonāk regulēšanas shēmas sākumā, kur tā tiek salīdzināta ar uzdoto temperatūru, tādējādi noslēdzot atgriezenisko saiti. Uzdotā temperatūra ienāk operacionālā pastiprinātājā, kas caur rezistoriem regulē arī apsildes jaudu. Tālāk apsildes jauda caur pastiprinājuma koeficientu 10 tiek pastiprināta un nonāk uz sildelementa. No sildelementa signāls ieiet iepriekš aprakstītajā summatorā, tādējādi, noslēdzot visu ķēdi.

Pēc iegūtiem datiem tika secināts, ka modeļa tālākā attīstība noved pie citiem regulēšanas principiem, piemēram, regresijas analīzes vai fāziloģikas sintēzes.

## 2.7. Apsildes jaudas regulēšana pēc regresijas vienādojuma rezultātiem

Darbā tika analizēta jaudas regulēšana pēc regresijas vienādojuma datiem ar uzdevumu stabilizēt temperatūru (ar atgriezenisko saiti). Regresijas vienādojumu jeb normalizācijas bloks, saņemot informāciju no ietekmes faktoru sensoriem, pārveido parametrus normalizētajos, līdz ar to references jauda ir atkarīga no ietekmes faktoriem. Ja sekošana ietekmes faktoriem nenodrošina nepieciešamo sliedes temperatūru, tad var koriģēt regresijas formulas ģenerēto nepieciešamās jaudas lielumu. Korekcijas koeficients var būt proporcionāls temperatūras novirzei zem references parametra.

Tālāk, kad modelī tika ievietoti visu ietekmes faktoru normalizācijas shēmas, tika saskaitīts katrs reizinājums pēc 1.4. formulas, rezultātā, iegūstot vienādojum, pēc kura aprēķina kopējo jaudu. Šī jauda nosaka sildelementa patērēto jaudu, ņemot vērā dažādu ārējo faktoru ietekmi. Piemēram, ir skaidri zināms, ka pie negatīvas ārējās temperatūras un ieslēgtas pārmiju apsildes sākuma jauda būs  $P_0$ , kas apsildes darbības laikā tiks patērēta jebkurā gadījumā. Tālāk šai jaudai nāk klāt papildu jauda, kas ir kā pretstats visiem ārējiem faktoriem, kas nelabvēlīgi ietekmē pārmiju apsildi. Sākuma jaudai ir jāpieskaita papildus jauda lai “atspēkotu” pārlieku zemu temperatūru, nokrišņus sniega formā un vēju. Atkarībā no ietekmes faktoru kombinācijas mainās arī patērētā jauda.



2.12. att. Regulēšanas shēmas pēc regresijas vienādojumu rezultātiem blokshēma

Shēma sastāv no posmiem, no kuriem galvenie ir summators  $\Sigma$ , objekts “Objekts, P” un bloks “X +/-1”, kas realizē atgriezenisko saiti AS. Katram posmam ir sava algebriskā pārvades funkcija, kas rada iespēju visu sistēmu aprakstīt ar kopēju algebrisku pārvades funkciju.

2.12. attēlā summatorā  $\Sigma$  summējas ieejas signāls  $\theta_0$  un atgriezeniskās saites izejas signāls  $-x_{iz}(s) \cdot W_{as}(s)$ . Regulators ir pastiprinātājs, kura ieejā ir reducēts vadības signāls. Šajā piemērā temperatūras sensora signāls nonāk summatorā, savukārt radītā starpība starp noteikto references temperatūru un izmērīto temperatūru ir par pamatu vadības sistēmas iedarbībai uz vadības objektu, kas ir sildelements (aktīvā jauda P).

Šī regulēšanas shēma, kas izmanto regresijas vienādojumu rezultātus, ir noslēgta regulēšanas sistēma ar sliedes temperatūras sensoru  $S_{sl}$ , kura izejas signāls atbilst sliedes temperatūrai  $\theta_{sensora}$  (2.12. att.). Šis signāls caur atgriezeniskās saites bloku tiek reducēts uz lielumu  $(-\theta_{sl})$  un saīdināts ar noteiktās temperatūras signālu  $\theta_0$  summatorā, un starpības signāls  $(\theta_0 - \theta_{sl})$  iedarbojas uz pamata summatoru, kas savukārt iedarbojas uz tā izejā esošu regulatoru, kas regulē jaudu vadības objektā.

Pamata summatorā ienāk 4 normalizēti signāli, kuru pamatā ir 4 dažādu sensoru signāli, kas iziet cauri normalizācijas blokiem.

Tālākā darba gaitā tika aprēķināta regresijas izteiksme ar dažādu parametru ietekmi uz jaudu *PSIM* programmatūrā. Lai to izdarītu, formulā

$$P = P_0 + a_1\theta_{\bar{ar}}^* + a_2N^* + a_3V^* \quad (2.44.)$$

tika ievietoti *PSIM* simulācijas rezultātā iegūtie rezultāti un apkopoti 2.1. tabulā.

2.1. tabula

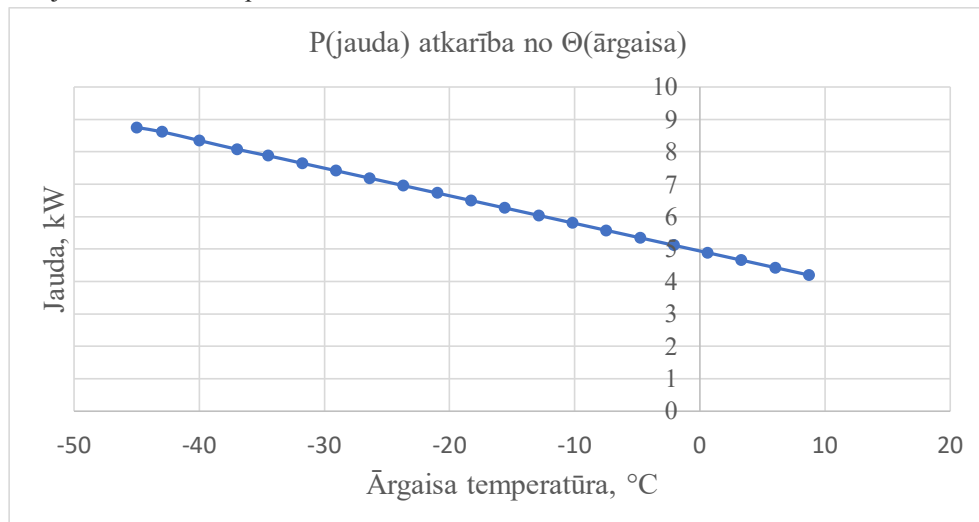
Ietekmes parametru un to normalizēto vērtību jaudu tabula

Ieejas parametri			Normalizētie ieejas parametri			$P$ , jauda (kW)*
Ārējais temperatūra, $\theta_{\bar{ar}}$ (°C)	Nokrišņu intensitāte, $N$ (mm/h)	Vēja ātrums, $V$ (m/s)	$\theta_{\bar{ar}}^*$ (ārējais)	$N^*$	$V^*$	
-45	0	0	-1	-1	-1	11,75
-43	1,5	1,5	-0,92	-0,9	-0,9	11,33
-40	3	3	-0,8	-0,8	-0,8	10,76
-37	4,5	4,5	-0,68	-0,7	-0,7	10,2
-34,5	6	6	-0,58	-0,6	-0,6	9,71
-31,8	7,5	7,5	-0,472	-0,5	-0,5	9,19
-29,1	9	9	-0,364	-0,4	-0,4	8,66
-26,4	10,5	10,5	-0,256	-0,3	-0,3	8,14
-23,7	12	12	-0,148	-0,2	-0,2	7,62
-21	13,5	13,5	-0,04	-0,1	-0,1	7,1
-18,3	15	15	0,068	0	0	6,58
-15,6	16,5	16,5	0,176	0,1	0,1	6,06
-12,9	18	18	0,284	0,2	0,2	5,54
-10,2	19,5	19,5	0,392	0,3	0,3	5,01
-7,5	21	21	0,5	0,4	0,4	4,49
-4,8	22,5	22,5	0,608	0,5	0,5	3,97
-2,1	24	24	0,716	0,6	0,6	3,45
0,6	25,5	25,5	0,824	0,7	0,7	2,93
3,3	27	27	0,932	0,8	0,8	2,41
6	28,5	28,5	1,04	0,9	0,9	1,88
	30	30		1	1	1,36

\* Gadījumā, ja apsildes jauda pārsniedz sildelementa maksimālo jaudu, šis parametrs liecina par apsildes laika palielināšanos.

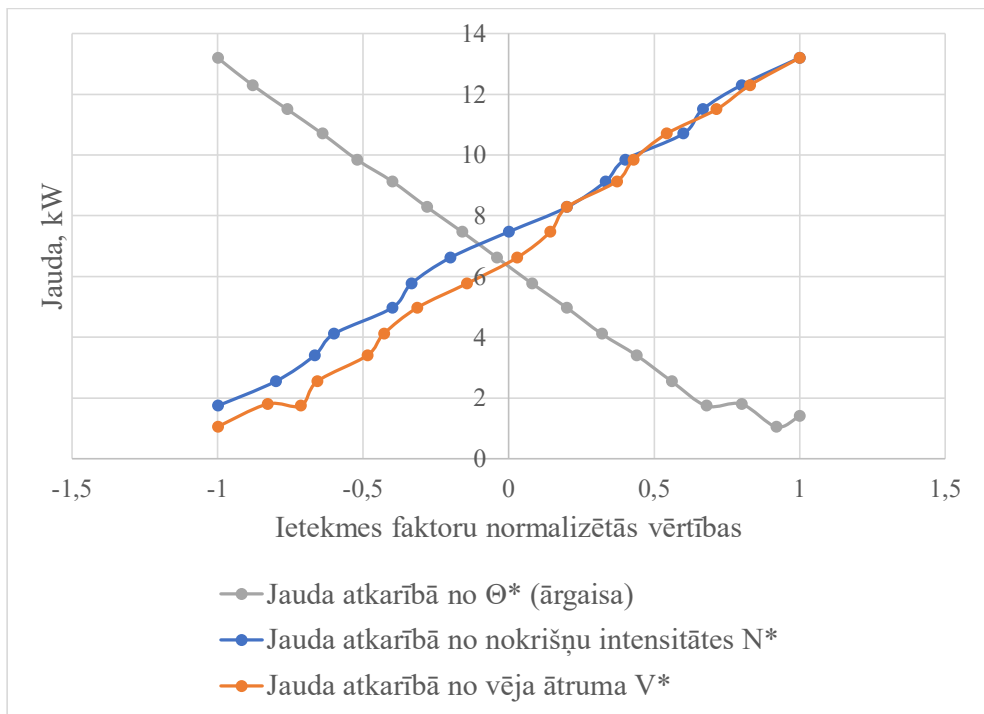
Ņemot vērā tabulas datus, tika secināts, ka visnelabvēlīgākos apstākļos apsildes jauda būs 11,75 kW, kas pārsniedz sildelementa maksimālo jaudu un liecina par apsildes ilguma palielināšanos. No otras puses, kad ārējais temperatūra ir +6 °C, tad apsildei vajadzētu būt ieslēgtai ar jaudu 1,88 kW, bet realitātē vadības algoritmā ir jāparedz sistēmas atslēgšanas ķēde, kas atslēgs apsildi pie ārējais temperatūras > +5 °C, jo ir acīmredzami, ka pie šādas ārējais temperatūras apsildīt pārmiju nav nepieciešamības.

Apsildes jaudas pieaugumam atkarībā no apkārtējās vides temperatūras (ārējais temperatūras) ir lineārs raksturs, par ko liecina grafiks 2.13. attēlā. Līkne ar pelēko krāsu parāda apsildes jaudas atkarību no ārējais temperatūras ( $\theta_{ar}$ ). Līkne sākas no ārējais temperatūras līmeņa -45 °C un jaudas vērtības ~9 kW un tad lineāri pazeminās līdz +9 °C grādu līmenim, kad jauda ir ~4,1 kW apmērā.



2.13. att. Apsildes jaudas atkarības no ārējais temperatūras grafiks

Tālāk tika apskatīts un analizēts apsildes jaudas atkarības grafiks no ārējais temperatūras, nokrišņiem un vēja stipruma (2.14. att.). Līknēm ir līdzīgi raksturi – tās ir gandrīz lineāras, bet ar dažām detaļām. No nokrišņu un vēja neesamības sākuma punktiem un, nokrišņu intensitātei palielinoties, var redzēt, ka nepieciešams lielāks jaudas daudzums, lai apsildītu pārmiju. No otras puses, vējš atstāj par aptuveni 30% mazāku ietekmi uz jaudas apmēru. Šāda tendence saglabājas, līdz normalizētās ietekmes parametru vērtības nesasniedz vērtību 0,2, tālāk to ietekme uz apsildes jaudu ir gandrīz vienāda.

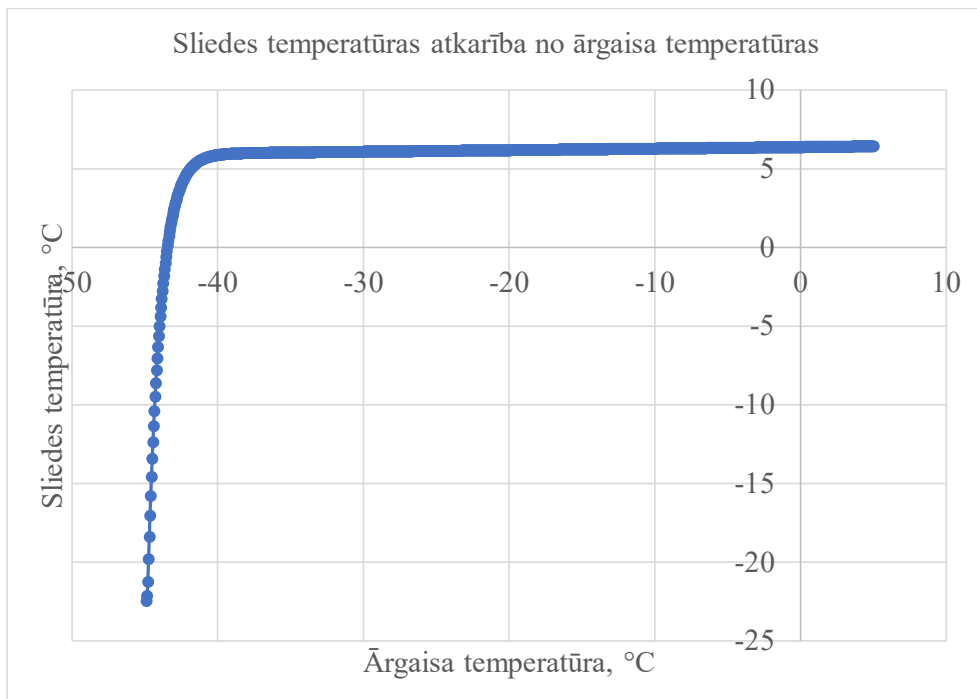


2.14. att. Apsildes jaudas atkarības no nokrišņiem un vēja stipruma grafiks.

Šo tendenci var izskaidrot ar to, ka pie lielas nokrišņu intensitātes apsildei ir nepieciešama liela jauda, arī stipra vēja laikā nepieciešama gandrīz tāda pati apsildes jauda, jo vējš dzesē pārmiju, bet algoritma pamatā ir sliedes temperatūras uzturēšana noteiktā diapazonā. Turklāt stipra vēja un nokrišņu laikā vai arī stipra vēja laikā (pēc lieliem nokrišņiem) notiek sniega masas pārvietošana, un pārmijas daļa starp rāmjsliedi un atvērto asmeni var tikt aizputināta ar sniegu, kas savukārt nav pieļaujams no vilcienu kustības drošības viedokļa.

Tāpat tika izpētīta sliedes temperatūras atkarība no ārgaisa temperatūras. Pēc simulācijas modeļa rezultātiem, ir redzams, ka pārmiju apsildes ieslēgšanas brīdī, sliedes temperatūra strauji palielinās un dažu sekunžu laikā sasniedz  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  atzīmi, un sākas temperatūras stabilizācijas posms (2.15. att.). Tas ir izskaidrojams ar to, ka apsilde tiek veikta ar maksimālu jaudu (2.16. att.) un uz pārmiju neiedarbojas neviens cits nelabvēlīgs laika apstākļu faktors, kā, piemēram, snigšana vai stiprs vējš. Saskaņā ar modelēšanas rezultātiem, ja sliede atrodas  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrā, tad ideālos apstākļos pietiek ar 2–3 sekundēm, lai uzsildītu to līdz uzdotai temperatūrai  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pēc  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  robežas sasniegšanas, sākas sliedes temperatūras stabilizācijas posms kurā sliedes temperatūra tuvojas uzdotajam lielumam  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pat nedaudz pārsniedzot to, kad savā maksimumā sasniedz  $+6,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  atzīmi.

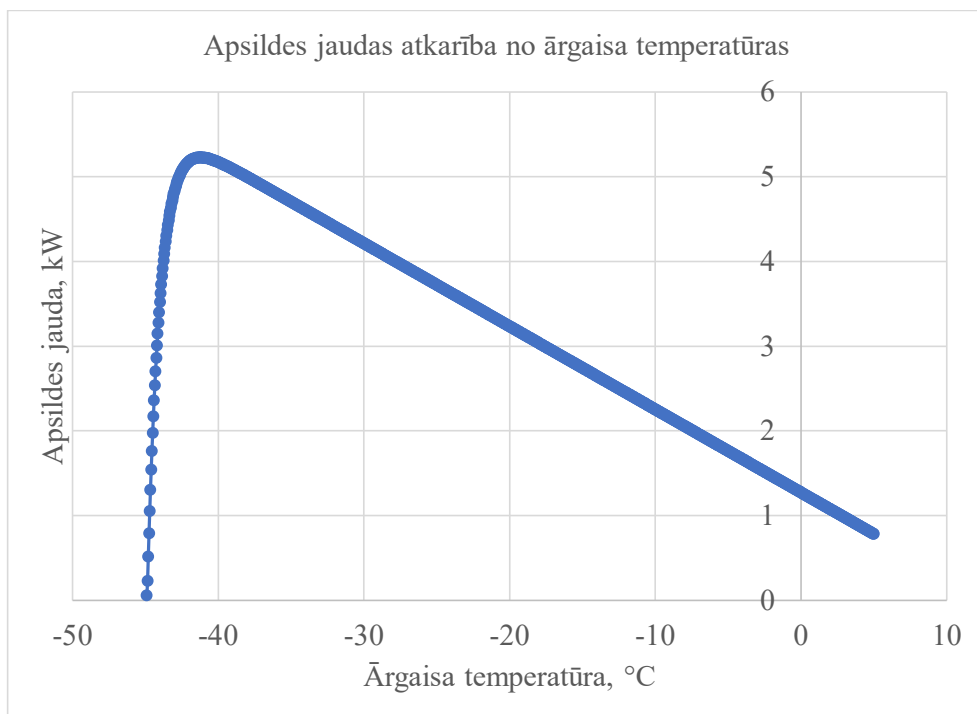




2.15. att. Slīdes temperatūras atkarības no ārgaisa temperatūras grafiks

Līdzīgi kā 2.15. att. ir apsildes jaudas atkarība no ārgaisa temperatūras (2.16. att.). Sākumā kad apsilde ir tikko ieslēgta, jauda uzkāpj līdz maksimālam lielumam 5,2 kW, jo ārgaisa temperatūra ir viszemākā līmenī  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tālāk pēc jaudas stabilizācijas, kas laikā sakrīt ar slīdes temperatūras stabilizāciju (2.15. att.), notiek jaudas pakāpeniska samazināšanās. Šī samazināšanās ir lineāra, jo saskaņā ar 2.15. att. nav vairs nepieciešama pilna jauda tāpēc, ka slīdes temperatūra jau atbilst uzdotajam lielumam un ir nepieciešama tikai daļa no maksimālās jaudas, kas lineāri samazinās, lai uzturētu slīdes temperatūru konstantu. Pēc grafika (2.16. att.) var redzēt, ka ik pēc  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  jauda samazinās par apmēram 1 kW līdz netiek sasniegta ārgaisa temperatūra  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kad apsilde tiek izslēgta.

Svarīgi ir piebilst, ka modelēšanas nosacījumos ārgaisa temperatūra ir vienīgais nelabvēlīgais faktors, kas ietekmē slīdes temperatūru. Tālāk, var secināt, ka tajā brīdī, kad apsildes jauda ir sasniegusi savu maksimālo lielumu 5,2 kW arī slīdes temperatūra jau ir virs  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  robežas un ir iegājusi temperatūras stabilizācijas posmā. Tīkmēr, temperatūras stabilizācijas posmā apsildes jauda lineāri samazinās līdz ārgaisa temperatūra sasniedz  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  atzīmi.

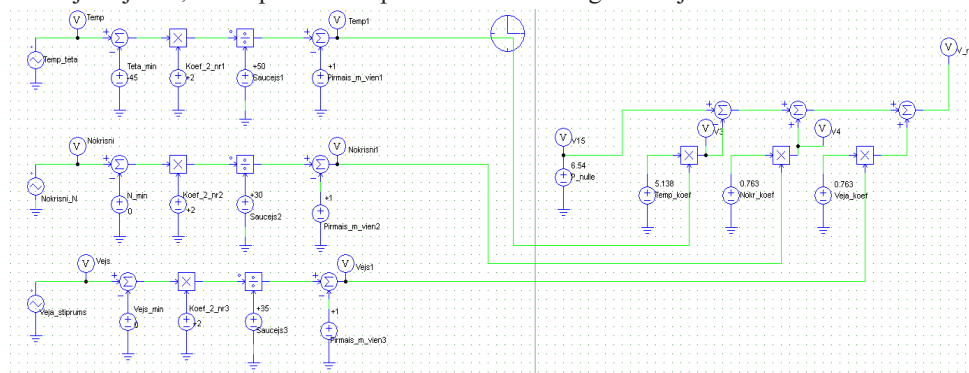


2.16. att. Apsildes jaudas atkarības no ārējais temperatūras grafiks

Programmnodrošinājumā *PSIM* tika izveidots kompleksais apsildes regulēšanas modelis (2.19. att.) ar mērķi uzlabot iepriekšējos paragrāfos apskatītās shēmas. Modeļa pamatā ir 1. nodaļā aprakstītā 1.4. formula, bet jau ar aprēķinātiem ietekmes koeficientiem:

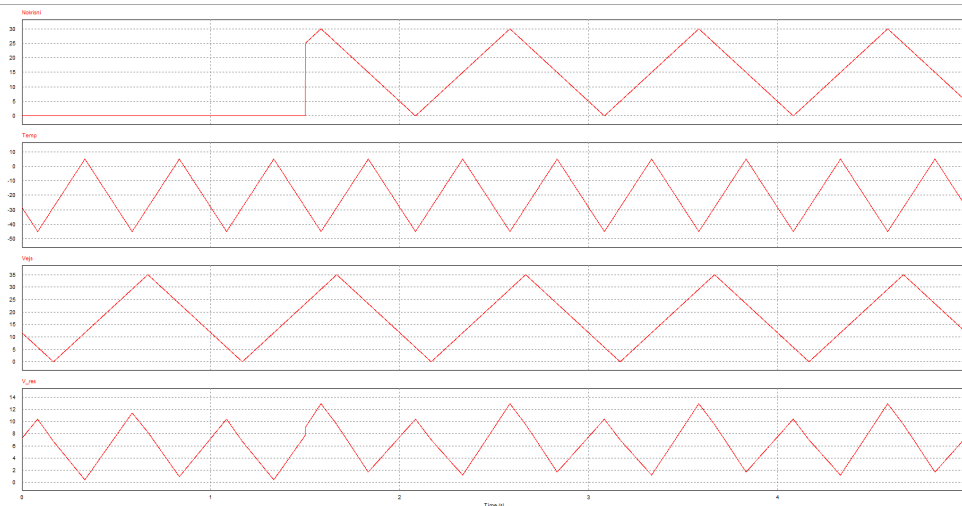
$$P = 6,81 - 3,44\theta_{\text{ār}}^* - 0,94N^* - 0,56V^* \text{ (kW)}. \quad (2.45.)$$

2.17. attēla shēmā ārējās vides temperatūras avots ir trīsstūra formas signāla avots, kas vislabāk atbilst temperatūras izmaiņas raksturam. Tālāk šis ārējais temperatūras avots tika linearizēts saskaņā ar 1.6. formulā aprakstīto izteiksmi. Nokrišņu avots arī tika modelēts kā trīsstūra formas signāla avots, kas tāpat kā temperatūras avots tiek linearizēts pēc 1.6. izteiksmes. Arī vējš tiek modelēts ar trīsstūra formas signāla avotu, kas tiek linearizēts saskaņā ar 1.6. izteiksmi. Tālāk saskaņā ar 2.45. izteiksmi notika katra saskaitāmā summēšana, lai iegūtu rezultējošo jaudu, kas nepieciešama pie visiem nelabvēlīgiem ārējiem faktoriem.



2.17. att. Kompleksais ārējais temperatūras, nokrišņu un vēja ietekmes modelis

Tālākā darba gaitā tika veikta modeļa parametru simulēšana un pētīšana programmnodrošinājumā *PSIM*, kopējais signālu grafiks redzams 2.18. attēlā. Grafikā redzamas visu ietekmes faktoru (ārgaisa temperatūra, nokrišņi, vēja stiprums) izmaiņas laika diapazonā.



2.18. att. Kompleksais ārgaisa temperatūras, nokrišņu un vēja ietekmes modeļa signālu grafiks.

2.18. attēlā redzama apsildes jaudas atkarība no ārgaisa temperatūras kompleksā ar vēja stiprumu un nokrišņiem. Grafikā redzams, ka sliktākajos apstākļos, kad ārgaisa temperatūra ir viszemākā, nokrišņu intensitāte ir vislielākā un vēja stiprums ir vislielākais, tad apsildes jauda arī ir vislielākā un var sasniegt  $\sim 12$  kW. Protams, reālos apstākļos ir maza varbūtība, ka vienā brīdī var sakrist visi minētie nelabvēlīgie apstākļi. Grafikā redzams, ka vējam un nokrišņiem ir liela ietekme uz apsildes jaudu, un stiprs vējš var tik ļoti kļiedēt slīdei pievadīto siltumenerģiju, ka, lai sasniegtu noteikto temperatūru, tad jauda ir jāpalielina vairāk nekā 1,5 reizes – no 8,84 kW pie  $-45$  °C un vēja 4 m/s līdz pat 12 kW pie  $-45$  °C un vēja ar ātrumu 34 m/s.

### Secinājumi par otro nodaļu.

Nodaļā tika apskatīta regulēšanas sistēmas definēšana, atgriezeniskās saites jēdziens un tās pielietošana regulēšanas sistēmā. Tika analizēti dažādi regulēšanas paņēmieni – tiešā regulēšana, regulēšana ar atgriezenisko saiti, ar vadības sistēmu ar traucējuma ietekmi un pēc regresijas vienādojuma rezultātiem. Tika veikta dažādu regulēšanas metožu modelēšana programmatūrā *PSIM*, ar mērķi noteikt kura metode simulācijas apstākļos parāda labākos rezultātus – uzdotās un slīdes temperatūru starpība ir vistuvāk nullei.

