

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte  
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts  
Industriālās elektronikas un elektrotehnoloģiju katedra

**Andrejs Potapovs**

Elektrotehnoloģiju datorvadības doktora studiju programma

**Iebūvējamo intelektuālo iekārtu izpēte un izstrāde  
dzelzceļa transporta adaptīvai vadībai**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
*Dr. sc. ing.*, profesors  
**A. Ļevčenkovs**

**Rīga – 2014**



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

## PROMOCIJAS DARBS

### IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014. gada 5. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un Elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12 k.1, 212 telpā.

#### OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors, *Dr. sc. ing.* Anastasija Žiravecka  
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, *Dr. habil. sc. ing.* Andris Šnīders  
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Profesors, *Dr. sc. ing.* Žilvinas Bazaras  
Kauņas Tehnoloģiju universitāte (Lietuva)

#### APSTIPRINĀJUMS

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

Andrejs Potapovs .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, piecas nodaļas, secinājumus, izmantotās literatūras sarakstu, vienu pielikumu, 32 attēlus, 22 tabulas, kopā 155 lappusi. Literatūras sarakstā ir norādes uz 207 literatūras avotu.

## SATURS

|  |    |
|--|----|
| Tēmas aktualitāte .....  | 5  |
| Darba mērķis un uzdevumi .....   | 6  |
| Pētījuma līdzekļi un metodes .....   | 6  |
| Darba zinātniskā novitāte .....  | 6  |
| Darba praktiskais pielietojums .....   | 7  |
| Darba aprobācija .....   | 7  |
| Autora publikācijas .....  | 9  |
| Izstrādātie patenti .....  | 10 |
| Promocijas darba struktūra .....   | 10 |
| Dzelzeļa transporta adaptīvas, precīzas un laidenas bremzēšanas sistēmas ( <i>APBS</i> )<br>elementu un to mijiedarbības shēmu apraksts..... | 11 |
| Izstrādātā mērķa funkcija un izvirzītā hipotēze .....  | 14 |
| Izstrādātie <i>APBS</i> sistēmas elementu darbības algoritmi .....   | 16 |
| <i>APBS</i> sistēmas elementu elektrisko un pneimatisko shēmu izstrāde .....   | 19 |
| Piedāvājamās <i>APBS</i> sistēmas un tās vadības algoritmu eksperimentālā testēšana .....  | 21 |
| Izstrādāto <i>APBS</i> sistēmas darbības algoritmu testēšana laboratorijas apstākļos.....  | 21 |
| Izstrādāto iekārtu prototipu testēšana reālajos darba apstākļos.....   | 27 |
| Eksperimenti reālajos darba apstākļos .....  | 28 |
| Testēšanas rezultātu statistiskā analīze .....   | 32 |
| Secinājumi.....  | 39 |
| Literatūras saraksts.....  | 40 |

## TĒMAS AKTUALITĀTE

Transporta ražošanas un ekspluatācijas industriju mūsdienās var uzskatīt vienu no pasaules saimniecības pamatiem. Visā pasaulē dotajā brīdī dažāda veida transportlīdzekļu kopējais skaits pārsniedz 1 miljardu [104]. Transporta ražošanas un apkalpošanas industrija visā pasaulē nodarbina vairāk nekā 100 miljonus cilvēku, katru gadu pārvadā vairāk nekā 100 miljardus tonnu kravas un vairāk par 1 triljonu cilvēku izmanto transportu pārvietojoties [93, 91], tāpēc jau ilgu laiku cilvēces pastāvēšana nav iedomājama gadījumā, ja tai nāktos atteikties no transportlīdzekļu izmantošanas.

Lielu lomu pasažieru, kā arī kravas pārvadājumos visā pasaulē spēlē dzelzceļa transports, ko apliecina dažādu ziņu aģentūru veiktie pētījumi [71, 91]. Neraugoties uz daudzām šī transporta veida pozitīvajām īpašībām, tam ir arī savi trūkumi, kas bieži ir saistīti šī transporta veida drošas ekspluatācijas jautājumiem un iespējamajām sadursmēm, kas bieži izraisa lielus materiālus zaudējumus, kā arī, diemžēl cilvēku upurus. Šīs problēmas risināšanai tiek pastāvīgi izstrādātas jaunas un modernizētas jau ekspluatācijā esošās dzelzceļa transporta drošības sistēmas, bet tas diemžēl neļauj uzskatīt, ka tas pilnīgi atrisina visas minētās problēmas, jo šādu kompleksu sistēmu izstrāde ne vienmēr spēj sniegt risinājumu konkrētām problēmām.

Strauji attīstoties tehnoloģijām, pēdējos gados visdažādākās zinātnes jomās lielu popularitāti iegūst dažādu intelektuālu iekārtu un vadības sistēmu pielietošana. Šo faktu rosina divi galvenie nosacījumi. Pirmais no tiem ir saistīts ar to, ka arvien biežāk parādās uzdevumi, kuru risināšanai, jau ilgus gadus izmantojamās metodes (automātika, manuālā vadība u. tt.) neļauj sasniegt optimālo risinājumu, savukārt otrs nosacījums ir saistīts ar datortehnikas straujo attīstību, kas ļauj izstrādāt iekārtas, uz kuru bāzes ir iespējams realizēt daudzus līdz šim brīdim tikai matemātiski aprakstītus funkcionēšanas algoritmus.

Transporta industrija šajā ziņā nav izņēmums, jo mūsdienās pat vienkāršākie transporta veidi, kā arī dzelzceļa transports, tiek aprīkoti ar dažāda veida un sarežģītības pakāpes datortehniku, kuras galvenie uzdevumi pārsvarā ir saistīti ar:

- transporta funkcionēšanas lietderības koeficienta palielināšanu;
- transporta funkcionalitātes palielināšanu;
- lietotāja komforta līmeņa celšanu;
- transporta izmantošanas drošības līmeņa celšanu u. c. uzdevumiem.

Adaptīvās sistēmas lielākā vai mazākā mēra var tikt pielietotas visos iepriekš uzskaitītajos uzdevumos.

Daudzu adaptīvo vadības algoritmu praktiskā realizācija tika veikta tikai pēdējo divdesmit gadu laikā, kas savukārt paver jaunas iespējas adaptīvo vadības sistēmu izmantošanai. Tas savukārt apliecina to, ka adaptīvo vadības algoritmu izpēte kopumā atrodas savas attīstības stadijā, līdz ar ko prasa ievērojamus pētījumus gan teorētiskajā līmenī, gan no praktiskās pielietošanas redzesloka. Ievērojot visu augstākminēto, var secināt, ka neskatoties uz jau izstrādāto lielo matemātisko adaptīvo algoritmu teoriju, šī tipa algoritmu plaša izmantošana praktiskos risinājumos tiek realizēta tikai pēdējos gados.