Kā nodaļas svarīgāko secinājumu ir jāmin, ka regresijas metode ir salīdzinoši laba, bet pilnībā neapmierina efektīvas pārmiju apsildes prasības, tāpēc turpmākajam darbam, modelēšanai un praktiskam eksperimentam tika nolemts attīstīt izstrādāto modeli un pielietot vēl inteligentāku algoritmu kā, piemēram, faziloģiku. Šāda metode tika izvēlēta, jo ietver sevī kompleksu regulēšanas paņēmieni, kurš ievēro dažādus ietekmes faktorus (ārgaisa temperatūra, nokrišņu intensitāte, vējš).

## 3. DZELZCEĻA PĀRMIJU TERMĀLĀ STĀVOKĻA REGULĒŠANA AR FAZILOĢIKU

### 3.1. Heiristisku algoritmu dažādība un pielietojums

Heiristiski algoritmi parasti tiek izmantoti, ja nav pietiekamas zināšanas par vadības objektu, bet ir pieredze tā pārvaldībā, nelineārās sistēmās, kas ir pārāk darbietilpīgas, kā arī gadījumos, kad pēc nosacījuma uzdevumos nepieciešams izmantot eksperta zināšanas [48], [49]. Visbiežāk pielietojamie ir ģenētiskie algoritmi, faziloģika un hibrīdu sistēmas.

#### Ģenētiskie algoritmi un to īpašības

Ģenētiskā algoritma (ĢA) mērķis ir atrast labāko risinājumu salīdzinājumā ar esošo, nevis optimālo vai efektīvāko uzdevuma risinājumu [50]. Optimuma sasniegšanas problēma šajā gadījumā ir sekundāra. Citas metodes, kas vērstas tieši uz optimālā risinājuma atrašanu, ir nepieņemamas to ārkārtējās sarežģītības dēļ. Tas ir iemesls ģenētisko algoritmu popularitātei, lai gan, tāpat kā jebkura cita meklēšanas metode, šī pieeja nav vislabākā uzdevumu risināšanai. Vēl viena ĢA īpašība ir personas neiejaukšanās meklēšanas procesā. Cilvēks to var ietekmēt tikai netieši, uzstādot GA parametrus.

Ģenētiskā algoritma efektivitāti katra konkrēta uzdevuma atrisināšanai nosaka divi galvenie faktori: darba ātrums un stabilitāte. Ģenētiskā algoritma ātrumu aprēķina pēc laika, kas nepieciešams, lai izpildītu lietotāja norādītu iterāciju skaitu. Ja apturēšanas kritērijs ir populācijas kvalitāte vai tās konverģence, tad ātrumu aprēķina pēc laika, kas nepieciešams, lai ģenētiskais algoritms sasniegtu kādu no šiem notikumiem. Meklēšanas stabilitāte tiek novērtēta pēc algoritma stabilitātes pakāpes, lai sasniegtu lokālus ekstrēmu punktus.

ĢA trūkumi ir šādi:

- nav garantijas, ka tiks iegūts efektīvākais risinājums;
- efektīvi formulēt problēmu, noteikt hromosomu atlases kritēriju (uzstādīt kodu) un citus ĢA parametrus var tikai speciālists ar augstu kvalifikāciju, kas būtiski sadārdzina sistēmas uzbūvi;
- problēmas izvīrēšana ĢA izteiksmē nedod iespēju analizēt ar to palīdzību iegūtā risinājuma statistisko nozīmīgumu;
- ĢA diezgan augstā skaitļošanas resursu intensitāte noved pie tā, ka evolūcijas modelēšanas gaitā daudzi risinājumi tiek atmeti kā neperspektīvi;
- zema efektivitāte evolūcijas modelēšanas beigu fāzēs, kas izskaidrojama ar to, ka ĢA meklēšanas mehānismi nav stingri vērsti uz pēc iespējas ātrāku nokļūšanu lokālajā optimumā;
- dažas citas problēmas paliek neatrisinātas, piemēram, ĢA pašpielāgošanās problēma.

Runājot par evolūcijas aprēķiniem kopumā, jāatzīmē, ka tie, tāpat kā jebkura metode, kurā tiek izmantots nejausības elements, negarantē mērķa funkcijas globālā ekstrēma (vai optimāla risinājuma) noteikšanu uz noteiktu laiku. Jāpiebilst, ka evolucionārā skaitļošana ir vairāk pieeja optimizācijas problēmu risināšanai, nevis algoritms. Rezultātā tie ir jāpielāgo katrai konkrētai problēmu klasei, izvēloties noteiktas īpašības un parametrus.

#### Faziloģikas regulēšanas metode

Darba gaitā tika nolemts uzlabot iepriekš aprakstītos regulēšanas veidus, kontrolējot nelineāru un samērā sarežģītu sistēmu kā *PEAS*. Pētījuma gaitā vairākos eksperimentos regulatoru īpašības tika uzlabotas, izmantojot tieši faziloģikas metodes vadības algoritmā.

Faziloģikas izmantošanas mērķis bija padarīt tehnoloģiski sarežģītu tehnisku procesu analīzi un reakciju maksimāli tuvu cilvēka domāšanai un spriešanas veidam. Faziloģikas izmantošana ir veids kā nepielietojot tik populāro bināro loģiku (1 vai 0, paties vai maldīgs), izveidot matemātisku modeli ar cilvēkam saprotamām pārējām un padarīt tehnoloģiski sarežģītu tehnisku procesu analīzi vieglāk uztveramu (0,1, 0,5, 0,99, lielākoties jā, lielākoties nē, drīzāk jā, drīzāk nē, u.c.) [51].

### **Hibrīdu sistēmas un to īpašības**

Faziloģikas ietvaros pastāv arī hibrīdu sistēmas, kas ir faziloģikas un citu heuristisku sistēmu apvienojums. Tās parasti pielieto, lai uzlabotu sasniedzamo rezultātu. Nozīmīgākās hibrīdu sistēmas ir [48], [52]:

1) Faziloģikas – neironu tīklu hibrīdsistēma. Šāda sistēma lieliski aizpilda viena otras trūkumus, jo neironu tīkli ir spējīgi mācīties, bet faziloģika analizēt un paredzēt. Šis savienojums ir visvieglāk pielietojamais plašā daudzelementu sistēmu mērogā.

2) Faziloģikas – ģenētiskā algoritma hibrīdsistēma. Pateicoties ģenētisko algoritmu integrēšanai, šāda sistēma kļūst lietderīga, jo ir spējīga ne tikai ieregulēt un uzlabot pieredzes pakāpes funkcijas, bet precīzi ieregulēta ģenētiskā algoritma un faziloģikas arhitektūra meklē trūkstošos nezināmos un adekvāti rod problēmas risinājumu. Diemžēl precīza algoritma ieregulēšana ir ļoti resursietilpīga un prasa ļoti daudz laika.

Nestrikta – PID kontrolleru hibrīdsistēma. Dažos pielietojumos šāds savienojums strādā kā hibrīds kontrolleris, kur PID kontrolleris tiek lietots aptuvenai, bet ātrai vadībai, kamēr faziloģikas sistēmas daļa ieregulē PID vai uzdod tam izmantot citus parametrus labākam izvades rezultātam.

Reālās pētāmās problēmas var būt ļoti sarežģītas un kompleksas sistēmas, kas ir ļoti nestrikas. Faziloģikas galvenā priekšrocība ir to spēja apvienojot pieredzi, intuīciju un heuristiku, tās iekļaut kopējā sistēmā tā vietā, lai paļautos uz matemātiskajiem modeļiem. Tas padara tās izmantošanu efektīvāku gadījumos, kad esošie modeļi ir nepilnīgi definēti un nav pietiekami droši [51], [53], [54]. Tāpat promocijas darbā tālāk netika aplūkoti ģenētiskie algoritmi, jo visi ieejas mainīgie ir zināmi un to robežas tika definētas, tāpēc tika secināts, ka tālāka ģenētisko algoritmu izmantošana nav lietderīga. Pamatojoties uz 3.1. paragrāfā minēto, tālākiem pētījumiem un eksperimentiem tika izvēlēta tieši faziloģikas regulēšanas metode.

## **3.2. Faziloģikas realizācija elektrotehnoloģiju datorvadībā un PEAS**

Faziloģika ir daudz līdzīgāka cilvēciskajai domāšanai un cilvēka dabīgajai valodai nekā tradicionālās loģiskās sistēmas [55]. Faziloģikas kontrolleris ir lingvistisko likumu kopums, kas balstās uz divu šķietami nesaderīgu jēdzienu konceptu, kas apvieno neskaidru informāciju ar precīzu likumu un ieteikumu ievērošanu, tādejādi darbā tika izstrādāts faziloģikas algoritms, kas balstoties uz ekspertu zināšanām, pārveido lingvistisko vadību par automātisko vadību [56]–[58].

Pēdējās desmitgadēs ir strauji paplašinājies faziloģikas kontrolleru pielietojums enerģētikā un elektrotehnikā [58]. Biežāk tas saistīts ar elektrolīniju un enerģijas ražošanas sistēmu drošumu, stabilitāti, līnijas bojājumu noteikšanu un ražošanas, pārvades un sadales procesu optimizāciju [51]. Dažādu zinātnisko publikāciju apkopojumos bija atrodama informācija par

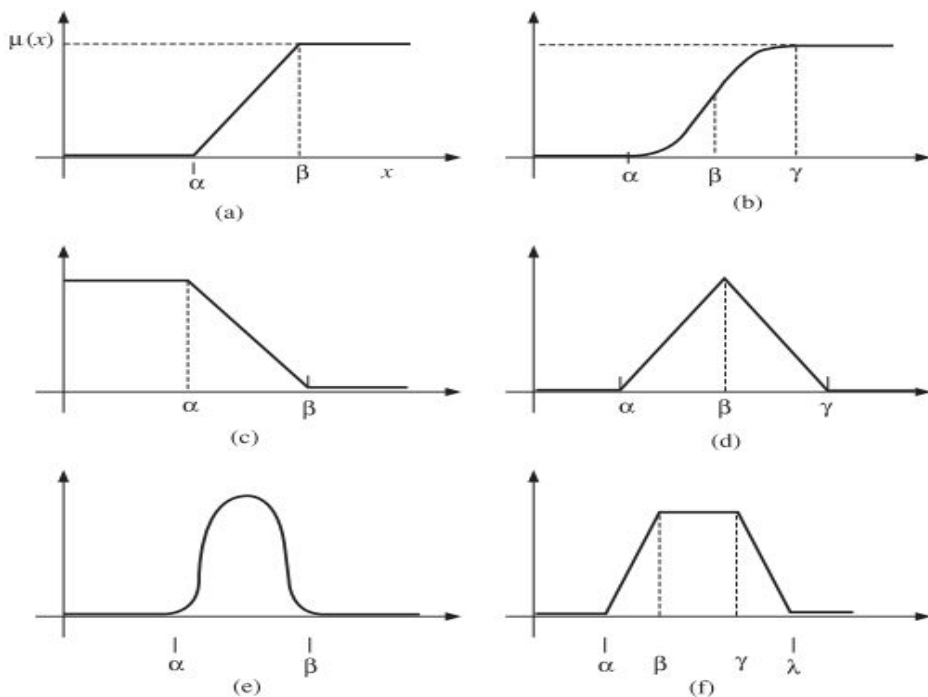
faziloģikas pielietošanu dažādu apakšsistēmu vadībā [59]–[62], kas nozīmē, ka šo paņēmieni var pielietot arī *PEAS* vadības sistēmas algoritmā.

Bez elektroenerģijas pārvades sistēmām, faziloģika tiek pielietota arī kustību vadībā, vēja turbīnu vadībā, dzinēju efektivitātes optimizācijā un raksturlielņu aprēķinos [61]–[64]. Šajā nozarē faziloģikas pielietošanai ir sekojoši iemesli:

- Tā kā faziloģikas kontrolleri netiek balstīti uz precīziem matemātiskiem modeļiem, tos var pielietot ļoti plaša mēroga sistēmās, kur vispārēja modeļa attēlošana matemātiski būtu pārāk sarežģīta. Šī īpašība ir ļoti noderīga arī nelielās nelineārās sistēmās [65].
- Faziloģikas kontrolleri balstās uz heuristiku un tādejādi arī uz cilvēcisko intuīciju un pieredzi.

Ir vairāki veidi kā izstrādāt un realizēt faziloģikas sistēmas. Piemēram, tās var tikt balstītas tieši uz faziloģikai paredzētām sistēmām vai izstrādātas izmantojot programmēšanas valodas [66]. Tāpat ir iespējams izveidot faziloģikas modeli, piemēram, MatLAB vidē un pēc tam pārnest *PLK* vadībā kā vadības koda sastāvdaļu.

### Piederības funkciju tipi



3.1. att. Piederības funkciju tipi: (a) –  $\Gamma$  funkcija; (b) – S funkcija; (c) – L funkcija; (d) –  $\Lambda$  funkcija; (e) – Gausa funkcija; (f) –  $\Pi$  funkcija [51]

Atkarībā no risināmās problēmas, var tikt pielietoti dažādi piederības funkcijas tipi, kas apskatāmi 3.1. attēlā. Visbiežāk izmantoto funkciju tipu piemēri ir [51]:

$\Gamma$  – funkcija,  $\Gamma: U \rightarrow [0,1]$

$$\Gamma(x; \alpha; \beta) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha} & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 & x > \beta \end{cases}$$

L – funkcija,  $L: U \rightarrow [0,1]$

$$L(x; \alpha; \beta) = \begin{cases} 1 & x < \alpha \\ \frac{x - \beta}{\alpha - \beta} & \alpha \leq x \leq \beta \\ 0 & x > \beta \end{cases}$$

$\Lambda$  – funkcija,  $\Lambda: U \rightarrow [0,1]$

$$\Lambda(x; \alpha; \beta; \gamma) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha} & \alpha \leq x \leq \beta \\ \frac{x - \gamma}{\beta - \gamma} & \beta \leq x \leq \gamma \\ 0 & x > \gamma \end{cases}$$

### Lingvistiskie mainīgie

Lingvistisko mainīgo koncepts ir ticis izmantots, lai aprakstītu faziloģikas kontrolleru ieejas un izejas datus. Parastie skaitliskie mainīgie ir precīzi un nav spējīgi aprakstīt nenoteiktību fazikopu teorijā. Pēc būtības ir skaidrs, ka lingvistiskie mainīgie sastāv no vārdiem, teikumiem vai mākslīgo intelektu atbalstošām valodām, kas ir neprecīzs aprakstīšanas veids. Tajā pašā laikā tas jau sniedz ieskatu parametru raksturos, kā piemēram “vecums” ir lingvistiskais mainīgais, kas pārstāv vienlaikus “jauns” un “vecs” fazikopas. Biežāk sastopama nenoteiktība ir saistībā ar “kļūdu” mainīgo, kura vērtības var būt “pozitīvs”, “nulle” vai “negatīvs”.

Ja kāds kā lingvistisks mainīgais tiek definēts bezgalības kopā  $U$ , kur  $x \in U$ , tad var izteikt sekojošus parametrus [51]:

$LX_i^k$  ir lingvistiskā vērtība, ko var pieņemt  $X_i$  (pie  $k=1 \dots n$ );

$n$  iespējamo lingvistisko vērtību skaits;

$\mu_{LX_i, k}(x)$  ir  $LX_i^k$  piederības pakāpes funkcija vērtībai  $x$ ;

$LX_i$  ir kopa, saturoša  $LX_i^k$ , kur  $LX_i = \{ LX_i^1, LX_i^2 \dots LX_i^n \}$ .

Minētajā piemērā šie parametri iegūst šādas vērtības:

$X_1$  “Kļūda”

$n=3$  iespējamo lingvistisko vērtību skaits

$LX_1^1$  “Pozitīvs”

$LX_1^2$  “Nulle”

$LX_1^3$  “Negatīvs”

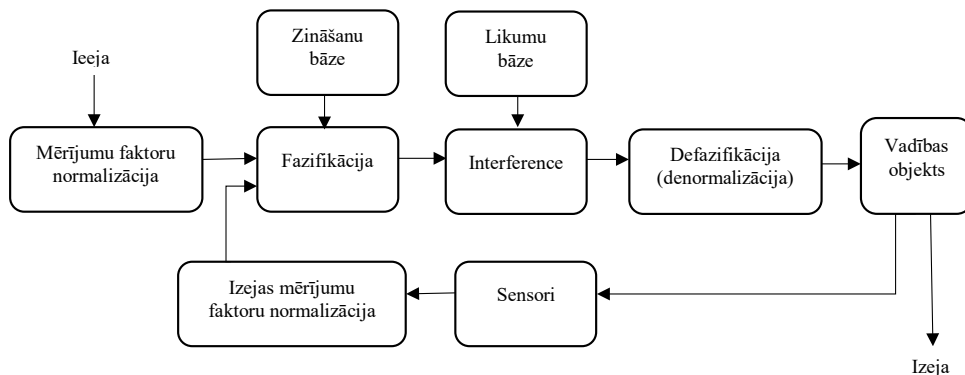
Un pie  $x = \{-1, 0, 1\}$  piederības pakāpju matrica ir:

$$\begin{array}{lll} \mu_{LX_{1,1}}(-1) = 0 & \mu_{LX_{1,1}}(0) = 0 & \mu_{LX_{1,1}}(1) = 1 \\ \mu_{LX_{1,2}}(-1) = 0 & \mu_{LX_{1,2}}(0) = 1 & \mu_{LX_{1,2}}(1) = 0 \\ \mu_{LX_{1,3}}(-1) = 0 & \mu_{LX_{1,3}}(0) = 0 & \mu_{LX_{1,3}}(1) = 0 \end{array}$$

### Faziloģikas vadības sistēmas princips

Standarta faziloģikas kontrollera blokshēma redzama 3.2. attēlā. Faziloģikas struktūrā var uzskaitīt piecus faziloģikas kontrollera principiāli būtiskus elementus [51]:

- fazifikācijas modulis;
- zināšanu bāze;
- likumu bāze;
- interferences procesors;
- defazifikācijas modulis.



3.2. att. Faziloģikas kontrollera blokshēma

Ja kādā no šiem pieciem blokiem notiek automātiskas izmaiņas, tad šādu kontrolleri var uzskatīt par adaptīvu faziloģikas kontrolleri [51], savukārt, ja parametri ir fiksēti, tad šāda sistēma nav adaptīva. Visi pārējie elementi, kam nepiemīt izplūduma pazīmes, arī ir vadības sistēmas daļa (sensori, analogie/digitālie konvertori, normalizācijas ķēdes). Parasti faziloģikas kontrollerī atrodas divu veidu normalizācijas ķēdes: viena konvertē reālās ieejas vērtības normalizētā kopumā, bet otra konvertē normalizētās faziloģikas vienības atpakaļ to reālajās vērtībās.

### Fazifikācija

Fazifikācijas modulis konvertē skaidri izteiktās ieejas vērtības par nestriktajiem vērtībām, lai tām būtu iespējams piemērot faziloģikas likumu bāzi. Fazifikācijas stratēģijas (individuāli vai kopēji piemērojama) izvēli nosaka interferences procesors.

### Zināšanu bāze

Zināšanu bāze sastāv no datubāzes ar informāciju par lauku – pētāmo problēmu un IL pielietojanas apgabalu. Tā nodrošina fazifikācijas procesu ar nepieciešamajām definīcijām par piederības pakāpi, ieejas un izejas mainīgajiem, sasaistes funkcijas starp reālajām un nestriktajiem vērtībām

### Likumu bāze

Vadības stratēģijā nozīmīga sastāvdaļa, ko pārsvarā sastāda sistēmas eksperts ar savu pieredzi un zināšanām, vai arī heuristika un kopas, kas sastāv no JA–TAD likumiem. Šie likumi ir balstīti uz nestrikta interferences koncepta, nosacījumiem un konsekvencēm, kas asociētas ar lingvistiskiem mainīgajiem. Piemēram,

JA *kļūda*(e) ir *Pozitīva Liela* (PL) TAD *izeja*(u) ir *Negatīva Liela* (NL)

Nosacījums

Rezultāts

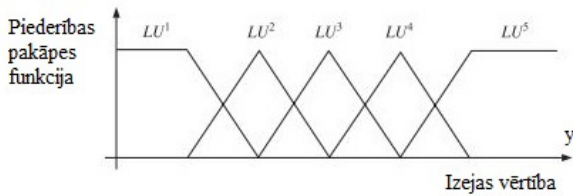
*Kļūda*(e) un *izeja*(u) ir lingvistiski mainīgie ar lingvistiskām vērtībām *Pozitīvs Liels* (PL) un *Negatīvs Liels* (NL).

### Defazifikācija

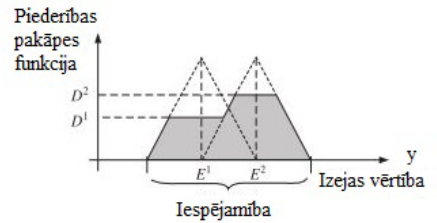
3.3.a. attēlā redzama piederības pakāpes funkcija attiecībā pret faziloģikas kontrollera izejas mainīgajiem. Faziloģikas kontrolleris apstrādā ieejas datus un kartē to izejas vērtības pie vienas vai vairākām lingvistiskām vērtībām ( $LU^1$  līdz  $LU^5$ ). Atkarībā no nepieciešamības, piederības



pakāpe var tikt piešķirta konkrētajai lingvistiskajai vērtībai.



3.3.a. att.



3.3.b. att.

3.3.a. att. No izejas lingvistiskajām vērtībām atkarīga piederības pakāpes funkcija un 3.3.b. att. Izejas vērtību iespējamības sadalījums

Piederības pakāpes funkciju apvienojums veido kontrollera nestriktu izejas vērtību, ko attēlo pelēkais iekrāsotais lauks 3.3.b. attēlā un to izsaka fazikopas vienādojums:

$$S = \bigcup_{i=1}^k S_i, \mu_S(y) = \max[\mu_{S_i}(y)] \quad i=1, 2 \dots k, \text{ kur:}$$

- $S$  ir visu izejas lingvistisko vērtību apvienojums;
- $S_i$  ir izejas lingvistiskā vērtība ar piesaistītu piederības pakāpes funkciju;
- $k$  ir kopējais definēto lingvistisko vērtību kopums.

Daudzos gadījumos nestriktai izejas vērtībai  $S$  nav nozīmes praktiskā pielietojumā, jo lielākajā daļā pielietojuma ir nepieciešamas darbības ar striktām, raksturīgām vadības sistēmām. Turklāt ir nepieciešams izveidot arī striktu izejas vērtību, lai būtu iespējams attēlot iespējamības sadalījumu. Defazifikācija ir matemātiska procedūra, kas konvertē nestriktās vērtības par reālajām. Ir vairākas defazifikācijas metodes, kuru pielietojums dod līdzīgu, bet ne vienmēr vienādu rezultātu pat pie identiskiem izejas datiem. Izvēlēta metode ir atkarīga no pielietojuma un pieejamās izpildes jaudas.

Vidējā svērtā metode ir daļa no defazifikācijas metodes, tā patērē maz resursu un ir ideāla ieviešanai uz vietas programmējamajos loģiskajos blokos gadījumos, kad ir būtiska izpildes vieta. Tomēr tā ir izpildāma tikai simetriskās piederības pakāpes funkcijās. Katrai piederības pakāpes funkcijai tiek piešķirts svars, kas ir izejas punkts, kad piederības pakāpes vērtība ir maksimums. Pamatojoties uz 3.3.b. attēlu, defazifikācijas process ir izteikts kā

$$f(y) = \frac{\sum \mu(y) * y}{\sum \mu(y)}$$

un izmantojot vidējo svērtu metodi:

$$f(y) = \frac{\sum_{m=1}^n E^m * D^m}{\sum_{m=1}^n D^m}$$

kur:

- $f(y)$  ir raksturīgā (striktā) vērtība;
- $E^m$  ir svērtās metodes pielietojums lingvistiskai vērtībai  $LU^m$ ;
- $D^m$  ir  $y$  piederības pakāpes vērtība ar saistību ar vērtību  $LU^m$ .

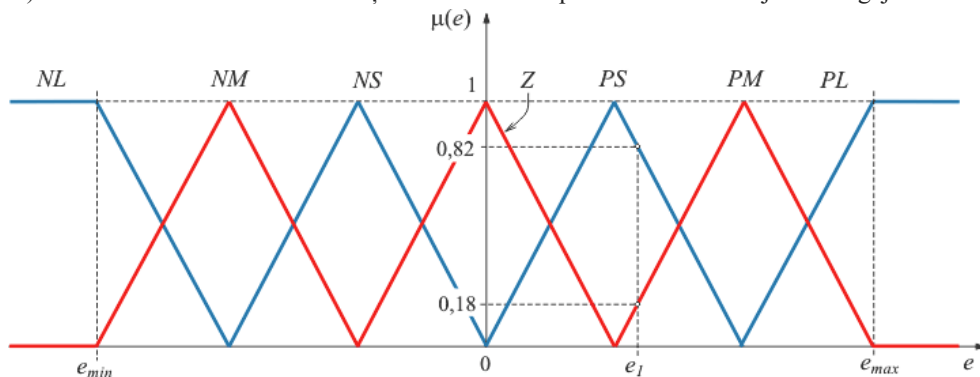
### 3.3. Faziloģikas modeļa konstruēšanas apraksts

Lai pielietotu faziloģikas metodes, pirmkārt, parastos precīzos mainīgos bija nepieciešams pārveidot nestriktajos. Šo transformācijas procesu sauc par fazifikāciju (3.4. att.). Mainīgā  $e$

izmaiņu diapazons tika sadalīts kopās (apakškopās)  $NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL$ , katrā no kurām mainīgā piederības funkcija bija konstruēta katrai no kopām. 3.4. attēlā piederības funkcijas tika izvēlētas trīsstūra jeb  $\Lambda$  formas, lai gan vispārīgā gadījumā tās var būt arī citas (piemēram, Gausa,  $\Pi$ ,  $L$ , u.c.) pamatojoties uz risināmās problēmas nozīmi.

Fazikopām ir vispārpieņemta apzīmējumu sistēma:  $N$  – negatīvs,  $Z$  – nulle,  $P$  – pozitīvs; šiem apzīmējumiem ir pievienoti burti  $S$  (mazs),  $M$  (vidējs),  $L$  (liels). Piemēram,  $NL$  ir negatīvs liels;  $NM$  – negatīvs vidējs;  $PL$  – pozitīvs liels. Šādu mainīgo (termu) skaits var būt jebkāds, taču, to skaitam palielinoties, palielinās arī prasības eksperta pieredzei, kuram jāformulē likumi visām ieejas mainīgo kombinācijām [67].