Jāpiezīmē to, ka jaunu vadības sistēmu ieviešana ne vienmēr dod iespēju izmantot tās kopā ar jau ekspluatācijā esošām sistēmām. Tādēļ promocijas darbā tiek risināti sekojoši uzdevumi:

- izmantojot adaptīvos vadības algoritmus un iebūvējamās intelektuālās iekārtas, izstrādāt precīzas un laidenas vilcienu bremzēšanas sistēmu;
- izstrādāt vienotas sistēmas konceptu, kas pielietojot minēto vilcienu bremzēšanas sistēmu, spētu palielināt drošības līmeni dzelzceļa pārbrauktuvju teritorijās.

Promocijas darbs saistīts ar dzelzceļa transporta vadības sistēmu izstrādi ar mērķi palielināt to maršrutēšanas drošību un samazināt iespējamo avāriju esamību.

## DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Promocijas darba mērķis ir izpētīt esošos un izstrādāt jaunus adaptīvas vadības algoritmus dzelzceļa transporta bremžu sistēmu adaptīvai vadībai uz iebūvējamo intelektuālo iekārtu bāzes.

Šī mērķa realizēšanai tiek izvirzīti sekojoši uzdevumi:

- Izanalizēt adaptīvo vadības sistēmu galvenos darbības principus un funkcionēšanas algoritmus;
- Izanalizēt intelektuālo iebūvējamo iekārtu pielietojamas iespējas dzelzceļa transportā;
- Izanalizēt esošās elektriskā transporta vadības, monitoringa un drošības sistēmas;
- Realizēt jaunus dzelzceļa transporta vadības un drošības sistēmu darbības algoritmus;
- Realizēt izveidoto darbības algoritmu bāzes funkcionējošus iekārtu prototipus;
- Izmēģināt dažāda veida izstrādājamo iekārtu datormodeļus, ar mērķi atklāt izstrādājamo sistēmu nepilnības un rast jaunas uzlabošanas iespējas;
- Izmēģināt izveidotās sistēmas iekārtu prototipus reālos darba apstākļos;
- Izmantojot statistiskās vērtēšanas metodes novērtēt izstrādāto algoritmu un iebūvēto iekārtu izmantošanas efektivitāti, darbības drošumu u. c. parametrus;
- Salīdzināt izveidoto sistēmu darbības algoritmu efektivitāti ar jau zināmajām sistēmām;
- Salīdzināt izveidotās iekārtas prototipa izmantošanas lietderību un drošumu ar jau ekspluatējamām iekārtām.

## PĒTĪJUMA LĪDZEKĻI UN METODES

- Dzelzceļa vadības sistēmas un procesu analīze;
- Adaptīvo vadība algoritmu teorija;
- Iebūvējamo intelektuālo iekārtu integrēšanas nosacījumi;
- Varbūtības teorija;
- Modelēšana datorprogrammas *MATLAB* pakotnes *SIMULINK* vidē;
- *PLC* programmēšana;
- Statistiskās analīzes metodes.

## DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Promocijas darbā izstrādāti sekojoši matemātiskie modeļi adaptīvās vilciena laidenās un precīzās bremzēšanas sistēmai:

1. Vispārējs adaptīvās vilciena laidenas un precīzās bremzēšanas sistēmas elektrisko, mehānisko un pneimatisko elementu mijiedarbības matemātiskais modelis;
2. Vilciena pneimatiskās bremžu sistēmas gaisa spiediena vadības matemātiskais modelis;

3. Vairāki adaptīvo algoritmu matemātiskie modeļi adaptīvās vilciena laidenas un precīzās bremsēšanas sistēmas pašapmācībai;
4. Adaptīvās vilciena laidenas un precīzās bremsēšanas sistēmas kopējais darbības algoritms, ieskaitot vilciena pneimatiskās bremžu vadības sistēmas algoritmu, sistēmas pašapmācības algoritmu ar tās kvalitātes novērtēšanas algoritmu.

## **DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS**

Promocijas darbā piedāvājamā dzelzceļa transporta vadības sistēma un tās funkcionēšanas algoritmi var tikt pielietoti dzelzceļa transporta, tai skaitā arī kravas vilcienu maršrutēšanas drošības un automatizācijas līmeņa celšanā. Minētie algoritmi dod iespēju dzelzceļa transporta iespējamo sadursmju novēršanai pielietot darba bremsēšanas režīmus un veikt vilciena pneimatiskās bremžu sistēmas automātisku diagnostiku. Šo funkciju realizēšanai tiek izstrādātas jauna automātiskās vilciena bremžu vadības sistēma ar bezvadu sakaru un monitoringa funkcijām, pielietojot iebūvējamās intelektuālās iekārtas un adaptīvos vadības algoritmus.

## **DARBA APROBĀCIJA**

Veikto pētījumu rezultāti tika prezentēti un apspriesti 10 starptautiskās konferencēs:

1. Starptautiskā zinātniskā konference „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering”, Igaunija, Pērnavā, 2010. gada 18. jūnijs. Referāts „Algorithm of Precise Control of Timetable for Intelligent Embedded Devices in City Electric Transport”.
2. Starptautiskā zinātniskā konference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems 2010 (ITELMS'2010)”, Lietuva, Paņeveža, 2010. gada 4. jūnijs. Referāts „Modeling of embedded intelligent device for control of city electric transport”.
3. Starptautiskā zinātniskā konference „Transport System Telematics 10<sup>th</sup> International Conference”, Polija, Katovice-Ustron, 2010. gada, 22. oktobris. Referāts „Interaction of Real and Embedded Devices for Intelligent Control of city Electric Transport”.
4. Starptautiskā zinātniskā konference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems 2011 (ITELMS'2011)”, Lietuva, Paņeveža, 2011. gada, 5. maijs. Referāts „Adaptive random search algorithm with linear tactics for use in railway control system”.
5. Starptautiskā zinātniskā konference „Transport System Telematics 11<sup>th</sup> International Conference”, Polija, Katovice-Ustron, 2011. gada 20. oktobris. Referāts „Algorithm for Electronic Embedded Systems for the Protection of Railway transport from Accidents”.
6. Starptautiskā zinātniskā konference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems 2012 (ITELMS'2012)”, Lietuva, Paņeveža, 2012. gada 4. maijs. Referāts “Development of Adaptive Search Algorithm for Smooth Braking System of Train”.
7. Starptautiskā zinātniskā konference „25<sup>th</sup> European Conference on Operational Research”, Lietuva, Viļņa, 2012. gada 11. jūlijs. Referāts „Use of Adaptive Control Systems in Multi-Criteria Tasks in Electric Transport Control”.