Ja kļūdas vērtība  $e$  nestriktā regulatora ieejā ir vienāda ar  $e_l$ , tad atbilstošā nestriktā mainīgā vērtība būs vienāda  $PS$  ar piederības pakāpi apakškopai  $PS$ , kas vienāda ar  $u(e_l)=0,82$  vai vienāda  $PM$  ar piederības pakāpi  $u(e_l)=0,18$ . Kļūdas  $e_l$  piederības pakāpe citām kopām (un citām) ir vienāda ar nulli. Šādā veidā kļūdas lielums tika pārveidots nestriktajos mainīgajos.



3.4. att. Piederības funkciju grafiskais attēlojums

Lai veiktu regulēšanas funkciju nestriktajiem mainīgajiem, bija jāveic operācijas, pamatojoties uz operatora paziņojumiem, kas formulēti nestriktu likumu veidā. Nestriktu likumu un nestriktu mainīgo kopums tika izmantots, lai realizētu nestriktu loģisko secinājumu, kura rezultāts ir vadības iedarbība uz vadības objektu (3.5. att.).

Nestriktos secinājumus veica sekojošā veidā. Tika pieņemts, ka kļūdas izmaiņu apgabals ir sadalīts kopās  $N, Z, P$ , bet vadības darbības izmaiņu apgabals ir sadalīts kopās  $NL, NM, Z, PM, PL$  un tika noformulēti šādi regulatora darbības noteikumi:

Likums Nr. 1: ja  $e = N$  un  $\frac{de}{dt} = P$ , tad  $\tilde{u} = Z$

Likums Nr. 2: ja  $e = N$  un  $\frac{de}{dt} = Z$ , tad  $\tilde{u} = NM$

Likums Nr. 3: ja  $e = N$  un  $\frac{de}{dt} = N$ , tad  $\tilde{u} = NL$

Likums Nr. 4: ja  $e = Z$  un  $\frac{de}{dt} = P$ , tad  $\tilde{u} = PM$

Likums Nr. 5: ja  $e = Z$  un  $\frac{de}{dt} = Z$ , tad  $\tilde{u} = Z$

Likums Nr. 6: ja  $e = Z$  un  $\frac{de}{dt} = N$ , tad  $\tilde{u} = NM$

Likums Nr. 7: ja  $e = P$  un  $\frac{de}{dt} = P$ , tad  $\tilde{u} = PL$

Likums Nr. 8: ja  $e = P$  un  $\frac{de}{dt} = Z$ , tad  $\tilde{u} = PM$

Likums Nr. 9: ja  $e = P$  un  $de/dt = N$ , tad  $\tilde{u} = Z$

Operācijas “UN” likumos atbilst kopu krustojumam, bet visu likumu izmantošanas rezultāts atbilst kopu apvienošanas operācijai. Piederības funkcija divu kopu krustojumam, piemēram,  $N$  un  $P$  tika aprēķināta šādi:

$$\mu_{e \cap de/dt} = \min(\mu_e, \mu_{de/dt}) \quad (3.1.)$$

tas ir katra kopu krustpunkta piederības funkcijas vērtība ir vienāda ar mazāko vērtību no divām, kas atrodas apaļajās iekavās (3.1.).

Piederības funkcija to pašu kopu apvienošanai tika aprēķināta sekojoši:

$$\mu_{e \cup de/dt} = \max(\mu_e, \mu_{de/dt}) \quad (3.2.)$$

Piederības funkcijas, kas iegūtas kopām krustojoties vai savienojoties, var tikt definētas dažādos veidos atkarībā no risināmās problēmas nozīmes. Šajā ziņā arī pati nestrikto kopu teorija ir nestrikta. Parasti izmanto saprotamāku darbību, lai atrastu piederības funkcijas kopu krustojšanās un apvienojšanās gadījumā, kam ir analogija ar varbūtību reizināšanas un saskaitīšanas noteikumiem:

$$\mu_{e \cap de/dt} = \mu_e * \mu_{de/dt} \quad (3.3.)$$

$$\mu_{e \cup de/dt} = \mu_e + \mu_{de/dt} - \mu_e * \mu_{de/dt} \quad (3.4.)$$

Piederības funkcijas katrai no kopām  $NL$ ,  $NM$ ,  $Z$ ,  $PM$ ,  $PL$ , kas ietilpst nestriktajā mainīgajā  $\tilde{u}$  un rezultējošā vadības iedarbības piederības funkcija, kas iegūta pēc visu 9 likumu piemērošanas, tika aprēķināta kā visu noteikumu piederības funkciju apvienojums:

$$\mu(\tilde{u}) = \max\{\mu_{P1}(\tilde{u}), \mu_{P2}(\tilde{u}), \dots, \mu_{P9}(\tilde{u})\} \quad (3.5.)$$

$$u = \frac{\int_{u_{min}}^{u_{max}} \tilde{u} \mu(\tilde{u}) d\tilde{u}}{\int_{u_{min}}^{u_{max}} \mu(\tilde{u}) d\tilde{u}} \quad (3.6.)$$

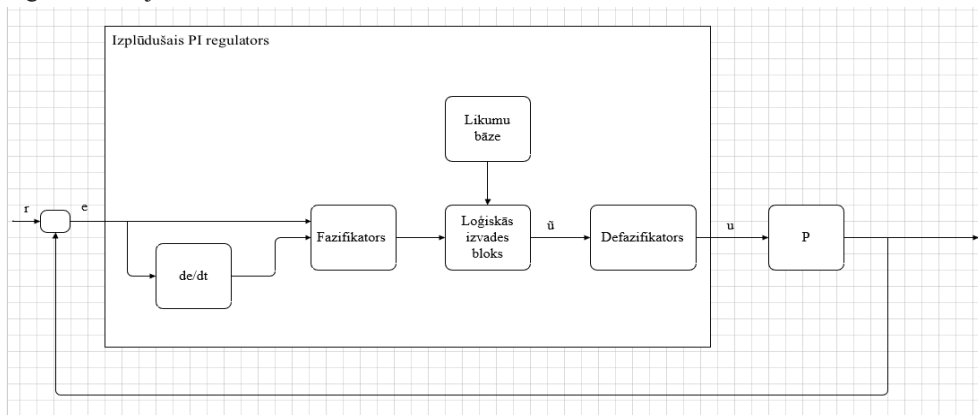
Lai izveidotu fazi regulatorus, parasti izmanto  $P$ ,  $I$ ,  $PI$  un  $PD$ ,  $PD + I$ ,  $PI + D$  un  $PID$  regulēšanas likumus. Kļūdas signāls, kļūdas pieaugums, kļūdas kvadrāts un kļūdu integrālis var tikt izmantoti kā ieejas signāli nestrikto secinājumu sistēmai. Ir jāsecina, ka fazi–PID regulatora ieviešana darbā izvirzīto uzdevumu risināšanai ir problemātiska, jo tai ir jābūt trīsdimensiju noteikumu tabulai saskaņā ar trim PID kontrollera vienādojuma noteikumiem.

### 3.4. Fazi–PI un fazi–PID regulatoru analīze

Tā kā no operatora saņemtā informācija tiek izteikta verbāli, tās izmantošanai  $PID$  kontrolleros tiek izmantoti lingvistiskie mainīgie un nestrikto kopu teorijas aparāts. Ja skaidru kopu teorijā kāds elements (piemēram, temperatūra 50 grādi) var piederēt kopai (piemēram, kopa “karstā ūdens temperatūra”) vai arī nepiederēt, tad nestrikto kopu teorijā piederības funkcijas jēdziens tiek ieviests, kas raksturo elementa piederības pakāpi kopai. Tajā pašā laikā

var pateikt, ka, piemēram, “50 grādu temperatūra pieder kopai ar piederības pakāpi 0,264”. Piederības funkciju var aptuveni interpretēt kā varbūtību, ka dotais elements pieder kopai, taču šī interpretācija, lai arī ir saprotamāka inženieriem, nav matemātiski stingra, jo esošā fazikopu teorija nedarbojas ar varbūtības jēdzienu [48], [50].

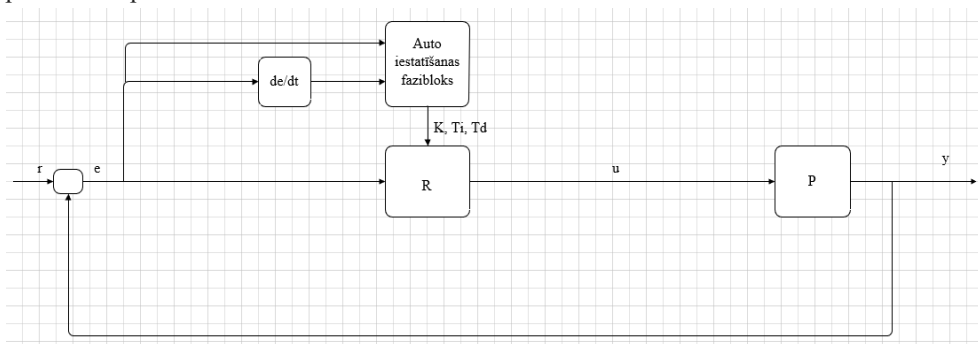
Viena no visizplatītākajām faziloģikas kontrollera struktūrām (fazi–PI kontrolleris) ir parādīta 3.5. attēlā [68]. Šī struktūra darbojas sekojoši: regulatora ieejā tiek saņemta kļūda un tiek aprēķināts tā atvasinājums pēc laika. Tālāk abi lielumi vispirms tiek pakļauti fazifikācijai (pārveidošanai nestriktajos mainīgajos), pēc tam iegūtos nestriktos mainīgos izmanto nestriktu izvadu (izeju) blokā, lai iegūtu vadības iedarbību uz objektu, kas pēc defazifikācijas darbības veikšanas (nestriktu mainīgo apgriezta transformācija precīzos mainīgos), tiek novirzīts regulatora izejā vadības iedarbes veidā  $u$ .



3.5. att. Regulēšanas ar fazi–PI kontrolleri struktūrshēmas piemērs

Regulatora ieregulēšanu var veikt operators, pamatojoties uz noteikumiem vai automātiski, izmantojot faziloģikas bloku (3.6. att.) [68]. Faziloģikas bloks izmanto regulēšanas likumu bāzi un nestriktās izvades metodes. Nestriktā regulēšana ļauj samazināt pārregulēšanu, samazināt nostādināšanas laiku un palielināt PID regulatora robustumu [69], [70].

Kontrollera automātiskās ieregulēšanas process, izmantojot faziloģikas bloku, sākas ar kontrollera koeficientu  $K$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  sākotnējo tuvinājumu meklēšanu. To parasti veic ar metodi, kuras pamatā ir dabisko svārstību periods slēgtā sistēmā un cilpas pastiprināšanu. Tālāk tiek formulēta kritērija funkcija, kas nepieciešama, lai ar optimizācijas metodēm atrastu skaņošanas parametru optimālās vērtības.



3.6. att. PID regulatora struktūra ar auto iestatīšanas fazibloku

Regulatora noregulēšanas procesā tiek izmantotas vairākas darbības. Sākumā izvēlas automātiskās noskaņošanas vienības ieejas un izejas signālu diapazonus, meklējamo parametru piederības funkciju formu, nestriktās izvades likumus, loģiskās izvades mehānismu, defazifikācijas metodi un mēroga faktoru diapazonu, kas nepieciešami, lai striktus mainīgos pārvērstu par nestriktiem [48].

Regulatora parametru meklēšana tiek veikta ar optimizācijas metodēm. Šim nolūkam mērķa funkcija tiek izvēlēta kā kontroles kļūdas un nostādināšanas laika kvadrātu summas integrālis. Minimizācijas kritērijā dažreiz pievieno objekta izvades mainīgā pieauguma ātrumu.

Kā meklējamie parametri tiek izvēlēta piederības funkciju maksimumu pozīcija un mēroga koeficienti nestriktā bloka ieejā un izvadē [48]. Optimizācijas problēmai tiek pievienoti ierobežojumi piederības funkciju pozīciju variācijas diapazonam.

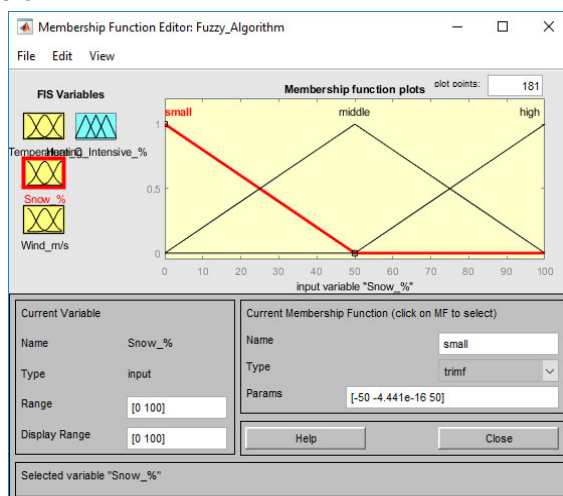
### 3.4. PEAS faziloģikas modeļa izveide MatLAB vidē

Faziloģikas sistēmas vislabāk tiek piemērotas tur, kur tradicionālie risinājumi nedod vēlamu rezultātu. Faziloģikas sistēmas var piemērot arī citos darbības laukos, kur iespējams pielietot fazikopas un loģiku, piemēram, faziloģikā balstītas sistēmas, kas izmanto “ja-tad” nosacījumus, faziloģikas programmatūras izstrādē, kur nenoteiktība ir programmas un datu sastāvā, datubāzēs, kas uzglabā un attēlo šādu informāciju [48].

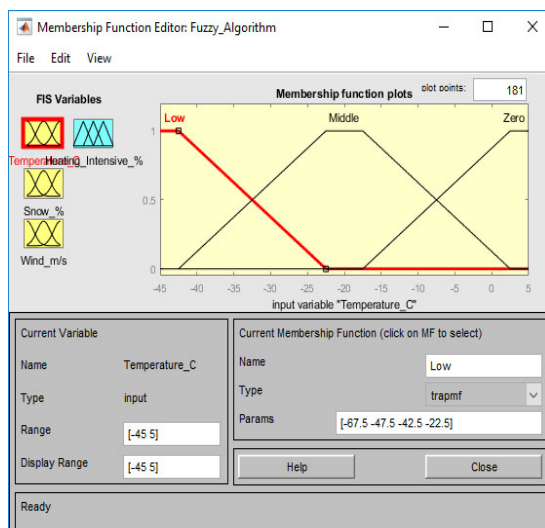
Intelektuālās vadības algoritmam tika izmantota *Mathlab Fuzzy Logic Designer* programmatūra. Pirmkārt, tika iestatīti četri ieejas mainīgie: temperatūra; sniegs; lietus; vēja ātrums.

Nākamais posms bija ieejas un izvades parametru raksturīgās funkcijas (piederības funkcijas) izvēle un norādīšana. No regulārāk izmantojamām piederības funkcijām ( $\Delta$  funkcijas,  $\Pi$  funkcijas, Gausa funkcijas, S funkcijas) tika izvēlētas atbilstošākās katram attiecīgajam ieejas parametram [48], [51].

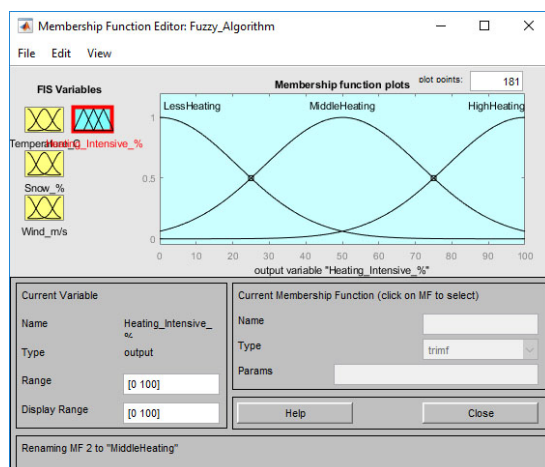
Katra ieejas faktora piederības funkcijas veido nestrikto vērtību trapeceveida attēlojumu: temperatūra – zema temperatūra; sniegs – viegls, vidējs un stiprs sniegs; lietus – bez lietus un stiprs lietus; vēja ātrums – neliels, vidējs un stiprs vējš. Piederības funkciju diapazons atšķiras, kā redzams 3.7. un 3.8. attēlā.



3.7. att. Faziloģikas modeļa ieejas parametru piederības funkciju definēšana 1(2).



3.8. att. Faziloģikas modeļa ieejas parametru piederības funkciju definēšana 2(2).

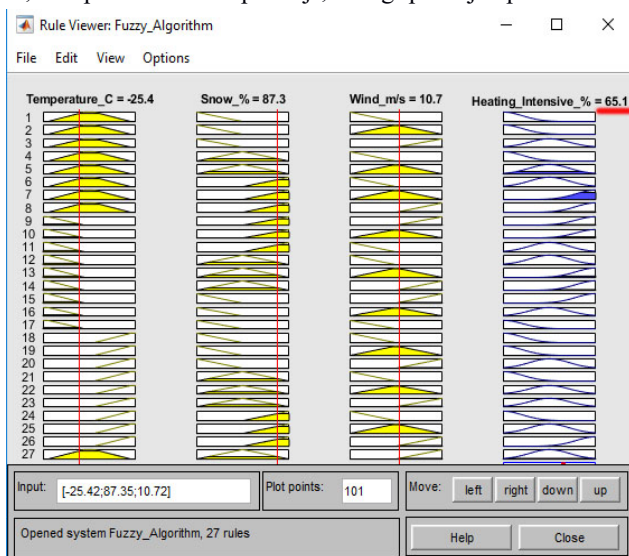


3.9. att. Faziloģikas modeļa izejas parametra piederības funkciju definēšana.

Tālāk, lai veiktu simulāciju, tika izveidota likumu bāze (3.9. att.), kas izmantota par pamatu algoritmam.

1. ja  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , neieslēgt pārmiju apsildi;
2. ja  $t < 0^{\circ}\text{C}$  un ir maz sniega, ieslēgt pārmiju apsildi ar minimālu jaudu;
3. ja  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , ir maz sniega un neliels vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar minimālu jaudu;
4. ja  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , ir mazs sniegs un vidējs vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar minimālu jaudu;
5. ja  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , ir maz sniega un stiprs vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar vidēju jaudu;
6. ja  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , ir vidējs sniegs un neliels vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar vidēju jaudu;
7. ja  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , ir vidējs sniegs un vidējs vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar vidēju jaudu;
8. ja  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , ir vidējs sniegs un stiprs vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar maksimālu jaudu;
9. ja  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , ir stiprs sniegs un neliels vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar vidēju jaudu;
10. ja  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , ir stiprs sniegs un vidējs vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar vidēju jaudu;

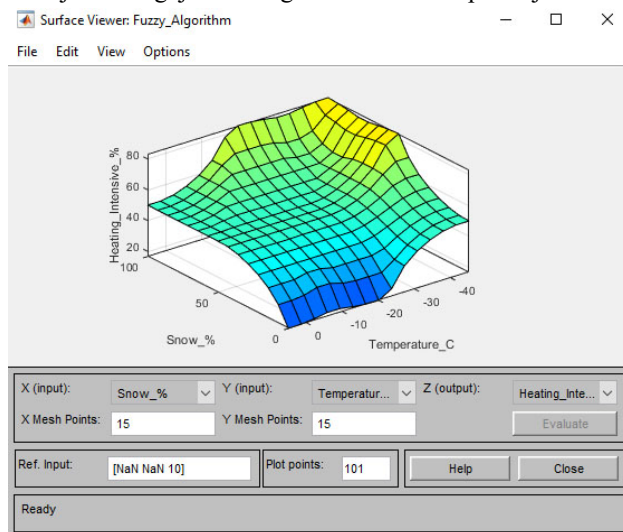
11. ja  $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ir stiprs sniegs un stiprs vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar maksimālu jaudu;
12. ja  $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ir stiprs lietus un neliels vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar minimālu jaudu;
13. ja  $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ir stiprs lietus un vidējs vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar minimālu jaudu;
14. ja  $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ir stiprs lietus un stiprs vējš, ieslēgt pārmiju apsildi ar vidēju jaudu.



3.10. att. Faziloģikas modeļa likumu bāze.

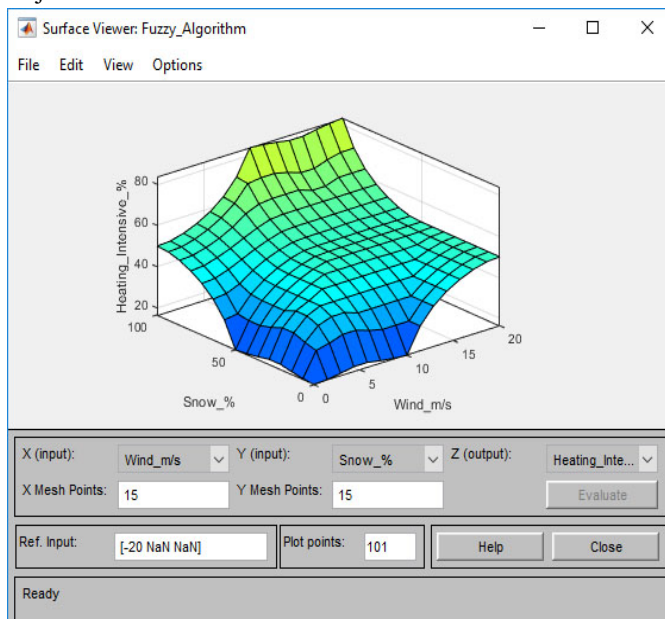
Izveidotie likumi atļāva formulēt iegūtās diagrammas uzvedības principus, tādējādi skaidri parādot, ka optimālā rezultāta sasniegšanai nepietiek ar vienu vai diviem ieejas mainīgajiem. Turklāt, lai parādītu pieņemamus rezultātus likumu bāzē, ir jāņem vērā noteikts skaits likumu.

Kā pēdējais solis pēc simulācijas programmā *Fuzzy Logic Designer* tika izveidots grafiks. Visi aprakstītie un ieviestie likumi redzami 3D virsmas diagrammās *Graph Surface Views* (skat. 3.10. att.). Pirmais virsmas skats (3.11. att.) ir no diviem ieejas parametriem atkarīgs simulācijas rezultāts ar šādiem ieejas mainīgajiem: sniega intensitāte un apkārtējās vides temperatūra.



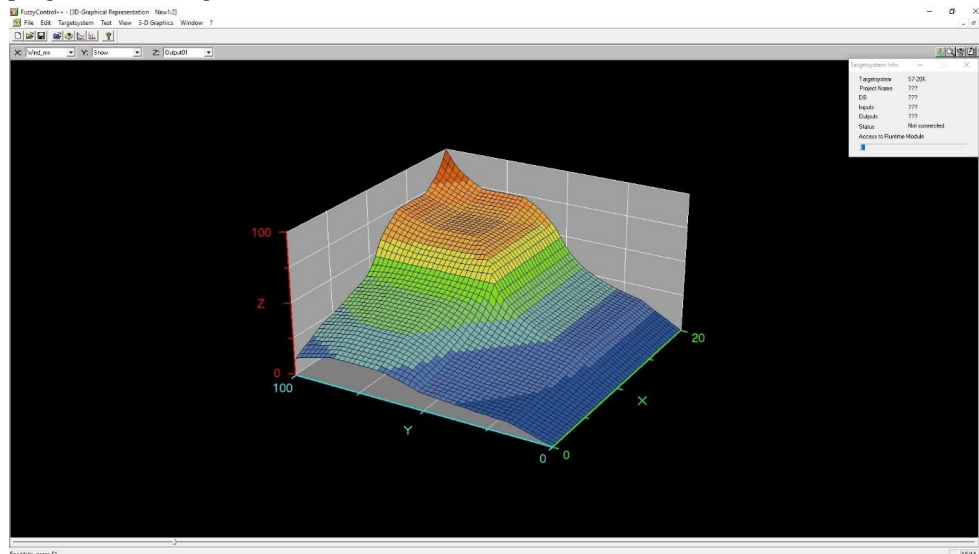
3.11. att. Faziloģikas modeļa rezultējošie virsmas skati 1(2).

Otrais virsmas skats (3.12. att.) arī ir divu ieejas parametru – sniega intensitātes un vēja ātruma – simulācijas rezultāts.



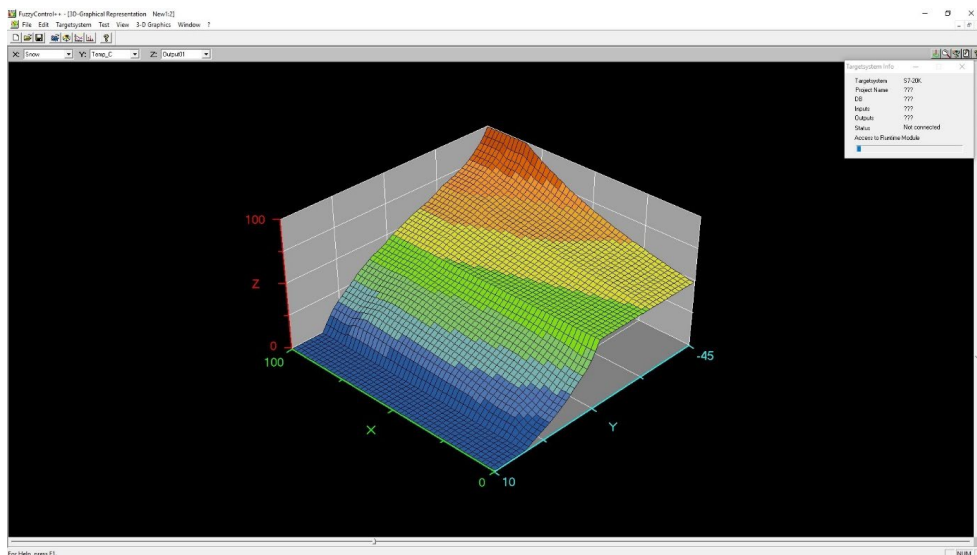
3.12. att. Faziloģikas modeļa rezultējošie virsmas skati 2(2).

Pēc tam iegūtie rezultāti tika verificēti ar SIEMENS Fuzzy Logic “FuzzyControl++” programmatūru, iegūtie rezultāti redzami 3.13. un 3.14. attēlā.



3.13. att. Faziloģikas modeļa verificētie rezultējošie virsmas skati 1(2).





3.14. att. Faziloģikas modeļa verificētie rezultējošie virsmas skati 2(2).

Iegūtās virsmas nav gludas, un nav iespējams iegūt gludas virsmas, jo izveidotie likumi ir vairāku nelineāru ieejas mainīgo vienādojumi. Aprēķinātie rezultāti liecina par būtisku atkarību no snigšanas intensitātes. Augstākais *PEAS* piederības punkts ir tas, kur ieejas parametra “Sniegs” vērtība sasniedz augstāko vērtību.

Rezultāti parāda, ka izejas parametrs (*PEAS*) iegūtā grafika veidā ir atkarīgs no šādiem parametriem: negatīva ārējais temperatūra, nokrišņi un vēja ātrums.