8. Starptautiskā zinātniskā konference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems 2013 (ITELMS'2013)”, Lietuva, Paņeveža, 2013. gada 23. maijs. Referāts “Development of neural-network based control algorithm for train adaptive and smooth braking system”.
9. Starptautiskā zinātniskā konference „Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications – International Conference SIMULTECH'2013”, Island, Rejkjavik, 2013. gada 28. jūlijs. Referāts „Mathematical Modelling of Smooth and Precise Adaptive Train Braking System”.
10. Starptautiskā zinātniskā konference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems 2014 (ITELMS'2014)”, Lietuva, Paņeveža, 2014. gada 23. maijs. Referāts “Electric transport adaptive systems and embedded intelligent devices”.

Kā arī veikto pētījumu rezultāti tika prezentēti un apspriesti arī 9 vietējās konferencēs:

1. Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskā konference „51. RTU studentu zinātniskā un tehniskā konference”, Latvija, Rīga, 2010. gada 29. aprīlis. Referāts „Objektorientēta elektriskā transporta sistēmu modelēšana”.
2. Rīgas Tehniskās universitātes „Inovāciju un jauno tehnoloģiju konference”, Latvija, Rīga, 2010. gada 24. septembris. Referāts „Sliežu transporta optimālās vadības ģenētisko algoritmu izstrāde un modelēšana”.
3. Rīgas Tehniskās universitātes 51. starptautiskā zinātniskā konference, sekcijas „Energētika un elektrotehnika” apakšsekcija „Elektrotehnika”, Latvija, Rīga, 2010. gada 14. oktobris. Referāts „Analysis of possibilities to apply adaptive control system for railway crossing”.
4. Rīgas Tehniskās universitātes 51. starptautiskā zinātniskā konference, sekcijas „Ražošanas tehnoloģijas un transports” apakšsekcija „Dzelzceļa transports”, Latvija, Rīga, 2010. gada 15. oktobris. Referāts „Train Braking Algorithm Realization and Testing Using PLC”.
5. Rīgas Tehniskās universitātes „Inovāciju un jauno tehnoloģiju konference”, Latvija, Rīga, 2011. gada 16. marts. Referāts „Ritošā sastāva jauno kustības vadības iekārtu drošuma testēšana avārijas situācijās”.
6. Rīgas Tehniskās universitātes 52. starptautiskā zinātniskā konference, sekcijas „Energētika un elektrotehnika” apakšsekcija „Elektrotehnika”, Latvija, Rīga, 2011. gada 14. oktobris. Referāts „Analysis of possibilities to apply adaptive control system for railway crossing”.
7. Rīgas Tehniskās universitātes 51. starptautiskā zinātniskā konference, sekcijas „Ražošanas tehnoloģijas un transports” apakšsekcija „Dzelzceļa transports”, Latvija, Rīga, 2011. gada 14. oktobris. Referāts „Use of Adaptive Control Algorithms for Smooth Braking of Train Using PLC”.
8. Rīgas Tehniskās universitātes „Inovāciju un jauno tehnoloģiju konference”, Latvija, Rīga, 2012. gada 3. aprīlis. Referāts „Sliežu transporta optimālās vadības adaptīvo algoritmu izstrāde un modelēšana”.
9. Rīgas Tehniskās universitātes 2. starptautiskais doktorantu simpozījs „2<sup>nd</sup> International Doctoral School of Electrical Engineering and Power Electronics”, Latvija, Ronīši 2013. gada 24. maijs.

## AUTORA PUBLIKĀCIJAS

Promocijas darba izstrādes gaitā veikto pētījumu rezultāti ir aprakstīti un publicēti 13 sekojošos starptautisko konferenču rakstu krājumos:

1. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A., Ribickis L. „Algorithm of Precise Control of Timetable for Intelligent Embedded Devices in City Electric Transport” // In proceedings of 9<sup>th</sup> International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering", Estonia, Parnu, 2010. – pp 180–185.
2. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A. „Algorithm for Embedded Safety Braking Control System in City Electric Transport” // In proceedings of 51<sup>th</sup> Annual Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 2010. – pp 249–254.
3. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A. „Interaction of Real and Embedded Devices for Intelligent Control of City Electric Transport” // „Archives of Transport System Telematics”, Poland, Katowice-Ustroń, 2010. – pp 25–31.
4. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A., Ribickis L. „Modeling of Embedded Intelligent Device for Control of City Electric Transport” // In proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS’2010)”, Lithuania, Panevezys, 2010. – pp 37–42.
5. Alps I., Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A. „Algorithm for Public Electric Transport Schedule Control for Intelligent Embedded Devices” // In Scientific Journal of RTU. 4. series „Enerģētika un elektrotehnika”, Latvia, Riga, 2010. – pp 155–160.
6. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A. „Intelligent Electronic Embedded Systems for the Protection of Railway Transport from Accidents // In proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference „Transport Systems Telematics”, Poland, Katowice-Ustron, 2011. – pp 85–85.
7. Potapovs A. „Analysis of possibilities to apply adaptive control system for railway crossing” // In proceedings of 52<sup>th</sup> Annual Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 2011. – pp 82.
8. Potapovs A., Levchenkov A., Gorobetz M. „Intelligent Electronic Embedded Systems for the Protection of Railway Transport from Accidents” // „Archives of Transport System Telematics”, Poland, Katowice-Ustroń, 2011. – pp 24.–30.
9. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A., „Opportunities of Adaptive Control Algorithms Application in Railway Control Systems” // Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference (ITELMS’2012), Lithuania, Kaunas, 2012. – pp 141–146.
10. Potapovs A., Moor-Yaroslavtsev A., Gorobetz M., Levchenkov A. „Smooth Braking of Train Using Adaptive Control Algorithms on Embedded Devices” // In proceedings of 53<sup>th</sup> Annual Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 2012. – pp 135.
11. Potapovs, A., Gorobets, M., Ļevčenkova, A. „Development of Neural-Network Based Control Algorithm for Train Adaptive and Smooth Braking System” // Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference (ITELMS’2013), Lithuania, Kaunas: Technologija, 2013. – pp 7.–13.

12. Potapovs, A., Gorobecs, M., Ļevčenkovs, A. „Adaptive System of Smooth and Accurate Braking of Railway Transport” // Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference (ITELMS'2013), Lithuania, Kaunas: Technologija, 2013. – pp 2.– 6.
13. Potapovs, A., Gorobecs, M., Ļevčenkovs, A. „Mathematical Modelling of Smooth and Precise Adaptive Train Braking System” // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2013), Island, Reykjavik, 2013. – pp. 204–209.lpp.