Izstrādāto faziloģikas modeļi var tālāk izmantot neironu tīkla vai progresīvāku ekspertu sistēmas attīstībai. Ņemot vērā to, ka dzelzceļa stacijas ar *DP* atrodas dažādos Latvijas rajonos, izstrādāto modeļi ir saprātīgi uzstādīt dažādās *PEAS* vadības sistēmās, savienojot šādas sistēmas neironu tīklā, lai apmācītu tīklu dažādās klimatiskajās zonās. Tas ļaus apmācīt tīklu dažādos klimatiskajos apstākļos šajos apgabalos, un tādējādi modeļi var ievērojami uzlabot un padarīt robustāku un efektīvāku.

### Secinājumi par nodaļu

Faziloģikas pielietojums ir ļoti plašs, bet tam ir arī ierobežojumi, kas parasti saistīti ar rezultāta mērķi.

Dažādu heuristisko algoritmu analīze parādīja, ka netipiskiem dzelzceļa automātikas uzdevumiem, piemēram, pārmiju apsildes vadības sistēmai, viena no vispiemērotākajām metodēm ir faziloģikas aparāts. Tieši fazikopas, kas raksturo faziloģikas terminus, visobjektīvāk raksturo visu sporādiski mainīgo ieejas parametru spektru, ja nepieciešams noturēt izejas parametra vērtību noteiktajās robežās.

Saskaņā ar formulētajām ieejas un izejas vērtību fazikopām, kā arī loģisko nosacījumu kopu, *Mathlab Fuzzy Logic Designer* konstruktorā simulēta pārmiju apsildes regulēšanas modelis. Ar šī modeļa palīdzību aprēķināta nepieciešamā sildīšanas jauda jebkurām ieejas parametru vērtībām un konkrētas jaudas vērtības aprēķins veikts ar centrēšanas metodi.

## 4. DZELZCEĻA PĀRMIJU ELEKTRISKĀS APSILDES VADĪBAS SISTĒMAS REALIZĀCIJA PĀRMIJU ATTĪRĪŠANAI NO SNIEGA UN LEDUS

### 4.1. Prasību formulējums pārmiju apsildes vadības sistēmai

Izvēloties *PEAS* dzelzceļa infrastruktūrai, ir jāņem vērā sekojošie principi: darbgatavība, drošums, funkcionāla drošība, vadības vienkāršums un cena.

Nepieciešamai vadības sistēmai jāatbilst šādiem parametriem:

1. jāveic apsildes sildelementu izolācijas pretestības mērīšanu;
2. jāveic sprieguma mērīšana, kas tiek padots uz sildelementu;
3. jāveic strāvas mērīšana, kas plūst apsildes sildelementos;
4. jāveic apsildāmo sliežu temperatūras mērīšanu;
5. jāveic apkārtējā gaisa temperatūras mērīšanu;
6. jāveic nokrišņu esamības pārbaudi;
7. iespēja veikt konfigurācijas un programmkoda modernizāciju/papildināšanu.

Izstrādājot prasības *PEAS*, tika ņemti vērā vairāki galvenie parametri, kas nepieciešami *DP* attīrīšanai no sniega un ledus dzelzceļa iecirkņos.

1. *PEAS* darbības iespējamība, ņemot vērā plašu apkārtējās vides temperatūru diapazonu. Pārmijas attīrīšanai no sniega un ledus nodrošināšanai *PEAS* ir jāstrādā ārējās temperatūras diapazonā no  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  līdz  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
2. Iespēja veikt sistēmas monitoringu neatkarīgi no laika un apkārtējās vides apstākļiem. Vēja ātrums, zema apkārtējās vides temperatūra vai sniegpuenis nedrīkst būtiski ietekmēt *PEAS* darbību. *PEAS* ir jāspēj veikt sniega kausēšanu ar vēja ātrumu līdz 30 m/s, sniegpuņķa un lietus apstākļos. *PEAS* sastāvā ir jābūt iekārtām, kas ir noturīgas pret agresīvas vides – dzelzceļa ritošā sastāva eļļas, smēres, putekļi un abrazīvās daļiņas – iedarbību.
3. Iespēja nodot monitoringa informāciju par darbības rezultātiem reālā laika (tiešsaistes) režīmā. Komunikācijas sistēmai ir jānodrošina iespēja nolasīt *PEAS* sensoru parametrus reālā laika režīmā. Turklāt datu pārraides kanālu uzticamai darbībai nepieciešams izveidot tos ar noturību pret dažādu traucējumu iedarbību.

Izmantojot *PEAS* ar to iespējām un raksturlielņem pārmiju apsildei un attīrīšanai no sniega un ledus, ļaus vienlaicīgi veikt gan mazas, gan lielas stacijas (pēc pārmiju skaita) pārmiju attīrīšanu, kā arī, nodrošināt procesa monitoringu tiešsaistē. Piedāvātā *PEAS* ir aprīkota ar daudzparametru meteostaciju, kas ir spējīga veikt gaisa temperatūras, relatīvā mitruma, nokrišņu intensitātes, nokrišņu veida, nokrišņu daudzuma, gaisa spiediena, vēja ātruma un virziena noteikšanu un mērīšanu ar šo parametru reāla laika datu pārraidi uz vadības datoru. Šī tipa meteostacija ir orientēta uz nepārtrauktu darbību (24/7). Tajā pat laikā *PEAS* ir aprīkota ar drošības sistēmu ar pasīvu un aktīvu aizsardzību, ja rodas avārijas situācijas. Piedāvātās *PEAS* tips ļauj attiekties no darbietilpīgām un neefektīvām pārmiju attīrīšanas metodēm, izmantojot vairāku cilvēku brigādes vai pneimatiskās appūšanas sistēmas. Speciālais algoritms ļauj izmantot *PEAS* tikai tad, kad tā ir nepieciešama un tik ilgi, kamēr tā ir nepieciešama. Ārkārtas situācijās, piemēram, sniegpuņķa laikā, *PEAS* ir spējīga strādāt ar maksimālu jaudu vairāku

stundu laikā, un arī 4–6 stundas pēc sniegpuņņa beigām, lai garantēti izkausētu sniegu no pārmijas.

## 4.2. Pārmiju elektriskās apsildes vadības sistēmas funkcionālās iespējas un tehniskās raksturlīknes

*PEAS* tika projektēts, ņemot vērā stingras prasības, kuras tika izstrādātas darba autoram un darba vadītājam sadarbojoties ar “LDz”. Piedāvājot tehnisko risinājumu, nepieciešams *PEAS* izstrādes stadijā noteikt apsildāmo elementu garumu, elektrisko jaudu, meteostacijas nepieciešamību un uzstādāmos sensorus vairākfunkciju lietošanai. Eksperimentālās *PEAS* gadījumā efektīvs risinājums ir esošās *PAS* sistēmas pārbūve un modernizācija. *PEAS* tehniskajam izpildījumam ir jānodrošina iespēja pieslēgt nepieciešamos sensorus un meteostaciju saskaņā ar tehnisko specifikāciju. Tika izvēlēts sliedes temperatūras sensors un multiparametru meteostacija, kas ir spējīga mērīt temperatūru, nokrišņu tipu un daudzumu, vēja ātrumu un citus sekundārus parametrus. Meteostacijai ir jānodrošina elastība, izmantojot dažādu tipu sensorus, nepieciešamo parametru datu nosūtīšana uz vadības datoru reāla laika režīmā, darbspējīgums 24 stundas diennaktī.

Pamata darba režīmā *PEAS* ir iespēja strādāt no 20 – 80 % jaudas diapazonā, un konkrētais jaudas lielums ir atkarīgs no laika apstākļiem konkrētajā laika posmā. Minimālās jaudas režīms ir no 0 – 20 % no maksimālās jaudas, kas ir nepieciešams pārmijas pozitīvas temperatūras uzturēšanai tādos laika apstākļos, kad ir iespējams apledojums. Maksimālās jaudas režīms ir no 80 – 100 % no maksimālās jaudas, ko izmanto stipras snigšanas vai sniegpuņņa laikā. Šādos laika apstākļos ir nepieciešams maksimāli ātri kausēt sniegu no pārmijas un nepieļaut pārmijas aizsnigšanu un tādējādi novēršot draudus vilcienu kustības drošībai. Tā pat ir nepieciešams kausēt sniegu no pārmijas arī pēc snigšanas beigām 4 – 6 stundu ilgumā, lai garantēti attīrītu pārmiju no sniega un ūdens. Šis ilgums tika noteikts eksperimentāli, un šajā laikā jāuztur 40 – 50 % maksimālās jaudas režīms.

Pārmiju termālā stāvokļa monitoringam tika izmantots *NTC* tipa temperatūras sensors. Šis sensors ir ērts un vienkāršs ekspluatācijā, un ļauj ātri noteikt pārmijas temperatūras režīmu.

Meteostacijas, kas ir spējīga noteikt nokrišņu intensitāti, pielietošana ļauj precīzi noteikt nelabvēlīgos laika apstākļus un caur vadības kontrolleri regulēt apsildes jaudu. Meteostacijas, kas atšķir nokrišņu tipu (sniegs vai lietus), izmantošana ļauj veikt apsildes režīmu (pamata un minimālais) ieslēgšanas lietderīguma apstiprināšanu, jo virzoties pretī izvirzītajiem klimatneitralitātes rādītājiem nedrīkst pieļaut pamata režīma ieslēgšanos lietus laikā un, no otras puses, vilcienu kustības drošības nodrošināšanai nedrīkst ieslēgt minimālo apsildes režīmu snigšanas laikā. Lai atbalstītu meteostacijas noteikto nokrišņu tipu un pasargātos no iespējamās kļūdas, *PEAS* vadības algoritmā, tika izstrādāta funkcionalitāte, kas pārbauda ārējās vides temperatūru kopā ar nokrišņu tipu, un sistēma, salīdzinot izmērītos parametrus ar uzdotiem nosaka, vai nokrišņi ir sniega tipa vai lietus. Jo pie ārējās vides temperatūras  $t_{ār} \geq +3 \text{ } ^\circ\text{C}$ , algoritmā tiek pieņemts par nokrišņu tipu = lietus. Ja ārējās vides temperatūra  $t_{ār} < +3 \text{ } ^\circ\text{C}$ , tad tiek pieņemts, ka nokrišņu tips = sniegs vai slapjš sniegs.

### 4.3. PEAS ierīču un tehnoloģijas izvēle efektīvai pārmiju apsildei

#### 4.3.1. Izstrādājamās PEAS galveno uzdevumu noteikšana

“LDz” ekspluatācijas noteikumi ietver prasības pārmiju apsildes vadības un kontroles, un to vadības sistēmu izveidošanai. Galvenais mērķis ir tekošu laika apstākļu novērošana, lai noteiktu nokrišņu veidošanos un izkrišanu, un tādu apstākļu rašanos, kas varētu apdraudēt drošu dzelzceļa infrastruktūras ekspluatāciju. Informācija par meteoroloģiskiem apstākļiem ir ļoti svarīga, lai pieņemtu lēmumu par pārmiju apsildes ieslēgšanas un regulēšanas stratēģiju. Dzelzceļa infrastruktūras pārvaldītājam ir jāizpilda nokrišņu frontes izplatīšanās prognozes, izmantojot vizuālos novērojumus. Parasti ar vizuālo novērojumu palīdzību konstatētais nokrišņu tips un intensitāte ir jāpārbauda, salīdzinot ar laika prognozi, vēja stiprumu un ārgaisa temperatūru. Pēc tam ir jāveic visu ārējo faktoru savstarpējās ietekmes analīze, lai pieņemtu lēmumu par pārmiju apsildes ieslēgšanu un nepieciešamā apsildes režīma izvēli. Viena no kompleksā meteoroloģisko apstākļu monitoringa pieejām ir visu apkārtējās vides faktoru mērīšana, izmantojot meteostaciju. Tālāk informācija par apkārtējās vides faktoriem, nonāk vadības kontrollerī, kas var nosūtīt brīdinājumu par kādu parametru samazināšanos zem slietiskā lieluma (piemēram, ārgaisa temperatūras samazināšanās zem +3 °C). Veicot pastāvīgu ārējo laika apstākļu monitoringu, ir iespējams noteikt sakarību starp dažādiem laika apstākļu tipiem un pārmijas apsildes ieslēgšanas nepieciešamību un intensitāti. Atkarībā no laika apstākļu un nokrišņu tipa ir nepieciešams minimizēt pārmiju apsildes ieslēgšanas lēmuma pieņemšanas laiku. Ideālajā gadījumā ir jāizveido *PEAS*, kas pati var ieslēgties atkarībā no laika apstākļu un nokrišņu tipa, un pati var izvēlēties apsildes jaudu un ilgumu.

Viens no svarīgākajiem laika apstākļu monitoringa uzdevumiem ir ticamas, objektīvas un nepieciešamas informācijas iegūšana laika apstākļu un nokrišņu rakstura noteikšanai. Tādu laika apstākļu izveidošanās, kuru dēļ var apsnigt pārmija vai arī notikt tās apledojums, var notikt neprecīza, pavirša monitoringa vai cilvēka kļūdas dēļ. Šos gadījumus var atsekt ar nepārtrauktu monitoringu ar meteostācijas un vadības kontrollera kombinācijas palīdzību. Tāpēc ātrs laika apstākļu un nokrišņu rakstura novērtējums ir nepieciešams, lai noteiktu pārmiju apsildes ieslēgšanas nepieciešamību un apsildes jaudu.

Sniegs, slapjš sniegs, apledojošs lietus ir tādi nokrišņi, kuriem ir regulāras parādības raksturs ziemas periodā un šajā sakarā, izveidojot pārmiju apsildes vadības programmu, ir jāņem vērā šie faktori un to mijiedarbība ar ārgaisa temperatūru un vēja stiprumu. Galvenais ārējais laika apstākļu faktors ir ārgaisa temperatūra dzelzceļa stacijas rajonā. Precīzai vadības programmai ir nepieciešama informācija par ārgaisa temperatūru, ko iegūst no meteostācijas un tai pat laikā nepieciešams tās monitorings reālā laika režīmā.

Lai veiktu efektīvu pārmiju apsildes vadību atkarībā no laika apstākļiem, bija nepieciešams izstrādāt teorētiski pamatotu un praktiski realizējamu metodoloģiju, kas ļauj risināt sekojošus uzdevumus:

- ārgaisa temperatūras, vēja stipruma un nokrišņu tipa un intensitātes nepārtraukta mērīšana;
- sniega un ledus atkausēšana pārmijas asmens un rāmjslīdes zonā;
- slīdes temperatūras uzturēšana noteiktā temperatūras diapazonā;
- pārmijas asmens un rāmjslīdes piesaļšanas nepieļaušana.

Metodoloģijas pielietošana praksē atļāva nodrošināt laika apstākļu kontroli uz dzelzceļa infrastruktūras un operatīvu pārmiju attīrīšanu no nelabvēlīgiem nokrišņiem (sniegs, ledus).

#### 4.3.2. Izstrādājamās PEAS un galveno konkurentu salīdzinājums

*PEAS*, kurai nepastāv regulēšanas iespējas sākotnējai novērtēšanai tika veikta SVID analīze. Galvenais SVID analīzes mērķis bija salīdzināt un novērtēt dažādu *PEAS* priekšrocības un trūkumus. Lielākajā daļā Latvijas dzelzceļa staciju, kurās darbojas *PEAS*, šī *PEAS* tiek darbināta ar vienkāršu ieslēgšanas/izslēgšanas metodi. Sildelementam jauda tiek pievadīta, kad dzelzceļa stacijas operators ir ieslēdzis *PEAS*, izmantojot īpašu vadības slēdzi. Ieslēdzot, *PEAS* strādā ar maksimālo jaudu, un stacijas operatoram nav iespējas mainīt sildelementam pievadīto jaudu vai citādi regulēt *PEAS*. Nav arī automātiskas regulēšanas iespējas. Lai novērtētu visas iesl./izsl. regulēšanas īpašības, tika veikta SVID analīze, kuras rezultāti parādīti 4.1. tabulā.

4.1. tabula

Bezregulēšanas *PEAS* SVID analīze

<i>Stiprās puses</i>	<i>Iespējas</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viegli un ērti ekspluatēt</li> <li>• Neliels ierīču skaits, kas var atteikt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Var viegli uzlabot vadības un regulēšanas nolūkos</li> </ul>
<i>Vājās puses</i>	<i>Draudi</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augsts enerģijas patēriņš</li> <li>• Nevar regulēt</li> <li>• Nav elastīgs, ja apkārtējā temperatūra ir paaugstinājusies</li> <li>• Nav iespējams vadīt attālināti</li> <li>• Nav atgriezeniskās saites no sistēmas par tās stāvokli</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atgriezeniskās saites neesamības dēļ var notikt ārkārtas situācijas</li> <li>• Monitoringa aprīkojuma neesamības dēļ var nepamanīt avārijas situāciju, piem. strāvas noplūde izolācijas pārrāvuma dēļ</li> </ul>

Vēl viens veids, kā nodrošināt sildelementu elektroapgādi un regulēt *PEAS* jaudu, ir regulēšanas shēma ar negatīvu atgriezenisko saiti. Šeit var konstatēt, ka regulēšanas shēma ar atgriezenisko saiti veido slēgtu datu pārraides ķēdi, kas ļauj nepārtraukti uzraudzīt procesus vadāmajā objektā un veidot atbilstošus regulējošos signālus. Tāpat kā jebkurai citai metodei, regulēšanai ar atgriezenisko saiti ir savas priekšrocības un trūkumi. Stipro un vājo pušu novērtējums ir sniegts ar SVID analīzes palīdzību, un rezultāti ir sniegti 4.2. tabulā.

4.2. tabula

Regulējamās *PEAS* ar atgriezenisko saiti SVID analīze

<i>Stiprās puses</i>	<i>Iespējas</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viegli un ērti ekspluatēt</li> <li>• Neliels ierīču skaits, kas var atteikt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Var viegli uzlabot vadības un regulēšanas nolūkos</li> </ul>
<i>Vājās puses</i>	<i>Draudi</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vidējs enerģijas patēriņš</li> <li>• Regulēšana tikai pamatojoties uz vienu parametru</li> <li>• Nav atgriezeniskās saites no sistēmas par tās stāvokli</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoringa aprīkojuma neesamības dēļ var nepamanīt avārijas situāciju, piem. strāvas noplūde izolācijas pārrāvuma dēļ</li> </ul>

Paplašinot iepriekšējās shēmas ar papildu elementiem, tika izveidota shēma ar traucējumu efektu kontroli, kas apvieno divus signālus vadības sistēmā – uzdoto ieejas signālu un traucējumu signālu. Šīs regulēšanas metodes īpašību salīdzinājums ir parādīts 4.3. tabulā.

4.3. tabula

Regulējamas PEAS ar atgriezenisko saiti un traucējumu kontroli SVID analīze

<i>Stiprās puses</i>	<i>Iespējas</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viegli un ērti ekspluatēt</li> <li>• Regulēšana ar vienu sensoru un ar traucējumu kontroli</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Var viegli uzlabot vadības un regulēšanas nolūkos</li> </ul>
<i>Vājās puses</i>	<i>Draudi</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vidējs enerģijas patēriņš</li> <li>• Nav atgriezeniskās saites no sistēmas par tās stāvokli</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoringa aprīkojuma neesamības dēļ var nepamanīt avārijas situāciju, piem. strāvas noplūde izolācijas pārrāvuma dēļ</li> </ul>

4.3. tabulā aprakstītā regulēšanas metode ir visefektīvākā no trim šajā paragrāfā aprakstītajām metodēm. Saskaņā ar [40], [41] kļūda ir 21–25%, kas ir joma, kurā uzlabojumi vienmēr dos labumu sistēmai un ekspluatējošai organizācijai.

Dažādu PEAS analīze 4.1., 4.2. un 4.3. tabulā parāda, ka tām ir trūkumi un ir jāizstrādā PEAS ar multisensoru vadības principiem. Analīzes laikā tika secināts, ka apsildes ieslēgšanas noteikšanas uzlabošanai un viltus trauksmes novēršanai ir jāattīsta noteikšanas metodes. SVID analīze parādīja, ka tikai viens sensors nevar sniegt pilnīgu informāciju, kas nepieciešama efektīvai pārmiju apsildes regulēšanai.

Saskaņā ar [6], [40] efektīvai PEAS ir jāizpilda šādi nosacījumi:

$$P = \begin{cases} \max, f(k_0) = 1 & \text{if } t < -25^\circ\text{C} \\ f(k_0) = \text{variable}, & \text{if } -25^\circ\text{C} \leq t < +5^\circ\text{C} \\ 0, & f(k_0) = 0 & \text{if } t \geq +5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.1.)$$

Arguments  $k_0$  sastāv no mainīgo parametru kopas, kas ir redzama 4.2. izteiksmē. Funkcijas  $f(k_0)$  rezultāts ir dažādu parametru vērtību korelācija, kas iekļautas kopā.

$$k_0 = \begin{cases} \text{wind speed} \\ \text{outside temperature} \\ \text{atmospheric precipitation} \\ \text{atmospheric pressure} \\ \text{rail temperature} \end{cases} \quad (4.2.)$$

4.1. Izteiksmi var pārveidot arī šādā nosacījumā:

$$\lim_{n \rightarrow \min} f(k_0) = 0 \text{ if } t \geq 0. \quad (4.3.)$$

Izstrādājot PEAS ar multisensoru vadību, tika formulētas šādas prasības:

- iespēja izmantot vairākus sensorus un ārējo meteostaciju, lai būtu maksimāla informācija par apkārtējiem faktoriem;
- nepārtraukts sistēmas, sensoru un ārējo parametru monitorings;
- iespēja laideni regulēt apsildes jaudu.

Pētījuma gaitā tika izstrādāta PEAS metode un iekārta. Pārmiju apsildes metode sniega, ledus un citu nokrišņu attīrīšanai no pārmijas virsmas ietver savlaicīgu apsildes ieslēgšanu, ņemot vērā meteostacijas datus, apsildes jaudas regulēšanu atkarība no nokrišņu intensitātes un

apkārtējās vides temperatūras mijiedarbības un sliedes temperatūras nepārtrauktu monitoringu. PEAS izmantošanas optimizēšanai dažādu nokrišņu tipa monitoringa laikā tika izmantota ārēja meteostacija, kas tika integrētā kopējā PEAS. Izmantotai meteostacijai Lufft WS600–UMB tika veikta SVID analīze (4.4. tab.).

4.4. tabula

Meteostācijas Lufft WS600–UMB SVID analīze

<i>Stiprās puses</i>	<i>Iespējas</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompakta laikapstākļu sensora korpusa koncepcija, kas apvieno 6 mērījumu parametrus</li> <li>• Iebūvēta datu priekšapstrāde, universālas sasaistes un atlasāmi izejas protokoli; atvērts komunikācijas protokols</li> <li>• Eksploatācija bez apkopes – nav kustīgu detaļu, kas var nolietoties</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meteostaciju var pieslēgt vadības kontrollerim datu apmaiņai</li> <li>• Iespēja pieslēgt ārēju temperatūras sensoru</li> </ul>
<i>Vājās puses</i>	<i>Draudi</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nepieciešams patstāvīgi montēt kabeli pieslēguma ligzdā, lai pieslēgtu meteostaciju vadības kontrollerī</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zibens triecienu drauds, ja nav uzstādīta attiecīga aizsardzība</li> <li>• Meteostācijas stiprinājums var atteikt stipras vētras un no vilcienu kustības radušās gaisa masas dēļ</li> </ul>

SVID analīze parāda, ka izvēlētai meteostacijai ir vairāk priekšrocību nekā citām Lufft katalogā pieejamajām meteostacijām [15]. Šīs meteostācijas pielietošanu apdraud tikai ļoti slikti laika apstākļi.

#### 4.3.3. Dažādu PEAS vadības algoritmu trūkumu analīze

Izpildot pārmiju apsildi un tās darbības monitoringu, ir nepieciešams pastāvīgi veikt novērojumus jebkurā laika brīdī. Attiecīgi, laika apstākļu un nokrišņu konstatēšanas ierīcēm ir jābūt neatkarīgām no dažādiem laika apstākļiem, piemēram, lietus un miglas. Vējš arī var ietekmēt pārmiju apsildi un līdz ar to, ir jāveic vēja ātruma mērīšana. Galvenais ekspluatācijā esošo pārmiju apsildes sistēmu trūkums ir tas, ka netiek nodrošināts pastāvīgs sliedes temperatūras un apkārtējās vides laika apstākļu monitorings.

Monitoringam ar laika apstākļu prognožu *Internet* datiem vai kosmiskajiem laikapstākļu novērošanas līdzekļiem ir neapšaubāms trūkums: neiespējamība iegūt informāciju reālā laika režīmā. Tāpat prognožu dati tiek sniegti par plaša mēroga ģeogrāfisko lokāciju (piemēram, par visu Rīgu vai Daugavpili), bet precīzai pārmiju apsildes vadībai ir nepieciešami reāla laika dati par konkrēto vietu, kur atrodas pārmija un meteostacija vai par visu pārmijkopu.

Laika apstākļu monitorings palīdz noteikt gaidāmos un esošos apstākļus, kuros pārmiju apsilde darbosies, bet laika apstākļu reāla laika monitorings nevar palīdzēt uzlabot visus esošo pārmiju apsildes sistēmu trūkumus. Pie šādiem trūkumiem var pieskaitīt: jaudas manuālas un automātiskās regulēšanas neiespējamība, atgriezeniskās saites par sliedes temperatūru neesamība vienkāršām PEAS. Lai arī uzlabotām PEAS ir pieslēgti sliedes temperatūras sensori,

kas caur atgriezenisko saiti nonāk vadības sistēmā un tai ir iespējams ieslēgties un izslēgties atkarībā no uzdotās temperatūras sasniegšanas sliedzīna lieluma nostrādāšanas, šīm *PEAS* pietrūkst mūsdienīga monitoringa un nav reāla laika datu no meteostācijas par tās ģeogrāfiskās lokācijas laika apstākļiem un nokrišņiem. Tāpat šajās *PEAS* ir realizēts salīdzinoši vienkāršs algoritms un arī elementu bāze, kas kopumā neļauj laideni regulēt apsildes jaudu.

Efektīvas monitoringa un apsildes programmas izveidošanai ir nepieciešams noteikt nokrišņu intensitāti noteiktā laikā. Laika apstākļu un nokrišņu mērīšanai ir svarīga nozīme, lai izveidotu dinamisku *PEAS* vadības modeli. Tomēr ar vienkāršu vēja vai ārgaisa temperatūras konstatēšanu un mērīšanu nepietiek reāla laika monitoringam, ja laika apstākļu dati nepieciešami kompleksai multisensoru *PEAS*. Laika apstākļu un nokrišņu daudzuma un intensitātes precīza un nepārtraukta mērīšana var nodrošināt precīzu informāciju, piemēram, par snigšanas intensitāti, vēja stiprumu un ārgaisa temperatūru.

4.5. tabula

*PEAS* klasiskā algoritma SVID analīze

<b>Stiprās puses</b>	<b>Iespējas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klasisks un vienkāršs algoritms</li> <li>• Iespējams ieslēgt un izslēgt apsildi – ātri un vienkārši</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Var viegli uzlabot vadības un regulēšanas nolūkos</li> </ul>
<b>Vājās puses</b>	<b>Draudi</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algoritma darbība netiek regulēta</li> <li>• Nav elastīgs, ja ir vairāku ietekmējošu faktoru izmaiņas</li> <li>• Nav iespējams vadīt attālināti</li> <li>• Nav atgriezeniskās saites no sistēmas par tās stāvokli</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atgriezeniskās saites neesamības dēļ, regulēšana nav efektīva un var būt nekontrolējama</li> <li>• Monitoringa aprīkojuma neesamības dēļ var nepamanīt avārijas situāciju, piem. strāvas noplūde izolācijas pārrāvuma dēļ</li> </ul>



## PEAS vadības sistēmas ģenētiskā algoritma SVID analīze

Stiprās puses	Iespējas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inovatīvs algoritms</li> <li>• Iespējams precīzi regulēt apsildi, tās jaudu un ilgumu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jo vairāk iterāciju, jo precīzāks vadības algoritms</li> <li>• Kontrollera resursu pārbagātība – var izmantot citiem mērķiem</li> </ul>
Vājās puses	Draudi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lēmuma pieņemšanai nepieciešams pārmērīgi liels iterāciju skaits, kas ietekmē lēmumu pieņemšanas laiku (jebkuras izmaiņas ārējos parametros prasa 100 un 1000 iterācijas, lai atrastu jaunu vadības signāla vērtību)</li> <li>• Nepieciešams jaudīgs kontrolleis, lai izpildītu daudzās iterācijas</li> <li>• Jo jaudīgāks kontrolleis, jo tas ir dārgāks</li> <li>• Kontrollera noslodze būs nevienmērīga, līdz ar to lielāko ekspluatācijas laiku kontrolleis būs dīkstāvē</li> <li>• Nepieciešams augsti kvalificēts personāls algoritma administrēšanai un izmaiņu ieviešanai</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrollera atteices gadījumā būs augstas nomaņas izmaksas</li> <li>• Kontrollera atteices gadījumā pastāv iespējamās grūtības ar tikpat jaudīga analoga iepirkumu</li> <li>• Sensora atteices gadījumā sistēma paliek nedarbspējīga vai gala lēmums būs ārkārtīgi nepareizs</li> </ul>

## PEAS vadības sistēmas faziloģikas algoritma SVID analīze

Stiprās puses	Iespējas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iespējams precīzi regulēt apsildi, tās jaudu un ilgumu</li> <li>• Spēj apstrādāt multiietekmes faktorus – temperatūru, sniegu, u. c.</li> <li>• Algoritmu var realizēt gandrīz ar jebkuru mūsdienu kontrolleis bez stingras prasības pret pārbagātu veikspēju</li> <li>• Tipveida kontrolleis izmantošana krietni samazina sistēmas izmaksas</li> <li>• Faziloģikas algoritma kodu ir iespējams veidot ar saprotamu grafisku interfeisu un ērti pārveidot kontrolleis programmēšanas valodā</li> <li>• Algoritma administrēšanu var veikt ar dzelzceļa inženiera kvalifikāciju</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iespēja integrēt vadības kontrolleis neironu tīklā</li> <li>• Algoritms var vadīt vairākas sistēmas vienlaikus</li> </ul>
Vājās puses	Draudi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mazāk precīzs algoritms, salīdzinot ar ģenētisko algoritmu, kas šajā gadījumā nav kritiski sistēmas uzdevumu izpildē</li> <li>• Neliels kontrolleis loks, kas tiešā veidā atbalsta faziloģiku</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensora atteices gadījumā sistēma strādās ar pazeminātu efektivitāti</li> </ul>

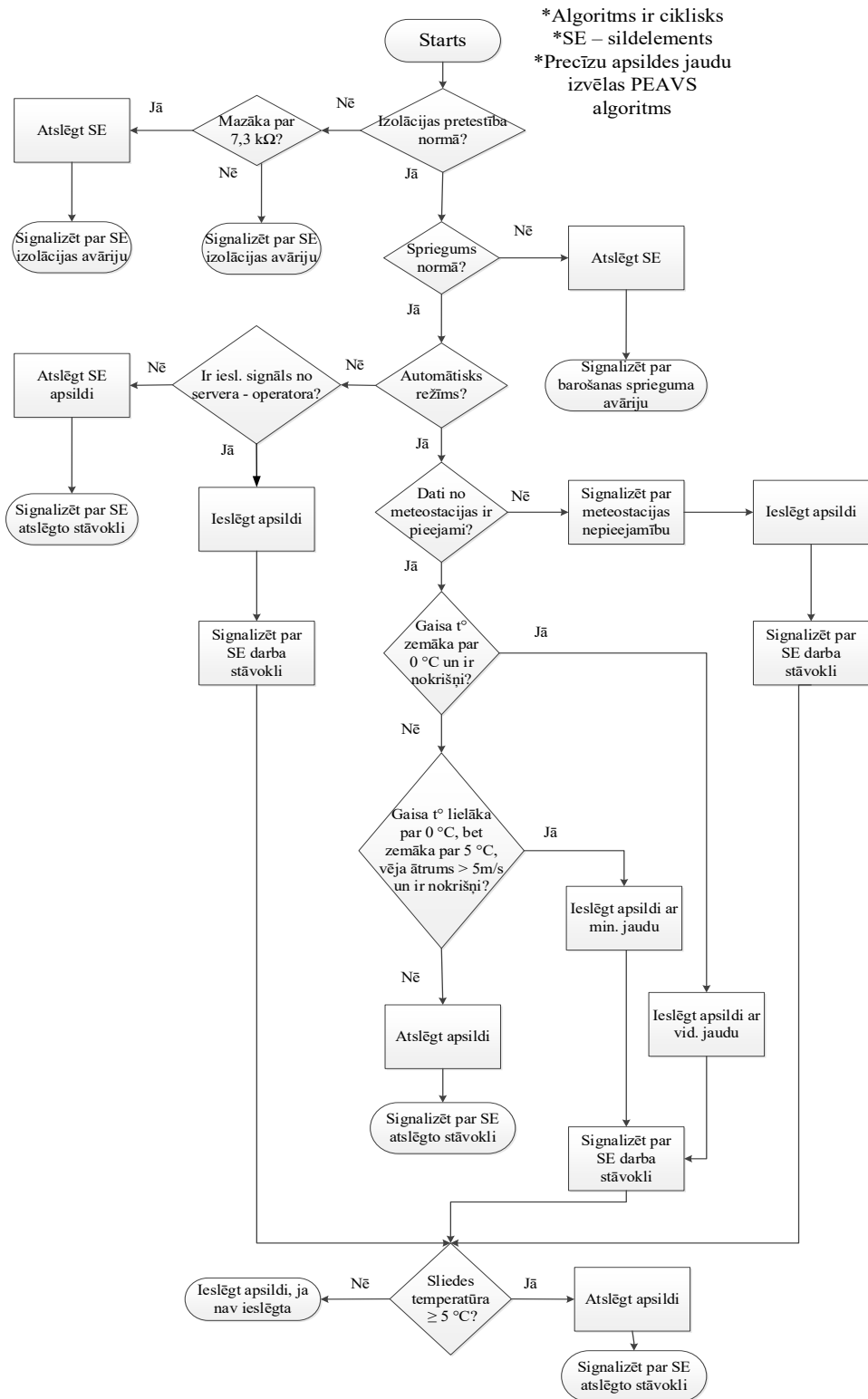
## PEAS vadības sistēmas regresijas algoritma SVID analīze

Stiprās puses	Iespējas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algoritma izstrāde un realizācija ir relatīvi vienkārša</li> <li>• Iespējams diezgan precīzi regulēt apsildi, tās jaudu un ilgumu</li> <li>• Spēj apstrādāt multiietekmes faktorus – temperatūru, sniegu, vēju, u. c. [75]</li> <li>• Algoritms var tikt realizēts gandrīz ar jebkuru mūsdienu kontrolleru bez stingras prasības pret pārbagātu veikspēju [76], [77]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algoritms var vadīt vairākas sistēmas vienlaicīgi</li> <li>• Iespējams uzbūvēt sistēmas parametru monitoringu</li> </ul>
Vājās puses	Draudi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sākumā pieņemtie ierobežojumi un pieņēmumi ietekmē visu algoritmu tā darbības laikā</li> <li>• Izmaiņu ieviešana prasa visa algoritma pārstrādi</li> <li>• Algoritma administrēšanai ir nepieciešams specializēti apmācīts personāls</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensora atteices gadījumā sistēma paliek nedarbspējīga vai gala lēmums būs ārkārtīgi nepareizs</li> </ul>

## 4.3.4. PEAS darbības tehnoloģijas un algoritma izstrāde

*DP* efektīvai apsildei un atīrīšanai no sniega un ledus un monitoringa sistēmai izvirzīto prasību uzskaitē ir iespējama, izmantojot *PEAS* ar ārējo meteostaciju. Šis risinājums ir komplekss un ļauj veikt laika apstākļu mērīšanu (sniegs, ledus) un mērījumu rezultātu apstrādi ar mērķi apstiprināt rezultātus. *PEAS* izmantošana kopā ar meteostaciju un monitoringa veikšana, ļauj noteikt negatīvu laika apstākļu (sniegs, sniegs ar vēju) intensitāti pārmijkopā kurā atrodas apsildāmā pārmija. Iegūtie dati, piemēram, snigšanas intensitāte ir jāsalīdzina ar *PEAS* ieslēgšanas un apsildes jaudas novērtēšanas parametriem.

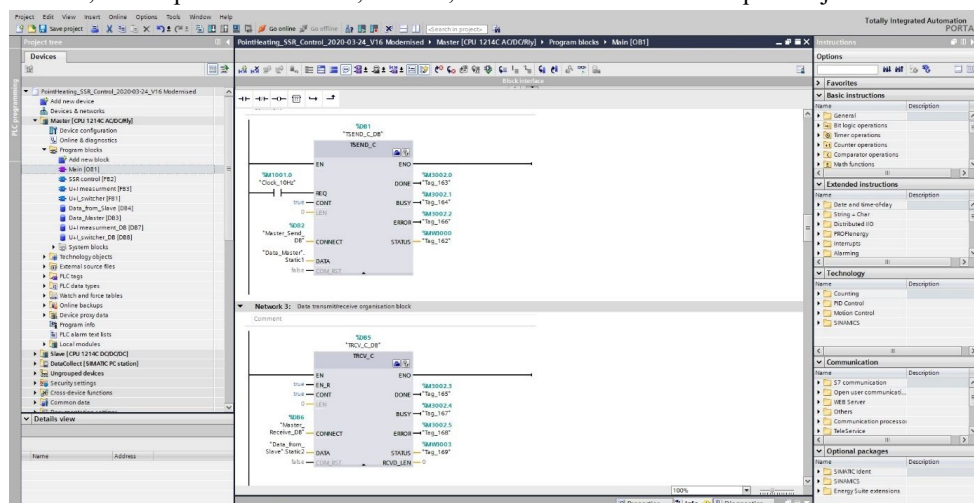
*PEAVS* darbības algoritms ir redzams 4.1. attēlā. Iestājoties nelabvēlīgiem laika apstākļiem, sistēma sāk pārbaužu izpildi pirms sprieguma padošanas uz sildelementu. Tiek pārbaudīta izolācijas pretestība, spriegums, darbības režīms, datu pārraides esamība no meteostācijas. Tālāk tiek pārbaudīti laika apstākļi un, ja ārējais temperatūra ir zem 0 °C un ir nokrišņi, tad tiek ieslēgta apsilde ar vidēju jaudu. Ja ārējais temperatūra ir lielāka par 0 °C, bet zemāka par 5 °C, vēja ātrums > 5m/s un ir nokrišņi, tad apsilde tiek ieslēgta uz minimālu jaudu. Precīzu apsildes jaudu izvēlas *PEAVS* vadības algoritms.



4.1. att. Piedāvātās PEAVS darbības algoritms, iestājoties nelabvēlīgiem laika apstākļiem.

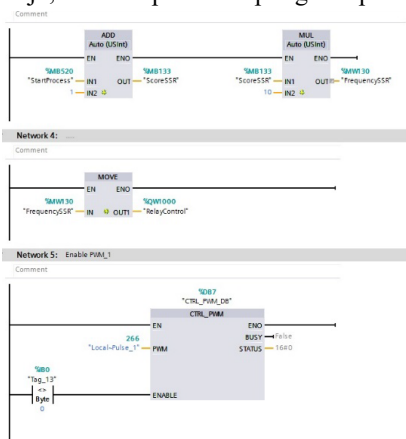
Nepieciešamo temperatūras un sniega datu iegūšanai dažādos laika apstākļos, tika izmantoti divi pamata sensori: ārējais temperatūras un sliedes temperatūras sensors. Pirmais sensors ir meteostācijas sensors un tas ir paredzēts ārējais temperatūras mērīšanai konkrētā rajonā. Otrais sensors paredzēts sliedes temperatūras mērīšanai, tādējādi nodrošinot atgriezenisko saiti par sliedes stāvokli (auksta, karsta, u.c.) vadības algoritma pareizai darbībai.

Uz divu *SIEMENS S7-1214* programmējamo loģisko kontrolleru (*PLK*) bāzes tika izveidots automatizētas apsildes sistēmas prototips, ņemot vērā temperatūras, vēja ātruma un nokrišņu ietekmi, lai noteiktu pārmijas sildīšanas jaudu. Programmas galvenie bloki ir bloki informācijas pārraidei un saņemšanai starp kontrolleriem (4.2. att.), kas ļauj pārraidīt meteoroloģiskos datus no *PLK*, kuram pievienoti sensori, uz *PLK*, kas tieši vada un kontrolē apsildes jaudu.



4.2. att. Uz *PLK* balstīts automatizētas sistēmas projekts

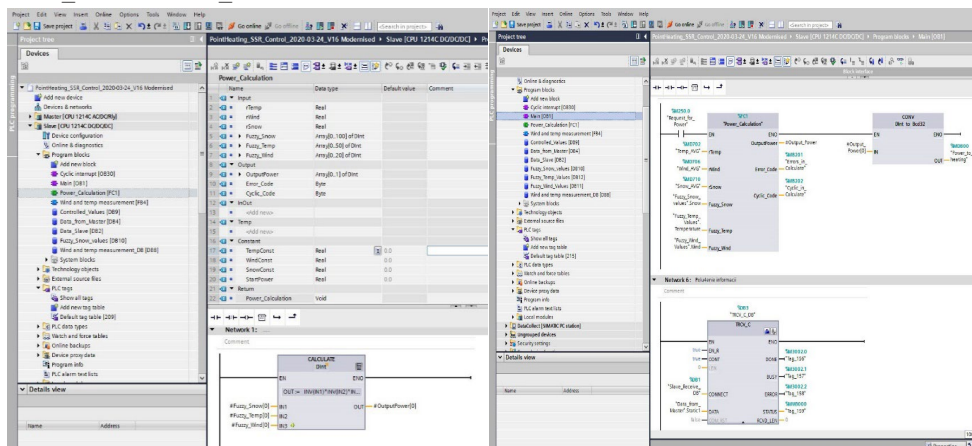
Sildelementa jaudas regulēšana tika realizēta ar impulsu platuma modulācijas vadību (4.3. att.) izmantojot pusvadītāju releju, kas tieši pārslēdz sprieguma padevi uz sildelementu.



4.3. att. Impulsa platuma modulācijas kontrollera izejas vadības ieviešana

Impulsa platuma modulācijas koeficienta vērtības un atiecīgi sildelementam pievadītās jaudas aprēķins tiek realizēts kā funkciju bloks *Power\_Calculation* (FB1). Šajā blokā vērtība

tiek aprēķināta, balstoties uz faziloģikas algoritmu, kas tika realizēts kā vērtību masīvs: *Fuzzy\_Temperature\_Values*, *Fuzzy\_Wind\_values* un *Fuzzy\_Snow\_values*. Informācija par pašreizējiem laikapstākļiem tika ievietota aprēķinu blokā, izmantojot ievades: *Temp\_AVG*, *Snow\_AVG* un *Wind\_AVG*.



4.4. att. Jaudas aprēķina ieviešana, balstoties uz faziloģiku

Ekspluatācijā esošu *PEAS* neefektīvas vadības un operatīvā monitoringa neesamības novēršanas programmas īstenošanai, promocijas darba izstrādes procesā, tika izstrādāta metode un *PEAS* ierīces prototips apsildes vadībai un kontrolei, un nepārtrauktam laika apstākļu monitoringam. Metode un ierīce ietver vilcienu kustības drošību apdraudošu laika apstākļu iestāšanos, *PEAS* ieslēgšanu, *PEAS* darbības kontroli, laika apstākļu pastāvīgu monitoringu, datu pārraidi izmantojot datu pārraides kanālu, *PEAS* jaudas regulēšanu atkarībā no laika apstākļu izmaiņām.

### Secinājumi par nodalū

Formulēti izstrādājamā *PEAS* prototipa galvenie uzdevumi, kuri rezultējās fundamentālo uzdevumu aprakstā:

- sniega un ledus atkausēšana pārmijas asmens un rāmjslides zonā;
- slīdes temperatūras uzturēšana noteiktā temperatūras diapazonā;
- pārmijas asmens un rāmjslides sasalšanas nepieļaušana.

Izpildītā analīze parādīja, ka tieši šo uzdevumu izpilde ir vitāli svarīga, lai nodrošinātu pārmijas tīrību ziemas apstākļos un vilcienu kustības drošību. Tāpat pastāvīgs laika apstākļu monitoring un savlaicīga apsildes ieslēgšana, pirms nelabvēlīgu laika apstākļu iestāšanās ir kā svarīgs un efektīvs priekšnosacījums minēto uzdevumu izpildē.

Sastādīts algoritms, uz kura pamata tika izstrādāts programmas kods uz Siemens kontrolera bāzes. Programmas kodā tika veikta divu kontroleru divvirzienu datu pārraide, ieprogrammēts protokols un procedūra darbam ar meteoroloģiskās stacijas datiem, izveidoti funkcionālie bloki ievades parametru vērtību apstrādei un aprēķināta sildelementa jaudas vērtība.

## 5. DZELZCEĻA PĀRMIJU ELEKTRISKĀS APSILDES VADĪBAS SISTĒMAS TESTĒŠANA REĀLOS APSTĀKĻOS

Lai pārbaudītu teorētiskos aprēķinus, veikto modelēšanu un aprēķinus, tika veikta piedāvātās *PEAS* testēšana reālos dzelzceļa apstākļos. Eksperimenta izpildei bija nepieciešama pārmija ar apsildes elementiem, pārmiju apsildes skapis, kurā ir brīva vieta iekārtu izvietošanai, optiskā kabeļa sakaru līnija starp pārmiju apsildes skapi un stacijas telekomunikāciju centralizētām iekārtām attālās piekļuves nodrošināšanai. Pārrunu rezultātā ar “LDz” tika panākta vienošanās par eksperimentu veikšanu. Tika izvēlēta Zaslauka stacija, pārmija Nr. 9 ar tajā esošu pārmiju elektriskās apsildes sistēmu, kurā tika uzstādīta eksperimentālā *PEAS* apsildes iekārta lauka skapī. Ir jāmin, ka eksperimentā tika izmantoti esošie sildelementi, kabeļi no *PEAS* skapja līdz sildelementiem, izolējošais transformators 230 V / 230 V un automātslēdzi.

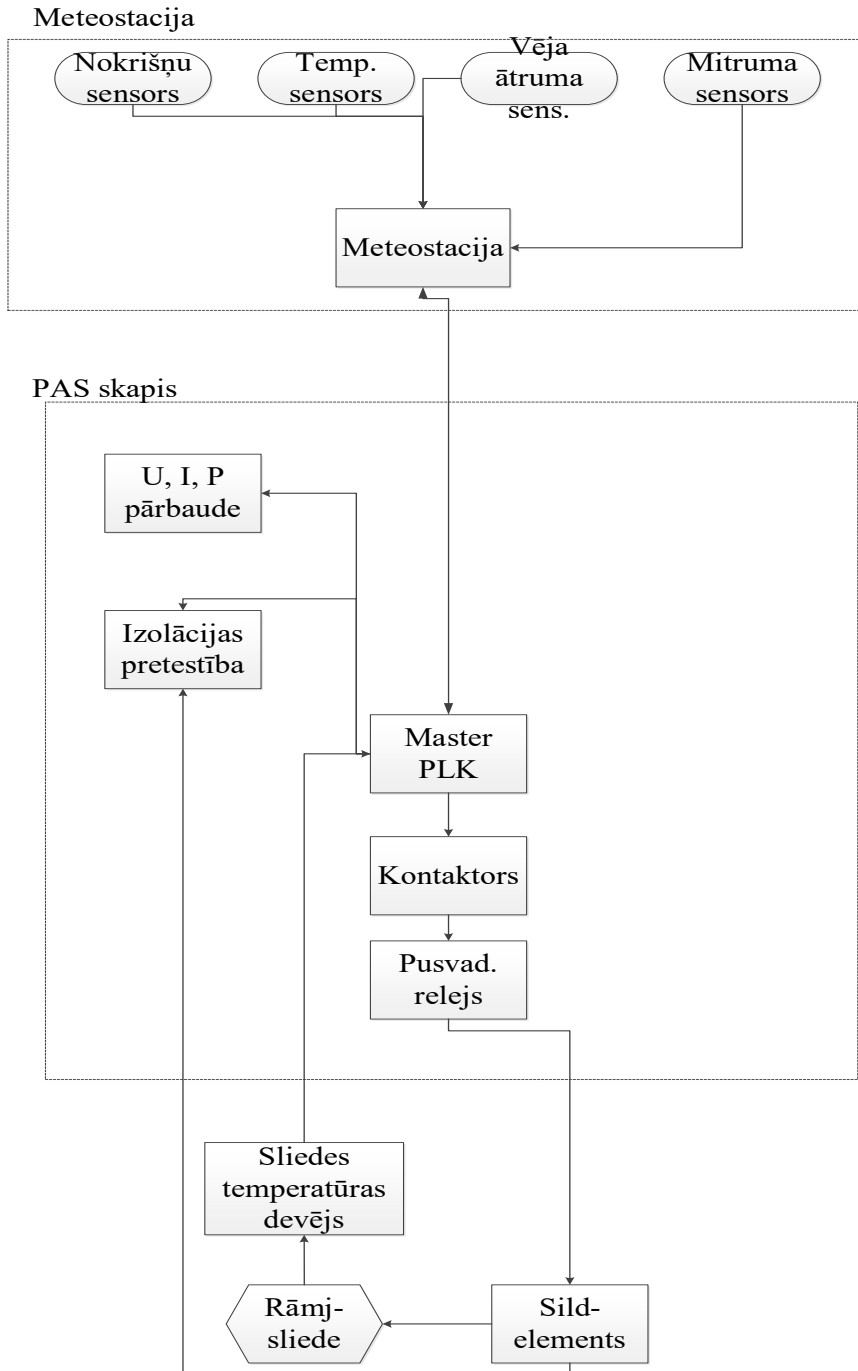
5.1. attēlā ir parādīta regulēšanas objekta – pārmijas izskats reālos ziemas apstākļos Latvijas teritorijā. Kā redzams, apsildes sistēmas darbības rezultātā sniegs aktīvajā pārmijas daļā – asmeņu zonā ir nokausēts, kas ir regulēšanas sistēmas darbības rezultāts. Lai nokausētu sniegu, pirmkārt jārealizē jaudas komponente, kas atkarīga no temperatūras starpības ( $\theta_b - \theta_0$ ), kur  $\theta_0$  ir apkārtējā gaisa temperatūra, bet  $\theta_b$  ir apsildes beigu (galējā) temperatūra, kas tiek pieņemta  $+5\text{ }^\circ\text{C}$ . Tiek pieņemts, ka  $\theta_b = +5\text{ }^\circ\text{C}$ , kas ir balstīts uz autora eksperimentiem, kuru laikā tika pierādīts, ka pie temperatūras  $+5\text{ }^\circ\text{C}$  sniegs tiek garantēti izkausēts un arī tiek novērsta sniega kušanas rezultātā izveidojušās ūdens un mitruma sasaldšana.



5.1. att. Pārmijas izskats reālos ziemas apstākļos.

## 5.1. PEAVS shēmas un galveno ierīču apraksts

Piedāvātās PEAVS vienkāršotā blokshēma ir parādītā 5.2. att.

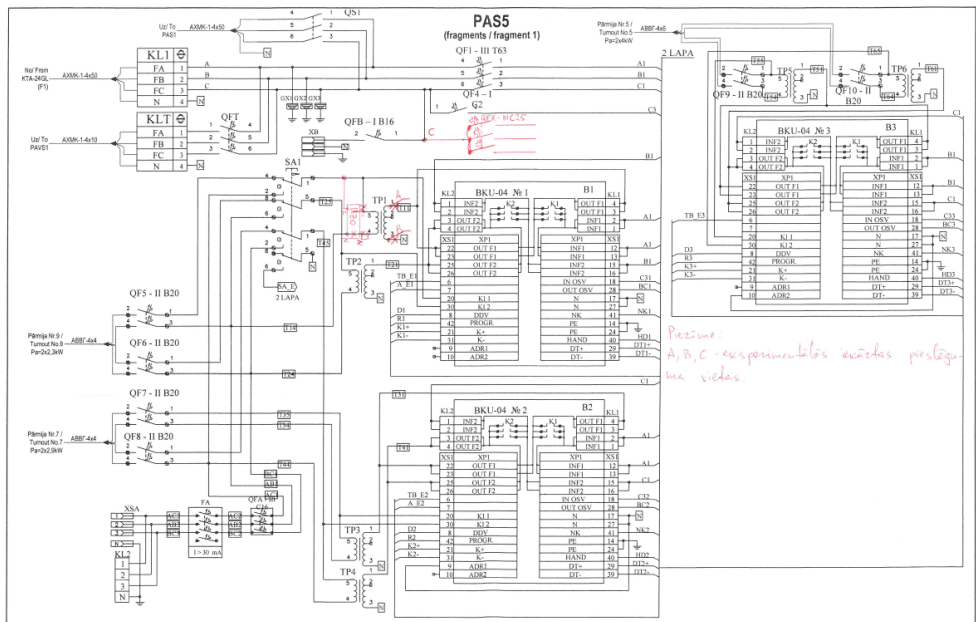


5.2. att. Piedāvātās PEAVS blokshēma.