Ir publicēta viena publikācija recenzēto konferenču tēzēs:

1. Potapovs A. „Intelektuālās elektroniskās iebūvētās sistēmas sadursmju novēršanai Latvijas dzelzceļā” // Rīgas domes Satiksmes departamenta starptautiskais konkurss „Par labāko doktorantu, maģistrantu, studentu un skolēnu pētniecisko darbu saistītu ar Rīgas pilsētas satiksmes problēmām”, Rīga, 2011. g.

Izdotas mācību grāmatas:

1. Anatolijs Ļevčenkovs, Andrejs Potapovs, Ivars Raņķis „Programmēšanas tehnoloģijas pamati studiju projektam (EEI345 3 kr. p.)”, RTU – 2011. g., 111 lpp. ISBN-978-9934-10-194-6

## **IZSTRĀDĀTIE PATENTI**

Promocijas darba izstrādes gaitā iegūtie pētījumu rezultāti ir patentēti. Par apliecinājumu tam kalpo Latvijas Republikas Patentu valdes izsniegtās apliecības:

1. A. Ļevčenkovs, M. Gorobecs, I. Raņķis, L. Ribickis, P. Balckars, A. Potapovs „Vilcienu pretsadursmju iekārta ar satelītu navigāciju”, patenta Nr. LV14384B no 26.05.2011.;
2. A. Ļevčenkovs, M. Gorobecs, I. Raņķis, L. Ribickis, P. Balckars, A. Potapovs, I. Alps, I. Korago, V. Vinokurovs „Iekārta drošai autotransporta pārbrauktuvju šķērsošanai izmantojot satelītu navigācijas sistēmas”, patenta Nr. LV14405B no 20.09.2011.;
3. A. Potapovs, A. Ļevčenkovs, M. Gorobecs, S. Holodovs, I. Birjuļins „Vilcienu automātiskas laidenas un precīzas bremzēšanas iekārta”, patenta pieteikuma Nr. P-13-43 no 03.04.2013.

Kā arī ir iegūta Eiropas patentu valdes apliecība par veikto pētījumu novitāti: A. Ļevčenkovs, M. Gorobecs, I. Raņķis, L. Ribickis, P. Balckars, A. Potapovs, I. Alps, I. Korago, V. Vinokurovs „Device for safe passing of motor vehicle over level crossings using satellite navigation systems”, patenta Nr. EP 2 585 354 B1 of 1.05.2014.

## **PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA**

Promocijas darbs veltīts dzelzceļa transporta vadības sistēmu izpētei un izstrādei, pielietojot adaptīvus vadības algoritmus un iebūvējamās intelektuālās iekārtas. Promocijas darba ievadā aprakstīta tēmas aktualitāte, atbilstoši kurai ir izvirzīts promocijas darba mērķis un risināmie uzdevumi.

Promocijas darba 1. nodaļa veltīta esošo dzelzceļa transporta ritošo vienību vadības sistēmu izpētei, piedāvājamās dzelzceļa transporta adaptīvas, precīzas un laidenas

bremzēšanas sistēmas (*APBS*) elementu un to mijiedarbības shēmu aprakstam, šīs sistēmas kopējā darbības algoritma aprakstam, kā arī izstrādātās mērķa funkcijas un izvirzīto hipotēžu aprakstam.

Promocijas darba 2. nodaļā veikta ritošā sastāva fizisko kustības parametru noteikšanas adaptīvā pašapmācības algoritma izstrāde, adaptīvo meklēšanas algoritmu izpēte un izstrāde vilciena kustības parametru noteikšanai, dzelzceļa transporta ritošā sastāva kustības matemātiskā modeļa izstrāde un vilciena bremžu sistēmas automatiskās vadības algoritma izstrāde un to apraksts.

Promocijas darba 3. nodaļa veltīta mikroprocesoru tehnikas izmantošanas iespēju izpētei, dzelzceļa vadības sistēmās izvirzīto drošības prasību analīzei, iebūvējamo intelektuālo iekārtu iekšējo interfeisu izstrādes un pielietošanas aprakstam, piedāvājamās sistēmas elementu elektrisko shēmu izstrādei un to mijiedarbības datormodeļu aprakstam.

Promocijas darba 4. nodaļā apskatīta izstrādāto matemātisko un datormodeļu testēšana laboratorijas apstākļos, kā arī izstrādāto iekārtu prototipu testēšana reālajos darba apstākļos.

Promocijas darba 5. nodaļā ir aprakstīta promocijas darbā iegūto testēšanas rezultātu statistiskā analīze.

Darba noslēgumā tiek izklāstīti kopējie secinājumi un izvirzīti turpmākie iespējamo pētījumu mērķi.

## **DZELZCEĻA TRANSPORTA ADAPTĪVAS, PRECĪZAS UN LAIDENAS BREMZĒŠANAS SISTĒMAS (*APBS*) ELEMENTU UN TO MIJIEDARBĪBAS SHĒMU APRAKSTS**

Piedāvājamo *APBS* sistēmu promocijas darba autors piedāvā aprakstīt vairākos līmeņos, izdalot esošos dzelzceļa transporta vadības sistēmu elementus, un tos, kurus tiek piedāvāts ieviest no jauna. *APBS* sistēmas apraksts tiek realizēts, pielietojot atsevišķu sistēmas mehānisko un elektrisko elementu definēšanu. Pirmais līmenis satur esošās dzelzceļa ritošā sastāva vadības sistēmas pamat elementus. Sistēma satur:

- $GVC$  – galvenais vadības centrs;
- $DC = \{Dc_1, Dc_2, \dots, Dc_n\}$  – dispečeru centri;
- $ST_i = \{St_1^i, St_2^i, \dots, St_{m_i}^i\}$  – stacijas,

kur  $i = \overline{1, n}$  – dispečeru centra indekss,  $m_i$  – staciju skaits  $i$ -tā dispečeru centra vadībā.

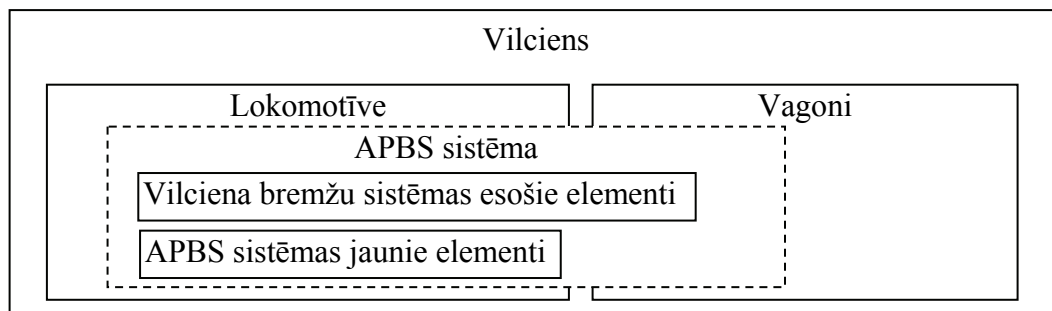
- $PB_i = \{Pb_1^i, Pb_2^i, \dots, Pb_{q_i}^i\}$  – pārbrauktuves,

kur  $i = \overline{1, n}$  – dispečeru centra indekss,  $q_i$  – pārbrauktuveju skaits  $i$ -tā dispečeru centra vadībā.