Shēmas pamatā ir vadības kontrolleris, kas vada pusvadītāju releju, kas caur galveno kontaktoru komutē padodamo spriegumu uz sildelementu. Sildelements ir aktīvās pretestības sildīšanas elements, kas tika piestiprināts pie pārmijas rāmjslīdes. Tāpat uz rāmjslīdes tika piestiprināts temperatūras sensors, kas mēra slīdes temperatūru un darbojas kā atgriezeniskā saite. Temperatūras sensors nosūta izmērītās temperatūras datus atpakaļ uz vadības kontrolleri tādējādi noslēdzot vadības un kontroles ķēdi.

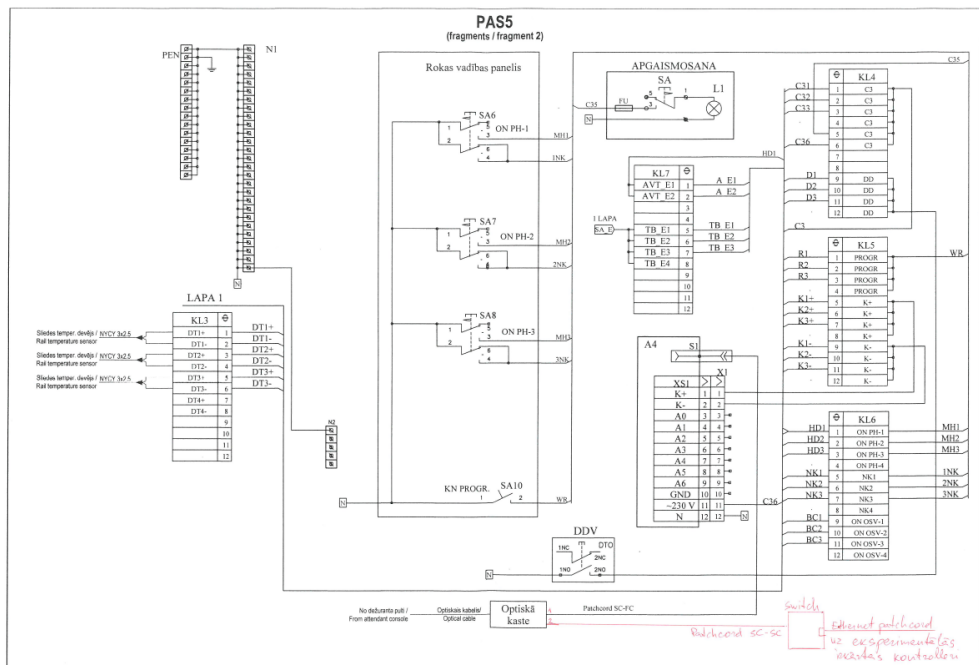
Kontrolleris, ar papildus bloku palīdzību mērīja padodamo spriegumu uz sildelementu, aktīvo jaudu un strāvu. Šie dati tika attēloti vadības programmatūrā reālā laika režīmā. Tāpat kontrollerim bija pieslēgta *Lufft WS600-UMB* meteostacija, kas reāla laika režīmā sniedza datus par laika apstākļiem zonā pie pārmijas – ārgaisa temperatūra, vēja stiprums, nokrišņu tips un intensitāte, atmosfēras spiediens, u.c. Dati no meteostācijas un slīdes temperatūra bija par pamatu vadības algoritma iedarbībai uz pusvadītāju releju un nepieciešamā sprieguma lieluma padošanu uz apsildes elementu.

Shēma ir parādīta 5.3. att. un 5.4. att. Shēmas darbības apraksts: no trīs fāžu automatiskā slēdža ar viena vada palīdzību tiek pieslēgts eksperimentālās *PEAVS* ieejas automātslēdzis *QFX – III C25* (5.2. att. apzīmējums “C”). Tālāk caur eksperimentālo *PEAVS* vienfāzes spriegums nonāk uz izolējoša transformatora *TP1* spailēm 1(A) un 3(B), kur tālāk sekundāra tinuma spailēm 4 un 5 ir pieslēgts elektroenerģijas patēriņa mērierīce *UZO* no kuras ar esošo vadu palīdzību tika pieslēgts aizejošā kabeļa automātslēdzis *QF5 – II B20*.



5.3. att. Piedāvātās *PEAVS* izmaiņas esošā elektriskā shēmā

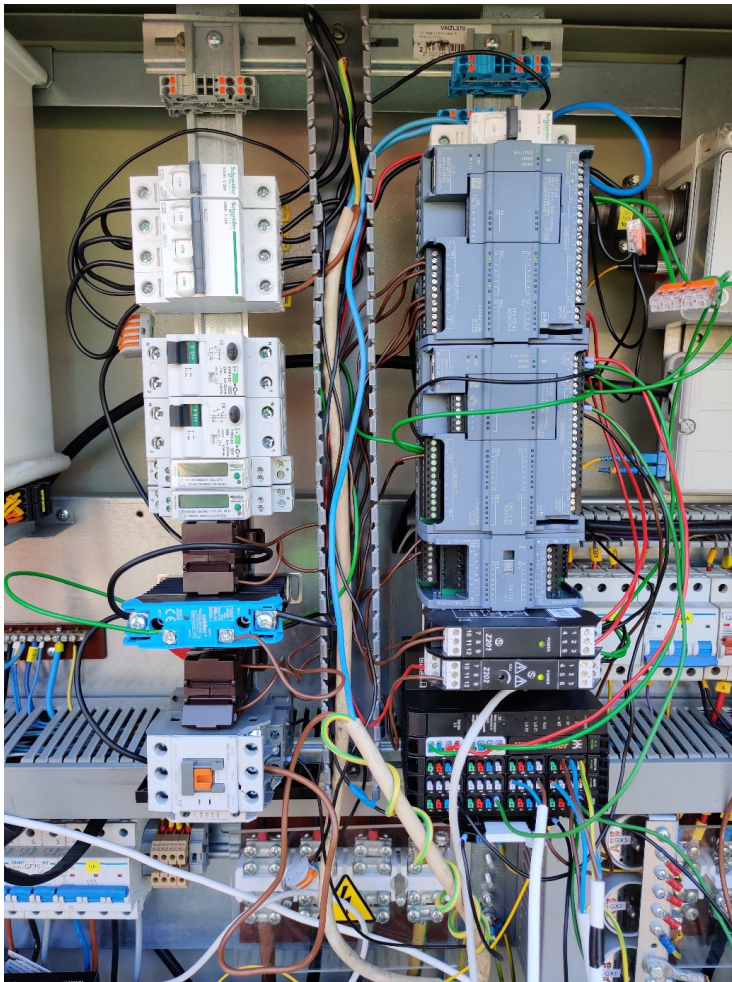




5.4. att. Piedāvātās PEAVS attālinātās vadības un kontroles pieslēguma shēma (2)

Sakari ar vadības kontrolleri tika nodrošināti izmantojot optisko sakaru kanālu. Kā var redzēt 5.4. att. no stacijas dežurantes pults optiskās šķiedras sakaru kabelis ienāk optiskā kastē, kur, ar slēgmauklas palīdzību, tika pieslēgts optiskais komutators. Tālāk, ar Ethernet kabeļa palīdzību optiskais komutators tika saslēgts kopā ar vadības kontrolleri. Datu pārraide notika izmantojot TCP/IP protokolu.

Piedāvātā PEAVS, kas ir uzstādīta objekta ir parādīta 5.5. att.



5.5. att. Piedāvātā PEAVS objektā.

Piedāvātā PEAVS ir ierīču komplekss, kurā ietilpst automātslēdzī, elektriskās enerģijas patēriņa uzskaites ierīces, strāvas mērtransformatori, magnētiskais kontaktors, pusvadītāju relejs, Siemens 1214 kontrolleri (AC/DC/Rly un DC/DC/DC) un paplašinājuma bloks, ierīces sprieguma mērīšanai un Weidmueller kontrolleris (UC20-SL2000-OLC-EC) un paplašinājuma bloki (UR20-4DO-P, UR20-4AI-RTD, UR20-4AI-UI-12) informācijas saņemšanai no meteostacijas.

Visu eksperimentu gaitā tika izmantota meteostacija Lufft WS600-UMB (5.6. att.). Meteostacijas galvenais uzdevums bija precīzu datu par laika apstākļiem nosūtīšana uz vadības kontrolleri reāla laika režīmā. Tālāk vadības kontrolleris veica apsildes jaudas regulēšanu, balstoties uz meteostacijas datiem, ņemot vērā nokrišņu intensitātes un apkārtējās vides temperatūras mijiedarbību un sliekšņa temperatūras nepārtrauktu monitoringu. Meteostacija tika uzstādīta uz balsta aptuveni 4 m augstumā no sliekšņa galviņas līmeņa pie pārmijas, kas tika izvēlēta eksperimentu izpildei.



5.6. att. Piedāvātās *PEAVS* meteostacija objektā

Ekspperimentu laikā meteostacija uzrādīja precīzus rādījumus par ārgaisa temperatūru, vēja stiprumu un nokrišņu tipu un intensitāti.

## 5.2. Eksperimenta apraksts

Pirms ziemas sezonas iestāšanās, autors, kopā ar promocijas darba vadītāju un “LDz” pārstāvjiem, veica sagatavošanās darbus eksperimenta norisei. Tika uzstādītas un pieslēgtas meteostacija, eksperimentālā *PEAVS* pārmiju apsildes iekārtu skapī, datu pārraides iekārtas gan skapī, gan *MPC* centralizācijas postenī. Tālāk visas iekārtas tika ieslēgtas *PEAVS* vadības kontrollerī un notika sakaru testēšana ar pieslēgtajām iekārtām. Lai pārbaudītu visas *PEAVS* darbību, tika veikta tās ieslēgšana un darbības pārbaude tukšgaitā (statiskā testēšana). Tātad, pēc visu atsevišķo iekārtu darbības pārbaudes, tika ieslēgta visa *PEAVS* un spriegums tika padots uz sildelementiem uz sliedēm. Lai arī sniega vēl nebija, bija nepieciešams notestēt visas sistēmas darbību. Pēc sprieguma padošanas, pastāvīgi tika veikta sprieguma un strāvas

mērījumu nolasišana, kā arī temperatūras mērīšana uz sildelementa un sliedes. Pēc visu mērījumu veikšanas un kopējās *PEAVS* pārbaudes, tukšgaitas tests tika pabeigts.

Eksperimenta gaitā bija plānots veikt vairākas pārbaudes.

1. *PEAVS* darbības pārbaude. *PEAVS* ieslēdzās, kad stacijas operators ieslēdz apsildi centralizēti vai tad, kad laika apstākļu kombinācija ir atbilstoša pārmiju apsildes ieslēgšanai un vadības algoritms ieslēdz *PEAVS* automātiski.
2. Vai pārmija ir attīrīta no ledus un sniega.
3. Eksperimentālās *PEAVS* elektroenerģijas patēriņa kontrole.
4. Eksperimentālās *PEAVS* elektroenerģijas patēriņa salīdzinājums ar analogisku jau ekspluatējamu *PEAS*.
5. Eksperimentālās *PEAVS* datu logēšana.
6. Eksperimentāli iegūtu datu salīdzinājums ar teorētiski aprēķinātiem

Tāpat tika izvirzīts uzdevums pārliecināties par eksperimentālās *PEAVS* darb gatavību un darbības kvalitāti sekojošos veidos:

1. *PEAVS* darb gatavība 90% no visiem ieslēgšanas gadījumiem.
2. Atteicu skaits nepārsniedz 10% no visiem ieslēgšanas notikumiem.
3. Pārmijas attīrīšana no sniega un ledus.
4. Eksperimentālās *PEAVS* elektroenerģijas patēriņš ir zemāks nekā analogiskās *PEAS* elektroenerģijas patēriņš, gan vienā no darba seansiem, gan visā ziemas sezonā kopumā.

Lai salīdzinātu eksperimentālās *PEAVS* elektroenerģijas patēriņu ar analogisku *PEAS* uz katras sistēmas izolējošā transformatora spailēm tika uzstādīti elektroenerģijas patēriņa uzskaites ierīces, kas mērīja patērēto aktīvo jaudu un nosūtīja datus vadības kontrollerim reāla laika režīmā.

Ziemas sezonas laikā eksperimentu seansi notika sekojošā veidā. Pēc algoritma izpildes, notika *PEAVS* ieslēgšanās automātiskā režīmā, un tālāk pēc datiem no meteostacijas, sprieguma un strāvas un *IPM* atvēruma mērījumiem, kā arī sliedes temperatūras tika kontrolēta pārmijas apsildes vadības sistēmas darbība. Tāpat katrā ieslēgšanas reizē, darba autors vizuāli novēroja eksperimentālās *PEAVS* darbību uz pašas pārmijas. Tika veikts sliedes temperatūras monitorings ar termokameru, sniega un ledus attīrīšanas vizuālā apstiprināšana un kopējā sistēmas kontrole dabā.

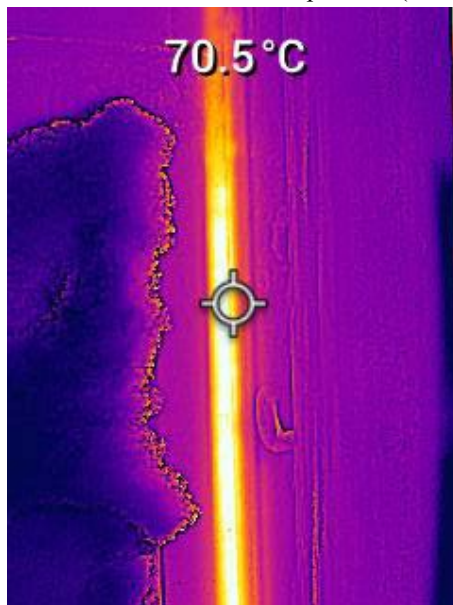
### 5.3. Eksperimenta norise

Eksperimenta uzdevums bija pārbaudīt dabā cik daudz jaudas nepieciešams pievadīt sildelementam un cik ilgi nepieciešams veikt pārmijas apsildi, lai garantēti izkausētu sniegu un netērētu elektroenerģiju, kad sniegs jau ir izkausēts.

Norise. Uzsākoties snigšanai, notika *PEAVS* algoritma ieslēgšanās un pārmiju apsilde tika uzsākta. Atkarībā no snigšanas intensitātes, *IPM* atvērums bija no 20 līdz 60% konkrētajā gadījumā. Reāla laika režīmā tika iegūti dati no meteostacijas un laika apstākļiem pasliktinoties (pastiprinājās snigšana, ārgaisa temperatūras pazemināšanās vai vēja ātruma palielināšanās) *IPM* atvērums palielinājās automātiski, tādējādi, padodot lielāku spriegumu uz sildelementu.

Eksperimenta gaitā ļoti svarīgi bija novērot sistēmas darbību dabā – kā notika sniega kausēšana. Kad pārmiju apsilde tika ieslēgta, notika sniega kausēšana. Apsildes jauda tika izvēlēta automātiski balstoties uz snigšanas intensitāti, ārgaisa temperatūru un vēja stiprumu. Parasti, sākoties snigšanai, kad tā bija mēreni intensīva, tika izvēlēts *IPM* atvērums 30–40 %

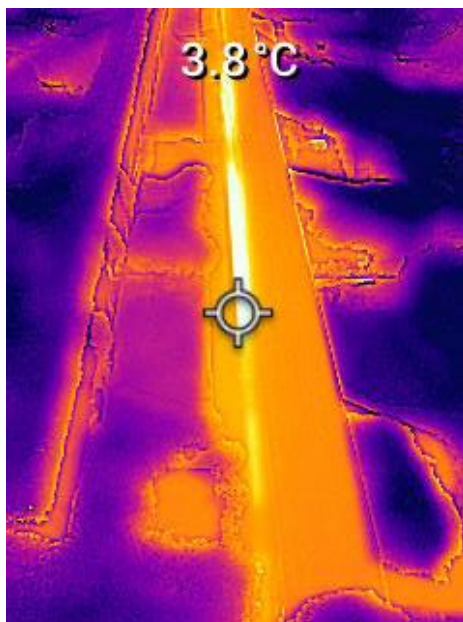
robežās. Tālāk uzsākoties sniega kušanai, notika *PEAVS* kontrole. Autoram esot objektā pie pārmijas, tika uzraudzīta *PEAVS* sistēmas darbība gan uz vietas, gan monitorējot log-failu datus. Ik pēc 10 minūtēm tika mērīta sildelementa un sliedes temperatūra un uzraudzīta sniega kušana no zonas starp pārmijas atbīdīto asmeni un rāmjsliedi. 5.7. attēlā redzams apsildes gaitā uzņemtais termoattēls, kurā ir redzama sildelementa temperatūra (70,5 °C) eksperimenta gaitā.



5.7. att. Sildelementa temperatūras mērījums uz pārmijas Nr. 9

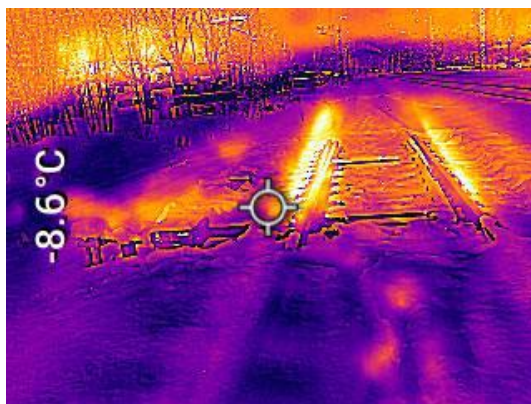
Tālāk tika veikti pārmijas rāmjsliedes, uz kuras bija piestiprināts sildelements, temperatūras mērījumi. Eksperimenta gaitā tika konstatēts, ka pati rāmjsliede neuzsilst līdz sildelementa temperatūrai (5.8. att.), t. i., sildelements neatdod visu savu siltumenerģiju sliedei. Tas ir saprotams, jo sildelements nav sliede un pastāv enerģijas zudumi, siltumenerģijai pārejot no viena elementa uz otru, ņemot vērā arī laika apstākļus, kas veicina enerģijas izkliedi. Savukārt eksperimenti ir parādījuši, ka nav nepieciešams uzturēt augstu sliedes temperatūru un pietiek vien ar dažiem grādiem, jo, kā tika noskaidrots eksperimenta gaitā, svarīgi ir izkausēt sniegu un ledu zonā starp pārmijas asmeni un rāmjsliedi. Tāpat ir svarīgi izkausēt sniegu un nepieļaut ledus veidošanos uz pārmijas pēdām – dzelzs platformām, pa kurām slīd asmens.

Kā var pārlicināties, apskatot 5.8. attēlu, eksperimentālās *PEAVS* darbības laikā zona starp pārmijas asmeni un rāmjsliedi tika atkausēta, tajā pat laikā sliedes kakla apakšējā daļā temperatūra ir 3,8 °C, kas ir vēlamais rezultāts – rāmjsliede netiek lieki uzkaršēta, un sniegs ir nokusis.



5.8. att. Rāmjsliedes apakšējās daļas temperatūras mērījums uz pārmijas Nr. 9

Eksperimenta pozitīva rezultāta apliecinājums ir kopējs termoattēls no pārmijas Nr. 9 zonas (5.9. att.), kur ir redzama apkārtējās vides temperatūra pie pārmiju elektropiedziņas (ārpus apsildāmās zonas). Tāpat var novērot salīdzinoši tumšu kopējo termoattēlu, kas liecina par zemu temperatūru termoattēla vietā.

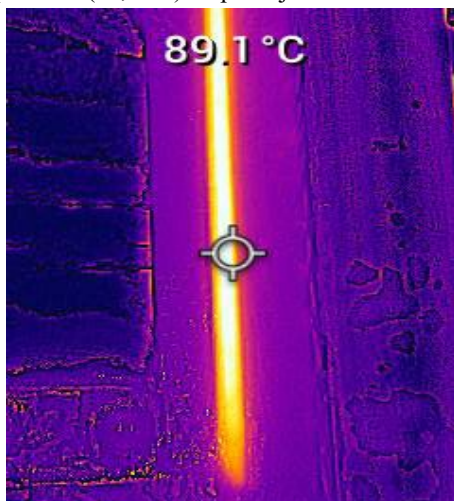


5.9. att. Kopējs pārmijas Nr. 9 rajona termoattēls.

Kā var redzēt 5.9. attēlā, vidējā temperatūra pārmijas Nr. 9 rajonā (ārpus apsildāmās zonas) ir  $-8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kas aptuveni atbilst ārējai temperatūrai novērošanas brīdī ( $-9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Eksperimenta gaitā kā atskaites punkts jeb atskaites objekts, ar kuru tika veikta eksperimentālās PEAVS salīdzināšana un kura mērījumi tika ņemti vērā, bija pārmija Nr. 7. Uz tās darbojās "LDz" analogiska ekspluatējamā PEAS ar savu vadības sistēmu. Temperatūras mērījumi tika veikti analogiski mērījumiem uz pārmijas Nr. 9 – ik pēc 10 minūtēm tika mērīta sildelementa un sliedes temperatūra un uzraudzīta sniega kušana no zonas starp pārmijas

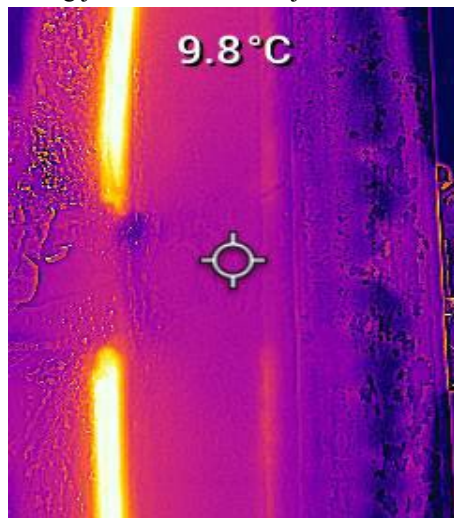
atbīdīto asmeni un rāmjsliedi. 5.10. attēlā redzams apsildes gaitā uzņemtais termoattēls, kurā ir redzama sildelementa temperatūra (89,1 °C) uz pārmijas Nr. 7.



5.10. att. Sildelementa temperatūras mērījums uz pārmijas Nr. 7.

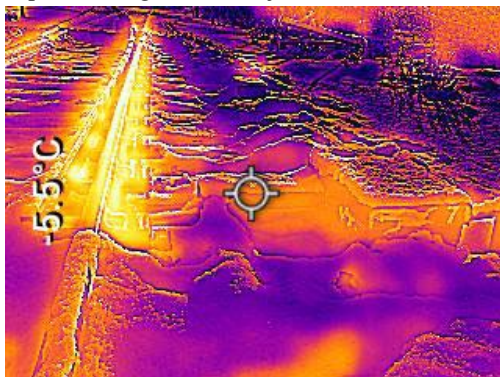
Salīdzinot iegūtos mērījumu rezultātus, tika novērots, ka, abām pārmijām saglabājot tīrību, esošā “LDz” PEAS uzsilda sildelementu līdz augstākai temperatūrai nekā eksperimentālā PEAVS. Lai arī šādā gadījumā, iespējams, tiek nodrošināta sniega ātrāka kušana, tas nozīmē, ka tiek patērēts krietni vairāk elektroenerģijas un esošā PEAS turpina darboties pat tad, kad sniegs jau ir nokausēts.

Tika veikti pārmijas Nr. 7 rāmjsliedes, uz kuras bija piestiprināts sildelements, temperatūras mērījumi. Eksperimenta gaitā tika konstatēts, ka pārmijas Nr. 7 rāmjsliede uzsilst līdz temperatūrai 9,8 °C (5.11. att.), kas ir krietni vairāk nekā pārmijas Nr. 9 rāmjsliedes temperatūra (3,8 °C). Zinot tērauda siltumietilpību un laika apstākļus eksperimenta laikā, var secināt, ka tika patērēts daudz liekas elektroenerģijas, lai uzsildītu rāmjsliedi līdz tik augstai temperatūrai.



5.11. att. Rāmjsliedes apakšējās daļas temperatūras mērījums uz pārmijas Nr. 9.

Eksperimenta rezultāta novērtējumam tika izveidots kopējs termoattēls no pārmijas Nr. 7 zonas (5.12. att.), kur ir parādīta apkārtējās vides temperatūra pie pārmiju elektropiedziņas vilktņiem (ārpus apsildāmās zonas). 5.12. attēlā var redzēt gaišāku kopējo termoattēlu, salīdzinot ar 5.9. att., kas liecina par augstu temperatūru termoattēla vietā. Arī temperatūru mērījumi liecina, ka pārmijas Nr. 7 zonā temperatūra ir  $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  salīdzinot ar  $-8,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  pie pārmijas Nr. 9, kas bija eksperimenta galvenais objekts.



5.12. att. Kopējs pārmijas Nr. 7 rajona termoattēls.

Eksperimenta norises laikā tika noskaidrots:

- eksperimentālā *PEAVS* pilda noteikto funkciju un nodrošina sniega un ledus kausēšanu uz pārmijas Nr. 9;
- eksperimentālā *PEAVS* izpilda noteikto funkciju ar zemāku elektroenerģijas patēriņu nekā esošā *PEAS* uz pārmija Nr. 7;
- eksperimentālā *PEAVS* uztur sliedes sildelementa un sliedes temperatūru noteiktā diapazonā, kad sniegs tika nokausēts (zona bija tīra), tajā pat laikā sildelementa temperatūra bija krietni zemāka nekā esošajā *PEAS* uz pārmijas Nr. 7;
- visā eksperimenta gaitā tika novērots, ka pārmijas Nr. 7 rajonā (esošā *PEAS*) ārējais temperatūra ir diezgan augsta, salīdzinot ar izmērīto temperatūru pārmijas Nr. 9 rajonā.

Eksperimenta secinājums – šobrīd ekspluatējamā *PEAS* uz pārmijas Nr. 7 ir neefektīva un lieki tērēja elektroenerģiju apsildot pārmiju līdz nevajadzīgi augstai temperatūrai, izkļiedējot visā pārmijas rajonā krietnu daudzumu siltumenerģijas. Turpretī, eksperimentālā *PEAVS* uz pārmijas Nr. 9 izpildīja uzdoto uzdevumu tikpat efektīvi ar zemāku elektroenerģijas patēriņu un ar minimāliem siltumenerģijas zudumiem apkārtējā vidē.

## 5.4. Eksperimenta rezultāti un to analīze

Izstrādātā *PEAVS* spēj veiksmīgi izpildīt pārmijas apsildes un attīrīšanas no sniega uzdevumus dažādos laika apstākļos, snigšanas intensitātes apstākļos un dažādos apkārtējā gaisa temperatūras režīmos.