- $RSO_i = \{Rso_1^i, Rso_2^i, \dots, Rso_{k_i}^i\}$  – ritošā sastāva objekti,

kur  $i(t) = \overline{1, n}$  – dispečeru centra indekss, kurš mainās laikā  $t$  atkarībā no ritošā sastāva.

Starp norādītajiem sistēmas elementiem pastāv informācijas plūsmas, kas nodrošina šo elementu funkcionēšanu un savstarpējo mijiedarbību. Sīkāk šīs sistēmas elementu mijiedarbības, ka arī pašu sistēmas elementu funkcionēšana, ir aprakstīta darbos [106, 107 u. c.].



1. att. *APBS* sistēmas vispārīgā integrēšanas shēma vilcienā

Attēlā nr. 1. ir attēlota principiālā *APBS* sistēmas iebūvēšanas shēma esošajā vilciena bremžu vadības sistēmā. *APBS* detalizētam aprakstam, promocijas darba autors iedala šīs sistēmas elementus divās sekojošās pamatgrupās:

- Vilciena bremžu vadības sistēmas esošie elementi (elementi, ko satur vilciena bremžu vadības sistēma līdz *APBS* sistēmas ieviešanai);
- *APBS* sistēmas jaunie elementi (elementi, ko papildus satur vilciena bremžu vadības sistēma pēc *APBS* sistēmas ieviešanas).

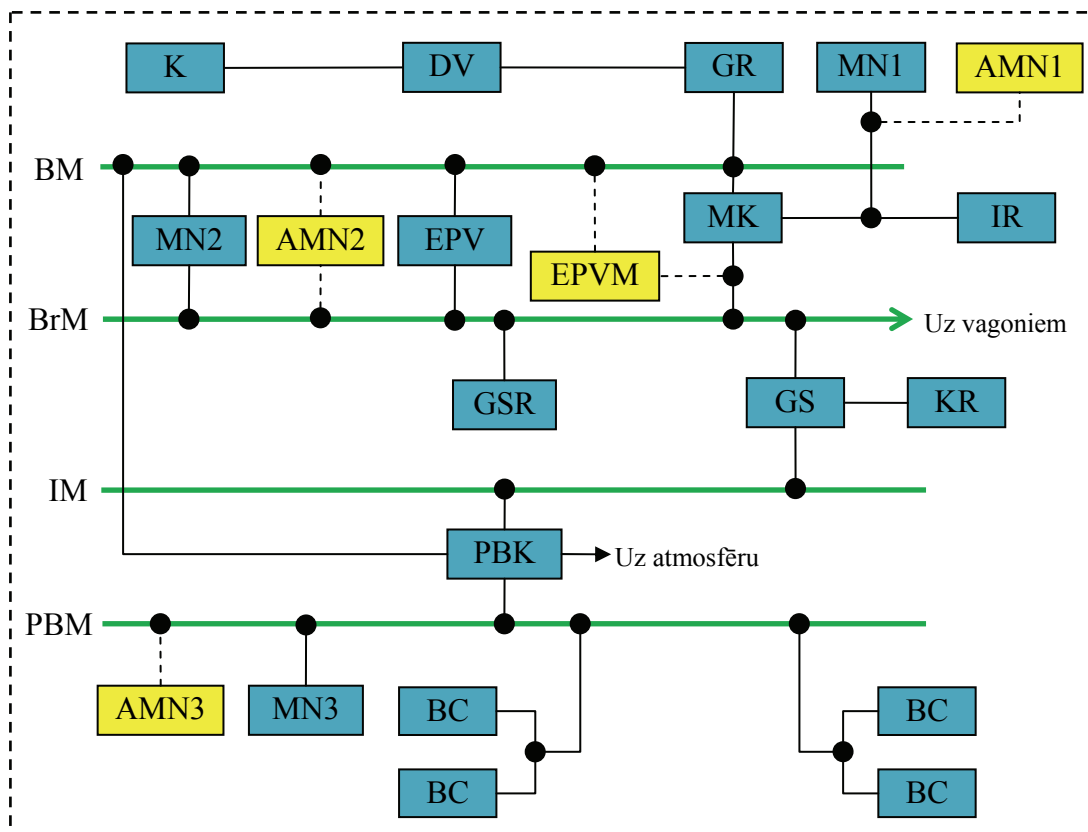
*APBS* sistēmas autora piedāvātie elementi iedalās sekojošās galvenajās funkcionālo moduļu grupās (piedāvājamo elementu veicam funkciju sīkāks apraksts ir aplūkojams promocijas darba pilnā versijā):

Elektriskie bloki (2. att. attēloti ar dzeltenu):

- *ADIIM* – analogo un digitālo ieeju/izeju modulis;
- *BB* – barošanas bloka modulis;
- *BSM* – bezvadu sakaru modulis;
- *GPM* – globālās pozicionēšanas modulis;
- *IIM* – informācijas izvades modulis;
- *DGM* – datu glabāšanas modulis;
- *MKTVM* – mašīnista kontrollera vadības modulis;
- *MKKM* – mašīnista krāna pozīcijas kontroles modulis
- *EPVM* – elektropneimatisko vārstu modulis (elektriskā daļa);
- *AMN* – analogie manometri (elektriskā daļa);
- *GKM* – galvenā kontrollera modulis.

Mehāniskie un pneimatiskie bloki (3. att. attēloti ar dzeltenu):

- *BMP* – jauni bremžu maģistrāles posmi un to savienojumi (att. 3. att. atzīmēti ar raustītu līniju);
- *EPVM* – elektropneimatisko vārstu modulis (mehāniskā daļa);
- *AMN* – analogie manometri (mehāniskā daļa);
- *DrVM* – drošības vārstu modulis;
- *AVM* – avārijas ventiļu modulis.