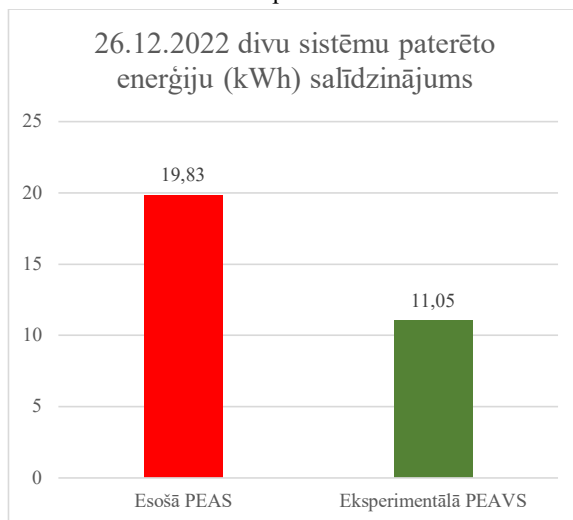
Apsildot ar tādu jaudas apjomu kāds pēc izstrādāta algoritma “domām” ir nepieciešams dotajos apstākļos, ļāva izvairīties no liekiem siltumenerģijas zudumiem, kad tiek sildīta apkārtējā vide, kā to pierādīja salīdzinājums ar “LDZ” esošu *PEAS*. Tajā pat laikā padotās enerģijas daudzums bija pietiekams sniega kausēšanai un pārmijas attīrīšanai no sniega.



Eksperimentālās un esošās *PEAVS* temperatūru starpība arī ir ievērojama. Sildelementu temperatūru starpība, izteikta procentos, veidoja 26,4 %, kas ir ievērojama starpība vienas *PEAS* un – vēl jo vairāk – visas stacijas ietvaros.

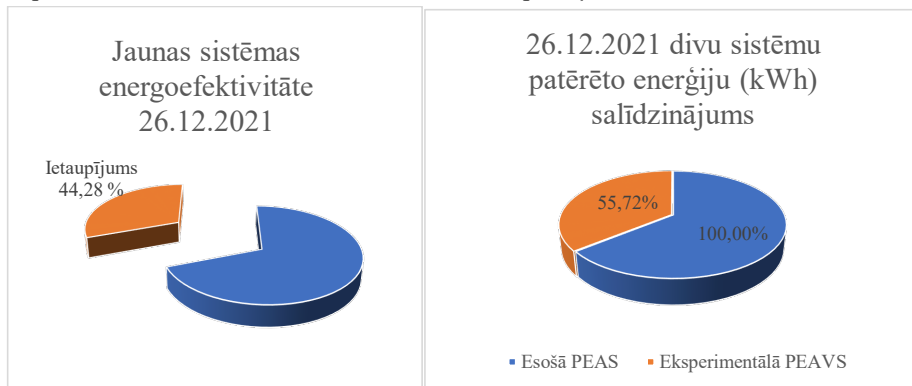
Tālāk sliežu temperatūru starpība. Uz pārmijas Nr. 9, kur tika uzstādīta eksperimentālā *PEAVS*, sliedes temperatūra bija 3,8 °C, savukārt uz pārmijas Nr. 7 ar esošu *PEAS* temperatūra bija 9,8 °C. Starpība bija 6 °C. Kā autors savā darbā minēja, efektīvas *PEAVS* galvenais uzdevums ir nokausēt sniegu zonā starp pārmijas asmeni un rāmjsliedi, savukārt otrs uzdevums ir uzturēt rāmjsliedes temperatūru noteiktā pozitīvā diapazonā un nepārkarsēt to.

Trešais eksperimenta rezultāts ir ārgaisa temperatūras starpība zonā pie pārmijas uz katras no salīdzināmajām pārmijām. –8,6 °C pret –5,5 °C. Šis salīdzinājums liecina par pārmijas zonas ārgaisa nevajadzīgu uzsildīšanu esošās *PEAS* apkārtņē.



5.13. att. Divu sistēmu patērēto elektroenerģiju salīdzinājums.

Uzskatāms un pārliecinošs piedāvātās *PEAVS* un esošās *PEAS* salīdzinājums redzams 5.13. attēlā, kad 26.12.2021. eksperimenta laikā (visas dienas laikā) bija ieslēgtas abas sistēmas. Piedāvātā sistēma patērēja 11,05 kWh, savukārt esošā *PEAS* – 19,83 kWh (5.13. att.). Elektroenerģijas ietaupījums veidoja pārliecinošus 44,28 % (5.14. att.). Grafiki pārliecinoši parāda piedāvātās *PEAVS* sistēmas efektivitāti reālos apstākļos.



5.14. att. Elektroenerģijas ietaupījumu un patēriņa grafiks

## SECINĀJUMI UN DARBA GALVENIE REZULTĀTI

1. Izpētītas Latvijā, Eiropā un pasaulē izmantotās pārmiju attīrīšanas sistēmas, aprakstītas un analizētas pielietojamo sistēmu priekšrocības un trūkumi. Konstatēts, ka visām elektriskās *PEAS* piemīt būtisks trūkums – tiek nevajadzīgi ilgi sildītas sliedes, tāpēc veidojas ļoti būtiski siltuma zudumi. Secināts, ka ir nepieciešams izstrādāt *PEAVS* ar multisensoru un faziloģikas vadības integrāciju, jo šobrīd “LDz” ekspluatējamām sistēmām vadība tiek izpildīta ar datiem no viena sensora (sliedes temperatūras sensors). Praktisko eksperimentu gaitā tika pierādīta piedāvātā risinājuma efektivitāte, salīdzinot ar šobrīd “LDz” ekspluatējamām *PEAVS*.

2. Identificēti un verificēti galvenie pārmiju apsildi ietekmējošie ārējie faktori, un tas cik lielā mērā tie ietekmē pārmiju apsildi. Ar regresijas izteiksmju palīdzību aprēķināti ietekmes faktoru koeficienti un ietekmes faktoru normalizētās vērtības. Noskaidrotas pārmiju apsildes jaudas atkarības no katra ietekmes faktora un secināts, ka vislielāko ietekmi sastāda tieši apkārtējās vides temperatūra, kurai seko sniega nokrišņu intensitāte. Neefektīvas pārmiju apsildes problēmas formulēšanas laikā tika noteikts, ka šobrīd “LDz” tiek ekspluatētas esošas *PEAS*, kuras darbojas pēc vienkārša iesēgts/izslēgts principa vai pēc vadības ar vienu sensoru (vadība pēc viena ietekmes faktora), līdz ar to šajās sistēmās apsildes jauda netiek regulēta vai arī regulēta nepietiekamā līmenī.

3. Veikta vadības sistēmas vispārēja definēšana, pētītas atgriezeniskās saites un to funkcijas. Veikts pārmiju apsildes vadības sistēmu salīdzinājums, galveno uzdevumu un metožu analīze. Izpildīta termālā stāvokļa regulēšanas modelēšana ar dažādiem paņēmieniem – tiešā regulēšana, regulēšana ar atgriezenisko saiti, pēc regresijas vienādojumu rezultātiem. Notika minēto paņēmieni modelēšana PSIM vidē, rezultātu apkopošana un analīze. Secināts, ka regresijas metode ir salīdzinoši laba, taču pilnībā neapmierina efektīvas pārmiju apsildes prasības, tāpēc turpmākajam darbam, modelēšanai un praktiskam eksperimentam tika attīstīts izstrādātais modelis un tajā integrēta faziloģika. Tika izvēlēta tieši faziloģika, jo tās komandas bija ērti pārveidot  $C$  valodā un iestrādāt *PLK* vadības algoritmā. Rezultātā izstrādāta eksperimentāla dzelzceļa pārmiju apsildes sistēma ar intelektuālās vadības algoritmu, kurā tika integrēts faziloģikas algoritms

4. Aprakstīts faziloģikas pielietojums vadības algoritmā. Aprakstīta faziloģikas pielietošana elektrotehnoloģiju datorvadībā un vadības sistēmās. Izpildīta *Fazi-PI* un *fazi-PID* regulatoru analīze, un to pielietojamība *PEAVS*. Aprakstīta *PEAVS* faziloģikas modeļa konstruēšana gaita, veikta pati konstruēšana un modeļa modelēšana *MatLAB* vidē. Izpildīta *Fazi-PI* un *fazi-PID* regulatoru analīze un to pielietojamība *PEAVS*. Secināts, ka faziloģikas komandu pielietošana algoritma sintēzē dod visprecīzāko rezultātu attiecībā uz apsildes pamata ietekmes parametra izvēli un tā izvēršanos par primāro parametru vadības algoritma izstrādē. Šo secinājumu apstiprina izpildītā modelēšana *MatLAB* un *SIEMENS Fuzzy Logic “FuzzyControl++”* programmatūrās.

5. Formulētas prasības pārmiju apsildes vadības sistēmai un noteiktas pārmiju elektriskās apsildes vadības sistēmas funkcionālās iespējas. Izvēlētas ierīces un tehnoloģijas efektīvai pārmiju apsildei. Veikts eksperimentālās un izstrādātās *PEAVS* un galveno konkurentu salīdzinājums un dažādu *PEAS* vadības algoritmu trūkumu analīze. Izstrādāts efektīvas pārmiju apsildes un laika apstākļu monitoringa darbības algoritms. Metodoloģija tika īstenota atbilstoši vadības algoritmam, kas ietver automātisku laika apstākļu novērošanu, automātisku pārmijas

apsildes ieslēgšanos, iestājoties nelabvēlīgu laika apstākļu sliekšņa lielumam. 4. nodaļas beigās aprakstīti izstrādātās *PEAVS* galvenie uzdevumi un veikta *PEAS* ierīču un tehnoloģijas izstrāde.

6. Izstrādāta eksperimentālā *PEAVS*, kas ir aprīkota ar meteostaciju, kas spēj noteikt laikapstākļus, ārgaisa temperatūru un vēja ātrumu un darbības datu jeb parametru logēšanu reāllaikā. Izstrādātais *PEAVS* sastāv no centrālā vadības kontrollera, kas ir savienots ar sekundāro kontrolleri, kurā ienāk informācija no meteostācijas un sliedes temperatūras devēja. Aprakstīta eksperimentālā *PEAVS*, tās darbības shēmas un sniegts galveno ierīču apraksts. Izstrādāts *PEAVS* vadības algoritms ar datu pārraidi no meteostācijas reāllaika režīmā. Algoritms, kurā ir integrēti faziloģikas paņēmieni realizē apsildes jaudas izvēli, sastāv no programmas koda un atrod optimālo lielumu, ko padot izejā. Aprakstīts praktiskais eksperiments, tā norise un sasniegtie rezultāti.

7. Viens no eksperimenta rezultātiem ir ārgaisa temperatūras starpība zonā pie pārmijas uz katras no salīdzinātajām pārmijām.  $-8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  pret  $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Starpība veidoja 56,4 %. Šis salīdzinājums liecina par pārmijas zonas ārgaisa nevajadzīgu uzsildīšanu esošās apsildes sistēmas apkārtnē.

8. Veikti praktiski eksperimenti objektā uz "LDz" ekspluatējamās pārmijas vairākas ziemas sezonās, eksperimentālā *PEAVS* testēta dažādos iespējamajos laika apstākļos un darbības režīmos. Analizējot eksperimentu rezultātus tika secināts, ka eksperimentālā *PEAVS* pilda savus uzdevumus un lieki nepārkarsē rāmjsliedi.

9. Eksperimenta laikā sildelementu temperatūru starpība veidoja 26,4 %, kas ir ievērojams rezultāts vienas *PEAS* un, vēl jo vairāk, visas stacijas ietvaros. Eksperimenta laikā tika novērota arī ievērojama sliežu temperatūru starpība. Uz pārmijas Nr. 9, kur tika uzstādīta eksperimentālā *PEAVS*, sliedes temperatūra sastādīja  $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , bet uz pārmijas Nr. 7 ar esošu *PEAS* temperatūra bija  $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Starpība izteikta procentos ir 157,9 %. Kā jau darbā aprakstīts, efektīvas *PEAVS* galvenais uzdevums ir nokausēt sniegu zonā starp pārmijas asmeni un rāmjsliedi, savukārt otrs uzdevums – nevajadzīgi nepārkarsēt rāmjsliedi. Rezultātā eksperimentālā *PEAVS* algoritma darbība uzsildīja sliedi līdz pietiekamai temperatūrai, nepārkarsējot rāmjsliedi.

10. Veikta eksperimenta laikā iegūto rezultātu salīdzināšana ar analogisku "LDz" pārmiju, kas ir aprīkota ar esošu *PEAS* un darbojas vienlaikus ar eksperimentālo *PEAVS*. Rezultātu salīdzināšanas laikā tika konstatēts, ka eksperimentālai *PEAVS* ir mazāki siltumenerģijas zudumi jeb mazāk jaudas tiek tērēts nevajadzīgai apkārtējās vides apsildei, tajā pat laikā gūstot vienādus pārmijas attīrīšanu no sniega. Aprēķināta arī eksperimentālās *PEAVS* ekonomiskā efektivitāte, kas veidoja 44,28 %, jeb patērētie 11,05 kWh pret 19,83 kWh esošai *PEAS* vienas dienas laikā. Var secināt, tad praktisko eksperimentu laikā eksperimentālā *PEAVS* pierādīja savu energoefektivitāti.

11. Eksperimenta secinājums – šobrīd ekspluatējamā *PEAS* uz pārmijas Nr. 7 ir neefektīva un lieki tērē elektroenerģiju, apsildot pārmiju līdz nevajadzīgi augstai temperatūrai, visā pārmijas rajonā izkļiedējot krietnu daudzumu siltumenerģijas. Turpretī eksperimentālā *PEAVS* uz pārmijas Nr. 9 noteikto uzdevumu veica tikpat efektīvi ar zemāku elektroenerģijas patēriņu un minimāliem siltumenerģijas zudumiem apkārtējā vidē.

# AVOTU UN IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] I. C. C. D. J. Pagand, *Fostering Rail Through Green Deal*, 2020.
- [2] P. Dolgoplov, D. Konstantinov, L. Rybalchenko, and R. Muhitovs, Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms, in *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 149. doi: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
- [3] M. Meztitis, R. Muhitovs, M. Arpabekov, Z. Sansyzbajeva, B. Togizbayeva, and A. Assiltayev, Optimization of Transport Logistical Flows Between Railway and Urban Passenger Transportation Systems, 2020, pp. 28–34. doi: 10.1007/978-3-030-39688-6\_5.
- [4] Ягудин Р.Ш., *Надёжность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики*. Москва: Транспорт, 1989.
- [5] Сапожников Вл.В., Шаманов В.И., Сапожников В.В., *Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи*. Москва: Транспорт, 2003.
- [6] R. Muhitovs, M. Meztitis, and J. Freimane, Intelligent Railway Point Electric Heating Control System, 2019. doi: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982345.
- [7] M. Gržibovskis, *SCB Lauku iekārtu uzbūve un tehniskās apkopes principi. Mācību līdzeklis*. Rīga, 2009.
- [8] J. Smirnovs, P. Balckars, D. Sergejevs, T. Altbergs, and V. Greckis, *Dzelzceļi. Vispārīgais kurss*. 1996.
- [9] BS EN 50128:2011+A2:2020 Railway applications. Communication, signalling and processing systems. Software for railway control and protection systems - European Standards. <https://www.en-standard.eu/bs-en-50128-2011-a2-2020-railway-applications-communication-signalling-and-processing-systems-software-for-railway-control-and-protection-systems/> (accessed Sep. 10, 2022).
- [10] К. В. Ф. Бараусов Виктор Александрович, Устройство электрообогрева стрелочных переводов типа СЭИТ-04, RU 2 582 627 C1, 2015
- [11] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. doi: 10.1007/3-540-30368-5.
- [12] Дианов В.Н., *Диагностика и надёжность автоматических систем. Учебное пособие*. Москва: МГИУ, 2005.
- [13] M. Dell'orco, M. Ottomanelli, P. Pace, and G. Pascoschi, INTELLIGENT DECISION SUPPORT TOOLS FOR OPTIMAL PLANNING OF RAIL TRACK MAINTENANCE.
- [14] A. Tatarinov, V. Nikulenkov, P. Kikusts, and A. Kochubey, Intelligent system for electrical heating control based on optical precipitation sensor, *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 525–530, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.066.
- [15] Compact Weather Sensors - WS600-UMB Smart Weather Sensor. <https://www.lufft.com/products/compact-weather-sensors-293/ws600-umb-smart-weather-sensor-1832/> (accessed Sep. 10, 2022).

- [16] P. Norrbin, J. Lin, and A. Parida, Energy efficiency optimization for railway switches & crossings: a case study in Sweden, 11th World Congress on Railway Research (WCRR), 2016.
- [17] Оборудование для очистки от снега и льда железных дорог Северной Америки, *Железные дороги мира* — 2010, № 9, pp. 70–76, 2010.
- [18] Обогрев стрелочных переводов на железных дорогах Германии, *Железные дороги мира* — 2011, No 2, pp. 75–78, 2011.
- [19] О. Ю. К. Д. В. ЕРМОЛЕНКО, Перспективы использования индукционного обогрева стрелочных переводов, *Вестник ВНИИЖТ* 5/2012, pp. 32–35, 2012.
- [20] Innovative Railway Switch Heating, Vasteras, 2021.
- [21] Система tripleS для обогрева стрелочных переводов, *Железные дороги мира* — 2011, No 4, pp. 69–82, 2011.
- [22] Т. Н. С. П. А. В. Науменко Сергей Николаевич, Устройство для обогрева стрелочного перевода, RU 2 499 861 C1, 2012
- [23] Дубинин Анатолий Сергеевич, Устройство для обогрева стрелочного перевода, RU2 470 108C2, 2009
- [24] Новая система электрообогрева стрелочных переводов, *Автоматика, связь, информатика*, 10-2011, pp. 27–29, 2011.
- [25] van Marlen Hans, INSV point heating concept for Kurtna Station for the Ten T network in the Baltic States, 2021.
- [26] Electrical point heating systems for extreme environmental conditions, 2015.
- [27] B. A. Palsson, Optimisation of Railway Switches and Crossings, Chalmers University of Technology, Goteborg, 2014.
- [28] P. Gavrilovs and A. Dmitrijevs, Research in Passenger Car Bogie Central Suspension Roller and Rod Base Metal and Welded Metal Structure, *15th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings. Vol.15*, vol. 15, pp. 618–623, 2016.
- [29] D. Sergejevs, A. Tipainis, and P. Gavrilovs, Restoration of Railway Turnout Elements with Manual Metal Arc Welding and Flux-Cored Arc Welding, *Procedia Eng*, vol. 134, pp. 353–358, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.019.
- [30] R. Muhitovs, M. Mezitis, J. Freimane, and I. Korago, Development of the decision-making algorithm for railway maneuverer park equipment with independent controllers, in *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 149. doi: 10.1016/j.procs.2019.01.124.
- [31] J. Freimane, M. Mezitis, and F. Mihailovs, Maneuver Movements’ Safety Increase Using Maneuver Locomotive Identification and Distance Control, *Procedia Comput Sci*, vol. 104, pp. 375–379, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.01.148.
- [32] O. Podsoonnaja, M. Mezītis, *Vilcienu kustības intervālu regulēšanas sistēmas (releju). Mācību līdzeklis*. Rīga: RTU, 2007.

- [33] R. Muhitovs, M. Meztis, and I. Korago, Development of the railway point electric heating intellectual control algorithm, *Transport Problems*, vol. 15, no. 1, 2020, doi: 10.21307/TP-2020-007.
- [34] M. Meztis, G. Strautmanis, A. Baranovskis, and R. Muhitovs, *Environment Safety Improving Due to Railway Noise Management Decreasing of RMR Method Adaptation*, vol. 124. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-42323-0\_9.
- [35] A. Žiravecka, I. Raņķis, *Industriālās elektronikas pamati*. Rīga, 2007.
- [36] J. Greivulis, *Iekārta vadības elektroniskie elementi un mezgli*. Rīga: Avots, 2005.
- [37] Сапожников Вл.В., Шаманов В.И., Сапожников В.В., *Основы технической диагностики*. Москва: Транспорт, 2004.
- [38] Pārmiņa (asmeņu daļa) — Vikipēdija.  
[https://lv.wikipedia.org/wiki/P%C4%81rmija\\_\(asme%C5%86u\\_da%C4%BCa\)#/media/Att%C4%93ls:Vienkarsas\\_parm\\_parv\\_uzb.jpg](https://lv.wikipedia.org/wiki/P%C4%81rmija_(asme%C5%86u_da%C4%BCa)#/media/Att%C4%93ls:Vienkarsas_parm_parv_uzb.jpg) (accessed Sep. 10, 2022).
- [39] M. Meztis and A. Vasiljevs, Feasibility of IIoT Application in Railway Signalling and Interlocking Systems, *Transport Means 2019: Sustainability: Research and Solutions: Proceedings of the 23rd International Scientific Conference. Part 1*, pp. 169–175, 2019.
- [40] R. Muhitovs, M. Meztis, A. Spunitis, and V. Iriskovs, Analysis of Experimental Railway Point Electric Heating System, 2021. doi: 10.1109/AIEEE51419.2021.9435805.
- [41] R. Muhitovs, M. Meztis, A. Baranovskis, and A. Spunitis, Modelling point electric heating algorithm using Fuzzy Logic, 2021. doi: 10.1109/ICECCME52200.2021.9590940.
- [42] J. Dirba, K. Ketners, N. Levins, and V. Pugačevs, Transporta elektriskās mašīnas, p. 344, 2002.
- [43] J. Dirba and K. Ketners, Elektriskās mašīnas, p. 534, 2009.
- [44] M. A. Gerhards J., *Elektroapgādes sistēmu optimizācija. Mācību grāmata*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2007.
- [45] Дмитриенко И. Е., *Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики*. Москва: Транспорт, 1986.
- [46] F. Camci and R. B. Chinnam, *Process monitoring, diagnostics and prognostics in machining processes : condition based maintenance : manage failures by monitoring, detecting & forecasting*. 2010.
- [47] L. Ren, N. Wang, W. Pang, Y. Li, and G. Zhang, Modeling and monitoring the material removal rate of abrasive belt grinding based on vision measurement and the gene expression programming (GEP) algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 1–2, pp. 385–401, May 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08822-z.
- [48] Munakata Toshinori, *Fundamentals of the New Artificial Intelligence*. London: Springer London, 2007. doi: 10.1007/978-1-84628-839-5.

- [49] Luger G. F., *Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving*. Williams, 2003.
- [50] S. Russel and P. Norvig, *Artificial intelligence—a modern approach* 3rd Edition, *Knowl Eng Rev*, 2012, doi: 10.1017/S0269888900007724.
- [51] M. N. (Marcian N.) Cirstea, *Neural and fuzzy logic control of drives and power systems*, p. 399, 2002.
- [52] Amit. Konar, *Artificial intelligence and soft computing: behavioral and cognitive modeling of the human brain*, p. 786, 2000.
- [53] G. J. Klir and B. Yuan, *Fuzzy sets and fuzzy logic - theory and applications*, 1995.
- [54] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Wiley, 2010. doi: 10.1002/9781119994374.
- [55] Батыршин И.З., *Основные операции нечёткой логики и их обобщения*. Казань: Отечество, 2001.
- [56] William. Siler and J. J. Buckley, *Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning*, p. 405, 2005, Accessed: Sep. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Fuzzy+Expert+Systems+and+Fuzzy+Reasoning-p-9780471698494>
- [57] L. Novickis and A. Jurenoks, *Intelligent heating system temperature control method using fuzzy logic*, in *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Oct. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/RTUCON.2017.8124809.
- [58] A. Bogdanovs, O. Krievs, L. Ribickis, and J. Pforr, *Fuzzy Logic Current Balancing Controller Implementation in an Automotive Multi-Phase DC Converter with Coupled Inductors*, in *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Nov. 2020, pp. 1–10. doi: 10.1109/RTUCON51174.2020.9316473.
- [59] Dorokhov Oleksandr and Dorokhova Ludmila, *Fuzzy model in fuzzy-tech environment for the evaluation of transportation’s quality for cargo enterprises in Ukraine*. [https://www.researchgate.net/publication/293000235\\_Fuzzy\\_model\\_in\\_fuzzy-tech\\_environment\\_for\\_the\\_evaluation\\_of\\_transportation’s\\_quality\\_for\\_cargo\\_enterprises\\_in\\_ukraine](https://www.researchgate.net/publication/293000235_Fuzzy_model_in_fuzzy-tech_environment_for_the_evaluation_of_transportation’s_quality_for_cargo_enterprises_in_ukraine) (accessed Sep. 10, 2022).
- [60] S. H. Andrade, E. da Luz Oliveira, R. Alfaia, A. Souto, C. R. L. Frances, and N. L. Vijaykumar, *Adopting fuzzy technique to save energy in smart home control systems*, in *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Oct. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/RTUCON.2017.8124795.
- [61] V. Barhate, K. L. Thakre, and M. Deshmukh, *Adaptable differential relay using fuzzy logic code in digital signal controller for transformer protection*, in *2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Oct. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/RTUCON.2016.7763097.
- [62] M. Najafzadeh, O. Husev, I. Roasto, and T. Jalakas, *Improved DC-Link Voltage Transient Response and Stability Issues in Energy Router with Fuzzy Logic Control Method*, in *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and*

- Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Nov. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/RTUCON51174.2020.9316477.
- [63] S. Chakravarty, H. Demirhan, and F. Baser, Modified fuzzy regression functions with a noise cluster against outlier contamination, *Expert Syst Appl*, vol. 205, p. 117717, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.117717.
- [64] S. A. Dmitriev, V. Z. Manusov, and J. S. Ahyoev, Diagnosing of the current technical condition of electric equipment on the basis of expert models with fuzzy logic, in *2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Oct. 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/RTUCON.2016.7763126.
- [65] J. Ji, Y. Bie, Z. Zeng, and L. Wang, Trip energy consumption estimation for electric buses, *Communications in Transportation Research*, vol. 2, p. 100069, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.commtr.2022.100069.
- [66] A. Kargin, A. Panchenko, O. Ivaniuk, and R. Muhitovs, Motion Control of Smart Autonomous Mobile System Based on the Perception Model, 2020, pp. 145–153. doi: 10.1007/978-3-030-39688-6\_20.
- [67] J. C. Giarratano and G. Riley, *Expert Systems: Principles and Programming*. Thomson Course Technology, 2005. [Online]. Available: <https://books.google.lv/books?id=SbgZRAAACAAJ>
- [68] H.M. Feng, A self-tuning fuzzy control system design, 2001, vol.1, pp. 209-214, IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference.
- [69] S. Alamdari, M. Hossein Basiri, A. Mousavi, and A. Soofastaei, Application of Machine Learning Techniques to Predict Haul Truck Fuel Consumption in Open-Pit Mines, *Journal of Mining and Environment*, vol. 13, no. 1, pp. 69–85, Jan. 2022, doi: 10.22044/JME.2022.11577.2145.
- [70] S. A. Dmitriev, E. L. Kokorin, A. v. Volobuev, and A. A. Korelina, The object-oriented model of the electrical equipment failures risks assessment, in *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Oct. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/RTUCON.2017.8124790.
- [71] E. Ginters, M. Mezitis, and D. Aizstrauta, Sustainability Simulation and Assessment of Bicycle Network Design and Maintenance Environment, in *2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC)*, Dec. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICONIC.2018.8601225.
- [72] G. Strautmanis, M. Mezitis, and V. Strautmane, Model of a vertical rotor with a ball-type automatic balancer, *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 8, pp. 57–62, Oct. 2016, Accessed: Sep. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.extrica.com/article/17598>
- [73] M. Mezitis, V. Panchenko, M. Kutsenko, and A. Maslii, Mathematical model for defining rational constructional technological parameters of marshalling equipment used during gravitational target braking of retarders, *Procedia Comput Sci*, vol. 149, pp. 288–296, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.01.137.
- [74] V. Yatsun *et al.*, Searching for the twofrequency motion modes of a threemass vibratory machine with a vibration exciter in the form of a passive autobalancer,