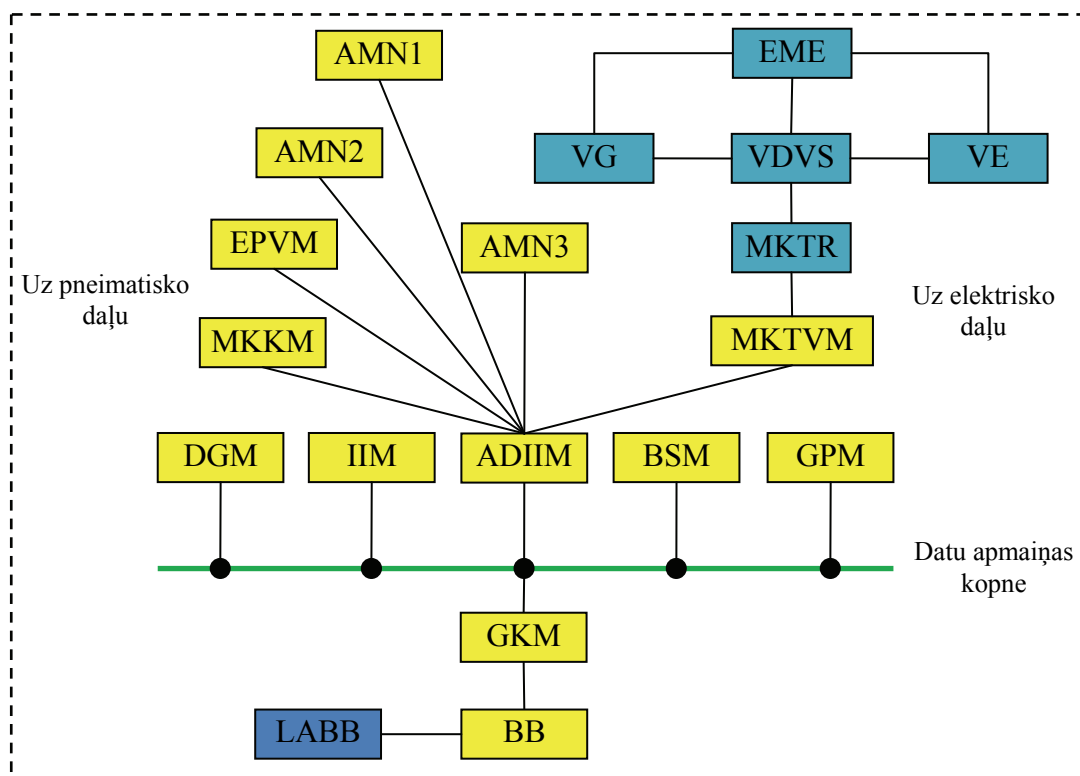


2. att. APBS sistēmas elektrisko elementu kopējā blokshēma

Pie ceturtās sistēmas elementu pamatdaļas, pieder *PLC* vadības programma, kas nosaka izmantotā *PLC* funkcionēšanas algoritmu. Šīs programmas galvenās sastāvdaļas, atbilstoši risināmajam uzdevumam, iespējams iedalīt sekojoši:

- Inicializācijas apakšprogramma;
- Globālās pozicionēšanas datu apstrādes apakšprogramma;
- Bezvadu sakaru datu apmaiņas apstrādes apakšprogramma;
- *PLC* ieeju informācijas apakšprogramma;
- Iegūto datu apstrādes apakšprogramma, pielietojot adaptīvos vadības algoritmus ar to pašapmācības elementiem;
- *PLC* izeju vadības apakšprogramma (tai skaitā tādu perifēro elementu vadībā, kā teksta displeji).

Adaptīvas datu apstrādes apakšprogramma paredz adaptīvu meklēšanas algoritmu pielietojumu, kas dod iespēju realizēt piedāvājamā sistēmas efektīvāku pašapmācību tās funkcionēšanas laikā, analizējot mašīnista darbu ar bremžu sistēmu un vadības signālu ģenerēšanu ārējo izpildorgānu kontrolei.



3. att. APBS sistēmas mehānisko un pneimatisko sastāvdaļu kopējā blokshēma

### Izstrādātā mērķa funkcija un izvirzītā hipotēze

Tiek izvirzīts pieņēmums, ka, pielietojot *APBS* sistēmu, ir iespējams uzlabot un automatizēt dzelzceļa transporta automātiskās bremzēšanas procesu.

*APBS* sistēmas darbības mērķa funkcija tiek izteikta kā atsevišķu kritēriju kopa. Svarīgākie uzstādītā uzdevuma atrisināšanas kritēriji ir sekojoši:

- $S_{obj}$  – attālums līdz objektam pirms kura ir jāapstājas vai jāsasniedz uzdotais ātrums;
- $BM_{gs\_max}$  – Bremžu maģistrāles maksimālā gaisa spiediena  $BM_{gs}$  kritērijs (nosaka maksimālo bremžu maģistrāles gaisa spiediena  $BM_{gs}$  vērtību);
- $BM_{gs\_izm\_atr}$  – Bremžu maģistrāles gaisa spiediena  $BM_{gs}$  izmaiņas ātruma kritērijs (nosaka bremžu maģistrāles gaisa spiediena  $BM_{gs}$  izmaiņas ātruma vērtību);
- $V_{vilc\_max}$  – Maksimālā vilciena kustības ātruma kritērijs (nosaka maksimālo vilciena kustības ātrumu esošajā ceļa posmā konkrētajos darba apstākļos);
- $t_{adapt}$  – *APBS* sistēmas adaptācijas laika kritērijs (nosaka cik ilgā laikā *APBS* sistēma spēj noteikt vilciena parametrus pēc ieejas datu saņemšanas).

Atbilstoši noteiktajiem kritērijiem, uzdevuma mērķa funkcija ir

$$S_{obj} = GKM_1(DP_{in}, DR_{in}, DGKM_{out}) \xrightarrow{\Omega} \min. \quad (1)$$

Mērķa funkcijas ierobežojumu kopa ir

$$\Omega: \begin{cases} V_{beig} = V_{merk} \\ BM_{gs} \leq BM_{gs\_max} \\ BM_{gs\_izm\_atr\_min} < BM_{gs\_izm\_atr} < BM_{gs\_izm\_atr\_max} \\ BM_{gs} \\ V_{vilc} \leq V_{vilc\_max} \\ t_{adapt} \leq (t_4 - t_2) \end{cases}, \quad (2)$$

kur  $V_{beig}$  – faktiskais vilciena  $V$  ātrums pēc bremzēšanas procesa pabeigšanas,  $V_{merk}$  – uzdotais vilciena  $V$  ātrums pēc bremzēšanas procesa pabeigšanas,  $BM_{gs\_max}$  – maksimālais atļautais gaisa spiediens bremžu maģistrālē  $BM$ ,  $BM_{gs\_izm\_atr\_max}$  – maksimālais gaisa spiediena izmaiņas ātrums bremžu maģistrālē  $BM$ ,  $BM_{gs\_izm\_atr\_min}$  – minimālais gaisa spiediena izmaiņas ātrums bremžu maģistrālē  $BM$  izpildot vilciena dienesta bremzēšanu un  $t_{adapt}$  – APBS sistēmas adaptācijas laiks.