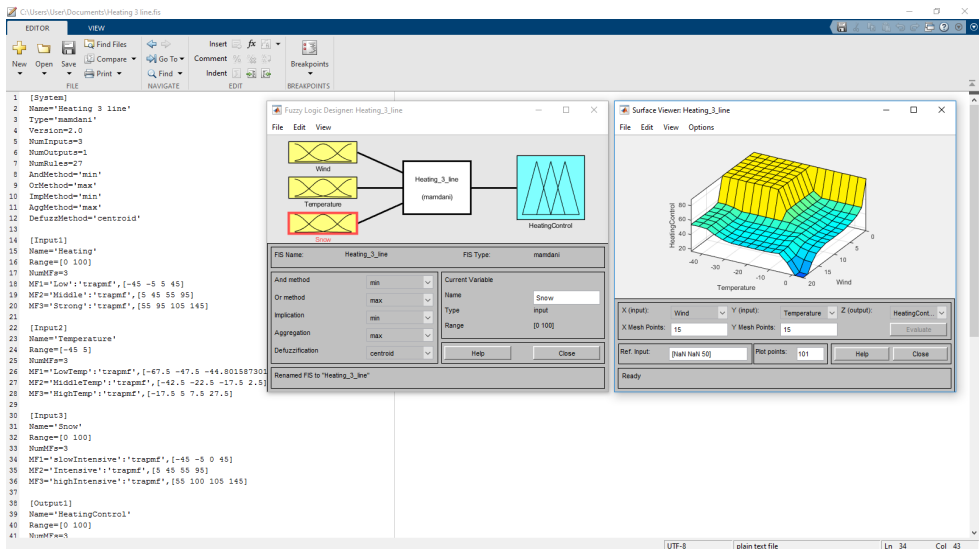
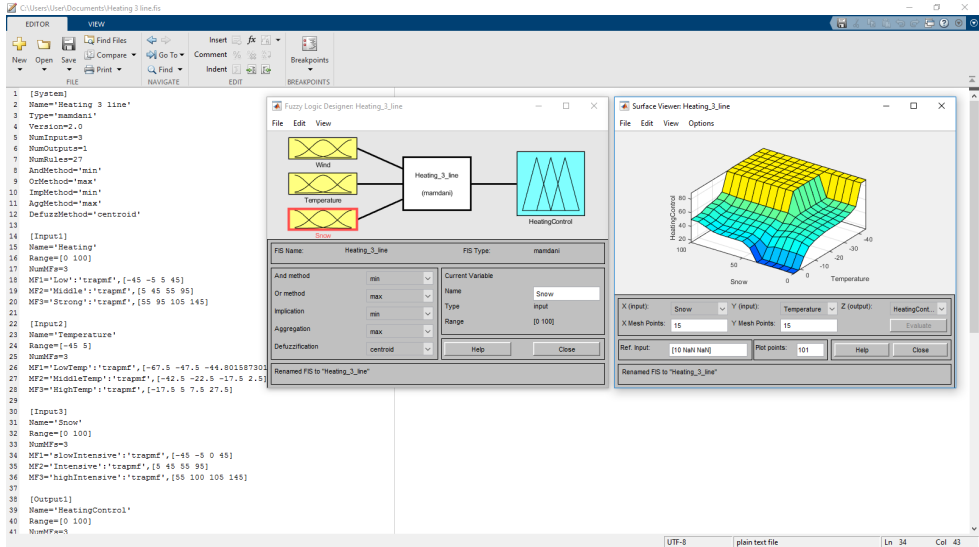


*Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 7 (106), pp. 103–111, Aug. 2020, doi: 10.15587/1729-4061.2020.209269.

- [75] J. Chen, H. Liu, C. Chen, and Z. Duan, Wind speed forecasting using multi-scale feature adaptive extraction ensemble model with error regression correction, *Expert Syst Appl*, vol. 207, p. 117358, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.117358.
- [76] F. S. V. Campos, F. A. Assis, A. M. Leite da Silva, A. J. C. Coelho, R. A. R. Moura, and M. A. O. Schroeder, Reliability evaluation of composite generation and transmission systems via binary logistic regression and parallel processing, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 142, p. 108380, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108380.
- [77] Y. Zhou, A regression learner-based approach for battery cycling ageing prediction—advances in energy management strategy and techno-economic analysis, *Energy*, vol. 256, p. 124668, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124668.

## **PIELIKUMI**

Eksperimentālās PEAVS algoritma realizācija MatLAB vidē



EDITOR view

1 [System]  
 2 Name="Heating\_3\_line"  
 3 Type="mamdani"  
 4 Version=2.0  
 5 NumInputs=3  
 6 NumOutputs=1  
 7 NumRules=27  
 8 AndMethod="min"  
 9 OrMethod="max"  
 10 ImpMethod="min"  
 11 AggMethod="max"  
 12 DefuzzMethod="centroid"  
 13  
 14 [Input1]  
 15 Name="Heating"  
 16 Range=[0 100]  
 17 NumMFs=3  
 18 MF1="Low"::'trapez', [-45 -5 5 45]  
 19 MF2="Middle"::'trapez', [5 45 55 95]  
 20 MF3="Strong"::'trapez', [55 95 105 145]  
 21  
 22 [Input2]  
 23 Name="Temperature"  
 24 Range=[-15 5]  
 25 NumMFs=3  
 26 MF1="LowTemp"::'trapez', [-67.5 -47.5 -44.80168700  
 27 MF2="MiddleTemp"::'trapez', [-42.5 -22.5 -17.5 2.5]  
 28 MF3="HighTemp"::'trapez', [-17.5 5 7.5 27.5]  
 29  
 30 [Input3]  
 31 Name="Snow"  
 32 Range=[0 100]  
 33 NumMFs=3  
 34 MF1="lowIntensive"::'trapez', [-45 -5 0 45]  
 35 MF2="Intensive"::'trapez', [5 45 55 95]  
 36 MF3="highIntensive"::'trapez', [55 100 105 145]  
 37  
 38 [Output1]  
 39 Name="HeatingControl"  
 40 Range=[0 100]  
 41 NumMFs=5

Fuzzy Logic Designer Heating\_3\_line

File Edit View

Surface Viewer: Heating\_3\_line

Y (output): HeatingControl  
 X Mesh Points: 15  
 Y Mesh Points: 15  
 Z (output): HeatingControl

Ret. Input: [NaN -0.0 NaN]  
 Pot points: 101  
 Help Close

UTF-8 plain text file Ln 34 Col 43

EDITOR view

1 [System]  
 2 Name="Heating\_3\_line"  
 3 Type="mamdani"  
 4 Version=2.0  
 5 NumInputs=3  
 6 NumOutputs=1  
 7 NumRules=27  
 8 AndMethod="min"  
 9 OrMethod="max"  
 10 ImpMethod="min"  
 11 AggMethod="max"  
 12 DefuzzMethod="centroid"  
 13  
 14 [Input1]  
 15 Name="Heating"  
 16 Range=[0 100]  
 17 NumMFs=3  
 18 MF1="Low"::'trapez', [-45 -5 5 45]  
 19 MF2="Middle"::'trapez', [5 45 55 95]  
 20 MF3="Strong"::'trapez', [55 95 105 145]  
 21  
 22 [Input2]  
 23 Name="Temperature"  
 24 Range=[-15 5]  
 25 NumMFs=3  
 26 MF1="LowTemp"::'trapez', [-67.5 -47.5 -44.80168700  
 27 MF2="MiddleTemp"::'trapez', [-42.5 -22.5 -17.5 2.5]  
 28 MF3="HighTemp"::'trapez', [-17.5 5 7.5 27.5]  
 29  
 30 [Input3]  
 31 Name="Snow"  
 32 Range=[0 100]  
 33 NumMFs=3  
 34 MF1="lowIntensive"::'trapez', [-45 -5 0 45]  
 35 MF2="Intensive"::'trapez', [5 45 55 95]  
 36 MF3="highIntensive"::'trapez', [55 100 105 145]  
 37  
 38 [Output1]  
 39 Name="HeatingControl"  
 40 Range=[0 100]  
 41 NumMFs=5

Membership Function Editor Heating\_3\_line

File Edit View

Current Variable: Wind  
 Type: input  
 Range: [0 20]  
 Display Range: [0 20]

Current Membership Function (click on MF to select)  
 Name:   
 Type:   
 Params:   
 Help Close

Fuzzy Logic Designer Heating\_3\_line

File Edit View

Updating Membership Function Editor

UTF-8 plain text file Ln 33 Col 9

C:\Users\User\Documents\Heating\_3\_line.fs

EDITOR VIEW

File Edit View

Find Files Find Compare Go To Comment Indent Breakpoints

New Open Save Print Find Indent Breakpoints

FILE NAVIGATE EDIT

```

1 [System]
2 Name="Heating 3 line"
3 Type="mamdani"
4 Version=2.0
5 RunInputs=3
6 NumOutputs=1
7 NumRules=27
8 AndMethod="min"
9 OrMethod="max"
10 ImpMethod="min"
11 AggMethod="max"
12 DefuzzMethod="centroid"
13
14 [Input1]
15 Name="Heating"
16 Range=[0 100]
17 NumIFs=3
18 MF1="Low"::"trapez",[-45 -5 5 45]
19 MF2="Middle"::"trapez",[5 45 55 95]
20 MF3="Strong"::"trapez",[55 95 105 145]
21
22 [Input2]
23 Name="Temperature"
24 Range=[-15 5]
25 NumIFs=3
26 MF1="LowTemp"::"trapez",[-67.5 -47.5 -47.5 -47.5]
27 MF2="MiddleTemp"::"trapez",[-42.5 -22.5 -22.5 -22.5]
28 MF3="HighTemp"::"trapez",[-17.5 5 7.5 5]
29
30 [Input3]
31 Name="Snow"
32 Range=[0 100]
33 NumIFs=3
34 MF1="slowIntensive"::"trapez",[-45 -5 0 45]
35 MF2="Intensive"::"trapez",[5 45 55 95]
36 MF3="highIntensive"::"trapez",[55 100 105 145]
37
38 [Output1]
39 Name="HeatingControl"
40 Range=[0 100]
41 NumFws=5

```

Membership Function Editor Heating\_3\_line

File Edit View

FIS Variables

LowTemp MiddleTemp HighTemp

Temperature

input variable "Temperature"

Current Variable Name Temperature

Type Input

Range [-15 5]

Display Range [-15 5]

Current Membership Function (click on MF to select)

Type trapez

Params

Selected variable "Temperature"

Fuzzy Logic Designer Heating\_3\_line

File Edit View

Heating\_3\_line (mamdani)

HeatingControl

FIS Name Heating\_3\_line FIS Type mamdani

And method min

Or method max

Implication min

Aggregation max

Defuzzification centroid

Current Variable Name Weat

Type input

Range [0 20]

Updating Membership Function Editor

UTF-8 plain text file Ln 33 Col 9

C:\Users\User\Documents\Heating\_3\_line.fs

EDITOR VIEW

File Edit View

Find Files Find Compare Go To Comment Indent Breakpoints

New Open Save Print Find Indent Breakpoints

FILE NAVIGATE EDIT

```

1 [System]
2 Name="Heating 3 line"
3 Type="mamdani"
4 Version=2.0
5 RunInputs=3
6 NumOutputs=1
7 NumRules=27
8 AndMethod="min"
9 OrMethod="max"
10 ImpMethod="min"
11 AggMethod="max"
12 DefuzzMethod="centroid"
13
14 [Input1]
15 Name="Heating"
16 Range=[0 100]
17 NumIFs=3
18 MF1="Low"::"trapez",[-45 -5 5 45]
19 MF2="Middle"::"trapez",[5 45 55 95]
20 MF3="Strong"::"trapez",[55 95 105 145]
21
22 [Input2]
23 Name="Temperature"
24 Range=[-15 5]
25 NumIFs=3
26 MF1="LowTemp"::"trapez",[-67.5 -47.5 -47.5 -47.5]
27 MF2="MiddleTemp"::"trapez",[-42.5 -22.5 -22.5 -22.5]
28 MF3="HighTemp"::"trapez",[-17.5 5 7.5 5]
29
30 [Input3]
31 Name="Snow"
32 Range=[0 100]
33 NumIFs=3
34 MF1="slowIntensive"::"trapez",[-45 -5 0 45]
35 MF2="Intensive"::"trapez",[5 45 55 95]
36 MF3="highIntensive"::"trapez",[55 100 105 145]
37
38 [Output1]
39 Name="HeatingControl"
40 Range=[0 100]
41 NumFws=5

```

Membership Function Editor Heating\_3\_line

File Edit View

FIS Variables

slowIntensive Intensive highIntensive

Snow

input variable "Snow"

Current Variable Name Snow

Type input

Range [0 100]

Display Range [0 100]

Current Membership Function (click on MF to select)

Type trapez

Params

Selected variable "Snow"

Fuzzy Logic Designer Heating\_3\_line

File Edit View

Heating\_3\_line (mamdani)

HeatingControl

FIS Name Heating\_3\_line FIS Type mamdani

And method min

Or method max

Implication min

Aggregation max

Defuzzification centroid

Current Variable Name Weat

Type input

Range [0 20]

Updating Membership Function Editor

UTF-8 plain text file Ln 33 Col 9

Membership Function Editor Heating\_3\_line

File Edit View

FIS Variables

Decrease Constant Increase

output variable "HeatingControl"

Current Variable: HeatingControl, Name: Constant, Type: output, Range: [0 100], Display Range: [0 100]

Current Membership Function (click on MF to select): Type: gaussianf, Params: [1 23 50]

```

1 [System]
2 Name="Heating_3_line"
3 Type="mamdani"
4 Version=2.0
5 NumInputs=3
6 NumOutputs=1
7 NumRules=27
8 AndMethod="min"
9 OrMethod="max"
10 ImpMethod="min"
11 AggMethod="max"
12 DefuzzMethod="centroid"
13
14 [Input1]
15 Name="Heating"
16 Range=[0 100]
17 NumMFs=3
18 MF1="Low"::'trapez',[-45 -5 5 45]
19 MF2="Middle"::'trapez',[5 45 55 95]
20 MF3="Strong"::'trapez',[55 95 105 145]
21
22 [Input2]
23 Name="Temperature"
24 Range=[-15 5]
25 NumMFs=3
26 MF1="LowTemp"::'trapez',[-67.5 -47.5 -47.5 -47.5]
27 MF2="MiddleTemp"::'trapez',[-42.5 -22.5 -22.5 -22.5]
28 MF3="HighTemp"::'trapez',[-17.5 5 7.5 5]
29
30 [Input3]
31 Name="Snow"
32 Range=[0 100]
33 NumMFs=3
34 MF1="slowIntensive"::'trapez',[-45 -5 0 45]
35 MF2="Intensive"::'trapez',[5 45 55 95]
36 MF3="highIntensive"::'trapez',[55 100 105 145]
37
38 [Output1]
39 Name="HeatingControl"
40 Range=[0 100]
41 NumMFs=5

```

UTF-8 plain text file Ln 33 Col 9

Rule Editor Heating\_3\_line

File Edit View Options

1 (Wind=Low & Temperature=HighTemp) & (Snow=highIntensive) => (HeatingControl=Constant) (1)

2 (Wind=Low & Temperature=HighTemp) & (Snow=highIntensive) => (HeatingControl=Increase) (1)

3 (Wind=Low & Temperature=MiddleTemp) & (Snow=slowIntensive) => (HeatingControl=Constant) (1)

4 (Wind=Low & Temperature=MiddleTemp) & (Snow=slowIntensive) => (HeatingControl=Increase) (1)

5 (Wind=Low & Temperature=MiddleTemp) & (Snow=highIntensive) => (HeatingControl=Increase) (1)

6 (Wind=Low & Temperature=LowTemp) & (Snow=slowIntensive) => (HeatingControl=Constant) (1)

7 (Wind=Low & Temperature=LowTemp) & (Snow=slowIntensive) => (HeatingControl=Increase) (1)

8 (Wind=Low & Temperature=LowTemp) & (Snow=highIntensive) => (HeatingControl=Increase) (1)

9 (Wind=Low & Temperature=LowTemp) & (Snow=highIntensive) => (HeatingControl=Increase) (1)

If Wind is Low and Temperature is HighTemp and Snow is highIntensive, then HeatingControl is Constant

Connection: and, Weight: 1

Rule Viewer Heating\_3\_line

File Edit View Options

Input: Wind=10, Temperature=-20, Snow=50, HeatingControl=88.2

Ready [10,-20,50] Plot points: 101 Move [KT, right, down, up]

Fuzzy Logic Designer Heating\_3\_line

File Edit View

FIS Name: Heating\_3\_line, FIS Type: mamdani

And method: min, Current Variable: HeatingControl

Or method: max, Name: HeatingControl

Implication: min, Type: output

Aggregation: max, Range: [0 100]

Defuzzification: centroid

Updating Rule Editor

UTF-8 plain text file Ln 33 Col 9

C:\Users\User\Documents\Heating\_3\_line.fs

EDITOR VIEW

File Edit View Options

Rule Viewer: Heating\_3\_line

File Edit View Options

Wind = 20 Temperature = 45 Shower = 100 HeatingControl = 45

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41

```

[System]
2 Name="Heating_3_line"
3 Type="mamdani"
4 Version=2.0
5 NumInputs=3
6 NumOutputs=1
7 NumRules=27
8 AndMethod="min"
9 OrMethod="max"
10 ImpMethod="min"
11 AggMethod="max"
12 DefuzzMethod="centroid"
13
14 [Inputs]
15 Name="Heating"
16 Range=[0 100]
17 NumMfrs=3
18 MFI="Low"::"cramp",[-45 -5 5 45]
19 MFI="Middle"::"cramp",[5 45 55 95]
20 MFI="Strong"::"cramp",[55 95 105 145]
21
22 [Input2]
23 Name="Temperature"
24 Range=[-15 5]
25 NumMfrs=3
26 MFI="lowTemp"::"cramp",[-67.5 -47.5 -44.8015873015873 -22.5]
27 MFI="MiddleTemp"::"cramp",[-42.5 -22.5 -17.5 2.5]
28 MFI="HighTemp"::"cramp",[-17.5 5 7.5 27.5]
29
30 [Input3]
31 Name="Shower"
32 Range=[0 100]
33 NumMfrs=3
34 MFI="slowIntensive"::"cramp",[-45 -5 0 45]
35 MFI="Intensive"::"cramp",[5 45 55 95]
36 MFI="highIntensive"::"cramp",[55 100 105 145]
37
38 [Outputs]
39 Name="HeatingControl"
40 Range=[0 100]
41 NumMfrs=1

```

Ready

Fuzzy Logic Designer Heating\_3\_line

Wind Temperature Shower Heating\_3\_line (mamdani) HeatingControl

FIS Name	Heating_3_line	FIS Type	mamdani
And method	min	Current Variable	HeatingControl
Or method	max	Name	
Implication	min	Type	Output
Aggregation	max	Range	[0 100]
Defuzzification	centroid		

Updating Rule Editor

UTF-8 plain text file Ln 33 Col 9

## 26.12.2021 veikta eksperimenta statistiskie dati

No.	Date	Time	Outside temp.	Unit	Wind	Unit	New system Percent of max Power	Unit	Existing system Power state	Unit	Precipitation Type (Rain- Snow)	Unit
325	26-12-21	524:00	-3.1	°C	1.8	m/s	61	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
326	26-12-21	525:00	-3.1	°C	1.8	m/s	61	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
327	26-12-21	526:00	-3.2	°C	1.8	m/s	61	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
328	26-12-21	527:00	-3.2	°C	1.8	m/s	61	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
329	26-12-21	528:00	-3.2	°C	1.9	m/s	61	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
330	26-12-21	529:00	-3.2	°C	1.9	m/s	41	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
331	26-12-21	530:00	-3.2	°C	1.9	m/s	41	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
332	26-12-21	531:00	-3.2	°C	1.8	m/s	41	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
333	26-12-21	532:00	-3.1	°C	1.9	m/s	41	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
334	26-12-21	533:00	-3.1	°C	2	m/s	41	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
335	26-12-21	534:00	-3.1	°C	2	m/s	31	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
336	26-12-21	535:00	-3.1	°C	1.9	m/s	31	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
337	26-12-21	536:00	-3.1	°C	1.8	m/s	31	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
338	26-12-21	537:00	-3	°C	1.8	m/s	31	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
339	26-12-21	538:00	-3	°C	1.7	m/s	31	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
340	26-12-21	539:00	-3	°C	1.6	m/s	21	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
341	26-12-21	540:00	-3	°C	1.5	m/s	21	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
342	26-12-21	541:00	-2.9	°C	1.4	m/s	21	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
343	26-12-21	542:00	-2.9	°C	1.3	m/s	21	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
344	26-12-21	543:00	-2.9	°C	1.4	m/s	21	%	1	On/Off	70	0/Rain/70Snow
345	26-12-21	544:00	-2.8	°C	1.5	m/s	21	%	1	On/Off	70	0/Rain/70Snow
346	26-12-21	545:00	-2.8	°C	1.8	m/s	21	%	1	On/Off	70	0/Rain/70Snow
347	26-12-21	546:00	-2.7	°C	1.9	m/s	21	%	1	On/Off	70	0/Rain/70Snow
348	26-12-21	547:00	-2.6	°C	2	m/s	21	%	1	On/Off	70	0/Rain/70Snow
349	26-12-21	548:00	-2.6	°C	2.2	m/s	21	%	1	On/Off	70	0/Rain/70Snow
350	26-12-21	549:00	-2.6	°C	2.4	m/s	33	%	1	On/Off	70	0/Rain/70Snow
351	26-12-21	550:00	-2.5	°C	2.6	m/s	33	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
352	26-12-21	551:00	-2.5	°C	2.7	m/s	33	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
353	26-12-21	552:00	-2.4	°C	2.7	m/s	33	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
354	26-12-21	553:00	-2.4	°C	2.9	m/s	33	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
355	26-12-21	554:00	-2.4	°C	3	m/s	43	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
356	26-12-21	555:00	-2.4	°C	3.2	m/s	43	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
357	26-12-21	556:00	-2.4	°C	3.3	m/s	43	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
358	26-12-21	557:00	-2.4	°C	3.2	m/s	43	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
359	26-12-21	558:00	-2.4	°C	3.2	m/s	43	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
360	26-12-21	559:00	-2.4	°C	3.2	m/s	34	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
361	26-12-21	600:00	-2.4	°C	3.3	m/s	34	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
362	26-12-21	601:00	-2.4	°C	3.3	m/s	34	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
363	26-12-21	602:00	-2.5	°C	3.1	m/s	34	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
364	26-12-21	603:00	-2.5	°C	3	m/s	34	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
365	26-12-21	604:00	-2.5	°C	3.4	m/s	33	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
366	26-12-21	605:00	-2.5	°C	3.6	m/s	33	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
367	26-12-21	606:00	-2.5	°C	4	m/s	33	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
368	26-12-21	607:00	-2.5	°C	4.1	m/s	33	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
369	26-12-21	608:00	-2.5	°C	4.1	m/s	33	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
370	26-12-21	609:00	-2.6	°C	4.1	m/s	34	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
371	26-12-21	610:00	-2.6	°C	4.3	m/s	34	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
372	26-12-21	611:00	-2.7	°C	4.7	m/s	34	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
373	26-12-21	612:00	-2.7	°C	5	m/s	34	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
374	26-12-21	613:00	-2.8	°C	5.1	m/s	34	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
375	26-12-21	614:00	-2.8	°C	4.5	m/s	64	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
376	26-12-21	615:00	-2.9	°C	4.2	m/s	64	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
377	26-12-21	616:00	-2.9	°C	4.6	m/s	64	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
378	26-12-21	617:00	-2.9	°C	4.7	m/s	64	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
379	26-12-21	618:00	-3	°C	4.6	m/s	64	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
380	26-12-21	619:00	-3	°C	4.4	m/s	54	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
381	26-12-21	620:00	-3	°C	4.1	m/s	54	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
382	26-12-21	621:00	-3.1	°C	4	m/s	54	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
383	26-12-21	622:00	-3.1	°C	3.9	m/s	54	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
384	26-12-21	623:00	-3.1	°C	3.8	m/s	54	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
385	26-12-21	624:00	-3.1	°C	3.9	m/s	54	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
386	26-12-21	625:00	-3.1	°C	3.7	m/s	54	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
387	26-12-21	626:00	-3.1	°C	3.5	m/s	54	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
388	26-12-21	627:00	-3.1	°C	3.7	m/s	54	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
389	26-12-21	628:00	-3.1	°C	4.1	m/s	54	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
390	26-12-21	629:00	-3.1	°C	4.2	m/s	24	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
391	26-12-21	630:00	-3.1	°C	4.3	m/s	24	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
392	26-12-21	631:00	-3.1	°C	4.6	m/s	24	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
393	26-12-21	632:00	-3	°C	4.7	m/s	24	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
394	26-12-21	633:00	-3	°C	5	m/s	24	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
395	26-12-21	634:00	-2.9	°C	5.1	m/s	24	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
396	26-12-21	635:00	-2.9	°C	5.5	m/s	24	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
397	26-12-21	636:00	-2.8	°C	5.6	m/s	24	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
398	26-12-21	637:00	-2.8	°C	5.6	m/s	24	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
399	26-12-21	638:00	-2.7	°C	5.6	m/s	24	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
400	26-12-21	639:00	-2.6	°C	5.7	m/s	29	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
401	26-12-21	640:00	-2.6	°C	5.6	m/s	29	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
402	26-12-21	641:00	-2.5	°C	5.5	m/s	29	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
403	26-12-21	642:00	-2.5	°C	5.5	m/s	29	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
404	26-12-21	643:00	-2.5	°C	5.4	m/s	29	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
405	26-12-21	644:00	-2.5	°C	5.4	m/s	29	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
406	26-12-21	645:00	-2.4	°C	5.1	m/s	29	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
407	26-12-21	646:00	-2.4	°C	5	m/s	29	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
408	26-12-21	647:00	-2.4	°C	5.3	m/s	29	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
409	26-12-21	648:00	-2.4	°C	5.4	m/s	29	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
410	26-12-21	649:00	-2.4	°C	5.5	m/s	0	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
411	26-12-21	650:00	-2.4	°C	5.7	m/s	0	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
412	26-12-21	651:00	-2.4	°C	5.7	m/s	0	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow
413	26-12-21	652:00	-2.4	°C	5.8	m/s	0	%	1	On/Off	60	0/Rain/70Snow