Adaptācijas algoritma kvalitātes novērtēšanas funkcija arī tiek izteikta kā atsevišķu kritēriju kopa. Svarīgākie uzstādītie kritēriji ir sekojoši:

- $M$  – vilciena vidējās vagona masas noteikšanas kļūdas kritērijs;
- $N$  – vilciena vagonu skaita noteikšanas kļūdas kritērijs,
- $K$  – spiedspēka uz vienu bremžu kluci noteikšanas kļūdas kritērijs,

Adaptācijas algoritma kvalitātes novērtēšanas funkcija ir

$$Q = \begin{cases} M = |m_{vag} - m_{vag\_f}| \longrightarrow \min \\ N = |n_{vag} - n_{vag\_f}| \longrightarrow \min \\ K = |k_k - k_{k\_f}| \longrightarrow \min \end{cases}, \quad (3)$$

kur  $m_{vag\_f}$  – faktiskā vagona masa,  $n_{vag\_f}$  – faktiskais vagonu skaits un  $k_{k\_f}$  – faktiskais spiedspēks uz vienu bremžu kluci.

Adaptācijas algoritma kvalitātes novērtēšanas normalizētā funkcija ir

$$Q = \alpha_1 M' + \alpha_2 N' + \alpha_3 K' \longrightarrow \min, \quad (4)$$

kur  $\alpha_1$  – vilciena vagonu skaita noteikšanas kļūdas kritērija koeficients,  $\alpha_2$  – vilciena vidējās vagonu masas noteikšanas kļūdas kritērija koeficients,  $\alpha_3$  – spiedspēka uz vienu bremžu kluci noteikšanas kļūdas kritērija koeficients,  $M' = \frac{M_{max} - M}{M_{max} - M_{min}}$  – vilciena vidējās

vagona masas noteikšanas kļūdas kritērijs,  $N' = \frac{N_{max} - N}{N_{max} - N_{min}}$  – vilciena vagonu skaita

noteikšanas kļūdas normalizētais kritērijs un  $K' = \frac{K_{max} - K}{K_{max} - K_{min}}$  – spiedspēka uz vienu

bremžu kluci noteikšanas kļūdas normalizētais kritērijs.

Turklāt tiek ievērota sekojoša sakarība

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1. \quad (5)$$

Adaptīvo meklēšanas algoritmu mērķa funkcijas aprēķina iterāciju un normālklūdas varbūtības aprēķināšanai, kā vienkāršāko un laika resursu ziņā piemērotāko promocijas darba autors piedāvā izmantot normālsadalījuma likumu. Normālsadalījums ir viens no nozīmīgākajiem varbūtības sadalījumiem, jo ir pierādīts, ka normālsadalījumā aptuveni 68 % visu elementu atrodas vienas standartnovirzes attālumā no aritmētiskā vidējā, apmēram 95 % visu elementu atrodas divu standartnoviržu attālumā no aritmētiskā vidējā, bet trīs standartnoviržu attālumā atrodas 99,7 % visu elementu [103].

Analizējot izstrādāto mērķa funkcijas kritērijus, promocijas darba autors izvirza sekojošas pamathipotēzes:

- *APBS* sistēma spēj noteikt vilciena un tā bremžu sistēmas parametrus:  
 H01 hipotēze:  $m_{vag\_teor} = m_{vag\_fakt}$ ,  $n_{vag\_teor} = n_{vag\_fakt}$ ,  $k_{k\_teor} = k_{k\_fakt}$  ;  
 H11 hipotēze:  $m_{vag\_teor} \neq m_{vag\_fakt}$ ,  $n_{vag\_teor} \neq n_{vag\_fakt}$ ,  $k_{k\_teor} \neq k_{k\_fakt}$  .
- *APBS* sistēma spēj automātiski to apturēt vilcieni maksimāli tuvu uzdotajam apstāšanās punktam:  
 H02 hipotēze:  $X_{apst\_teor} = X_{apst\_fakt} \pm kluda$  ;  
 H12 hipotēze:  $X_{apst\_teor} \neq X_{apst\_fakt} \pm kluda$  .
- Izvēlētie adaptīviem meklēšanas algoritmi (skat. promocijas darba nodaļu 2.3.) pēc savas veikspējas ir efektīvāki par vienkāršu pārlasīšanas algoritmu un spēj noteikt mērķa funkcijas minimumu ar mazāku iterāciju skaitu  $i_{sk}$  :  
 H03 hipotēze:  $i_{sk}^{adapt} < i_{sk}^{parlas}$  ;  
 H13 hipotēze:  $i_{sk}^{adapt} \geq i_{sk}^{parlas}$  .
- Algoritma nr. 4 meklēšanas iterāciju skaits un normālklūda būs mazāki nekā algoritmam nr. 2 (hipotēze izteikta pēc provizoriskiem testēšanas rezultātiem)::  
 H04 hipotēze:  $i_{sk}^{4.a\lg\ oritms} < i_{sk}^{2.a\lg\ oritms}$  ;  
 H14 hipotēze:  $i_{sk}^{4.a\lg\ oritms} \geq i_{sk}^{2.a\lg\ oritms}$  .

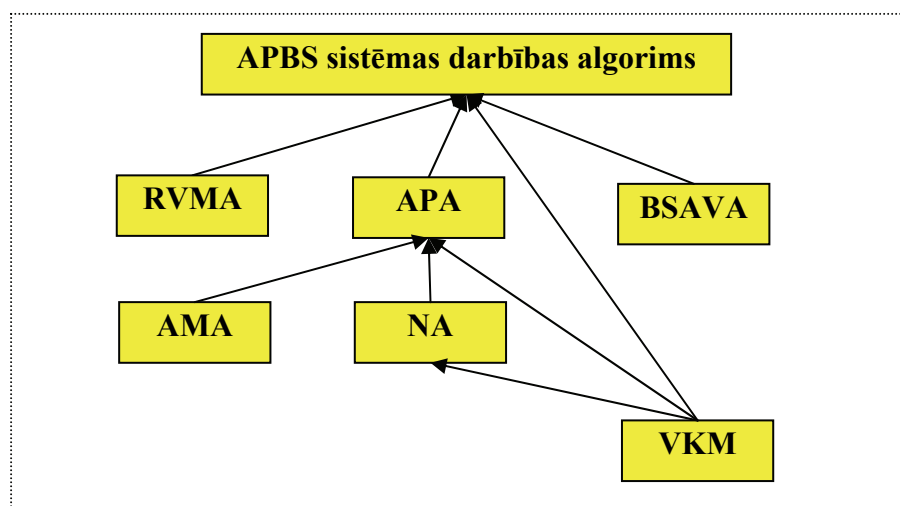
## IZSTRĀDĀTIE *APBS* SISTĒMAS ELEMENTU DARĪBAS ALGORITMI

*APBS* sistēmas kopējais darbības algoritms sastāv no sekojošiem apakšalgoritmiem un funkcijām:

- *RVMA* – ritošo vienību mijiedarbības algoritms ar citiem sistēmas elementiem, pēc kura tiek nodrošināta datu apmaiņu starp konkrēto *APBS* un citiem dzelzceļa sistēmas elementiem (citas *APBS*, *GVC*, *DC*, *ST*, *PB* u.tt.);
- *APA* – adaptīvas pašapmācības algoritms, pēc kura tiek nodrošināta vilciena mainīgo fizisko parametru noteikšanas procesu (sīkāk aprakstīts promocijas darba nodaļā 2.2);
- *AMA* – adaptīvas meklēšanas algoritms, pēc kura tiek nodrošināta vilciena mainīgo fizisko parametru noteikšanai ierobežotā laika posmā (sīkāk aprakstīts promocijas darba nodaļā 2.3);
- *NA* – modelējamo parametru precizitātes novērtēšanas algoritms, kas kalpo *AMA* algoritmā noteikto parametru vērtību novērtēšanai salīdzinot ar faktiskajām;

- *BSAVA* – Vilciena bremžu sistēmas automātiskās vadības algoritms, kas kalpo vilciena bremžu sistēmas automātiskai vadībai, pielietojot *EPVM* atbilstoši *APBS* vadības signāliem un dzelzceļa transporta vadības normām (sīkāk aprakstīts promocijas darba nodaļā 2.5);
- *VKM* – Vilciena kustības modelis, kas nodrošina teorētisko datu modelēšanu *APA* un *AMA* funkcionēšanas gaitā (sīkāk aprakstīts promocijas darba nodaļā 2.4).

Šo apakšalgoritmu un funkciju mijiedarbības blokshēma ir redzama sekojošā attēlā.



4. att. Kopējā *APBS* sistēmas darbības algoritma struktūra

*APBS* sistēma funkcionē divos galvenajos režīmos:

1. *APBS* sistēmas pašapmācība un adaptācija;
2. Vilciena bremžu sistēmas automātiskā vadība ar *APBS* sistēmas palīdzību.

*APBS* sistēmas kopējais darbības algoritms satur sekojošus pamatsoļus:

1. Solis – pēc barošanas sprieguma pieslēgšanas, tiek ieslēgts *APBS* sistēmas *GKM* ;
2. Solis – uzreiz pēc *GKM* ieslēgšanas, tiek veiktas sekojošas funkcijas:
  - Tiek pārbaudīta globālās pozicionēšanas sistēmas signāla esamība, izmantojot *GPM* ;
  - Tiek pārbaudīta bezvadu sakaru nodibināšana, izmantojot *BSM* ;
  - Tiek pārbaudīta signālu saņemšana no ārējiem devējiem (*AMN*, *MKTVM*, *MKKM* );
  - Tiek izvadīta informācija uz *IIM* par iepriekšējos punktos noteiktajiem datiem.
3. Solis – ja iepriekšējā solī saņemtie dati ir korekti, *APBS* turpina savu darbību dienesta režīmā, pretējā gadījumā atkārtoti tiek veikts solis nr. 1. Ja pēc vairākiem mēģinājumiem solī nr. 1 netiek saņemti visi aprakstītie dati, *APBS* sistēma atslēdzas un uz *IIM* tiek izvadīts kļūdas ziņojums.
4. Solis – izmantojot informāciju no datubāzes *DB*, *GKM* nosaka sekojošus vilciena identifikācijas parametrus:
  - *DINIT* – vilciena identifikācijas numurs (*n*), vilciena tipa numurs (*n*), maršruta (ceļa posma) numurs (*n*).

5. Solis – izmantojot *APBS* sistēmas ārējos devējus (*GPM*, *MKTVM*, *MKKM* un *AMN*), tiek uzsākta sekojošu parametru datu kopu fiksācija dienesta datu bāzes sastādīšanai:
  - $V_{vilciena}(t)$  – vilciena kustības ātrums ( $km/h$ );
  - $X_{vilciena}(t)$  – vilciena atrašanās vietas ģeogrāfiskais platums ( $^{\circ}$ );
  - $Y_{vilciena}(t)$  – vilciena atrašanās vietas ģeogrāfiskais garums ( $^{\circ}$ );
  - $VRN(t)$  – vilces režīma numurs ( $n$ );
  - $BRN(t)$  – bremzēšanas režīma numurs ( $n$ );
  - $BrM_{gs}(t)$  – gaisa spiediens bremžu maģistrālē  $BrM$  ( $atm$ );
  - $BM_{gs}(t)$  – gaisa spiediens barošanas maģistrālē  $BM$  ( $atm$ );
  - $BC_{gs}(t)$  – gaisa spiediens lokomotīves bremžu cilindros  $BC$  ( $atm$ ).
6. Solis – no datu bāzes *DB*, izmantojot elektroniskās maršruta kartes *MKRT* un iepriekšējā solī iegūtos datus par vilciena atrašanās vietu, tiek noteikti esošā dzelzceļa posma parametri:
  - $i_{prom}$  – dzelzceļa posma profila stāvums ( $\%$ );
  - $V_{vile\_max}$  – maksimālais vilciena kustības ātrums esošajā ceļa posmā ( $km/h$ );
  - $N_{cp}$  – ceļa posma numurs ( $n$ ).
7. Solis – vadības centram *GVC*, izmantojot bezvadu sakaru moduli *BSM*, tiek nosūtīta informācija par vilciena kustības parametriem (kas noteikti algoritma soļos nr. 4 un nr. 5);
8. Solis – izmantojot bezvadu sakaru moduli *BSM*, no galvenā vadības centra *GVC* tiek saņemta informācija par tuvākajiem dzelzceļa transporta sistēmas objektiem:
  - $VIN_{uv}$  – tuvākā vilciena maršrutā identifikācijas numurs ( $n$ );
  - $DC_{uv}$  – tuvākā dispečeru centra *DC* maršrutā identifikācijas numurs ( $n$ );
9. Solis – izmantojot iepriekšējā algoritma solī saņemtos identifikācijas numurus, izmantojot *BSM*, tiek nodibināta datu apmaiņa starp tuvākajiem vilcieniem pēc *RVMA* algoritma, kas aprakstīts literatūrā [105]);
10. Solis – vilciens uzsāk kustību. Turpinājumā *APBS* sistēmas kopējais darbības algoritms paredz divus dažādus funkcionēšanas plānus (mašīnists veic bremzēšanas mēģinājumu, pēc kustības uzsākšanas, vai arī neveic).
11. Solis – ja mašīnists veic bremzēšanas mēģinājumu, nākamajā algoritma solī tiek izsauks, pretējā gadījumā tiek izpildīts algoritma solis nr. 13.
12. Solis – *APA*, izmantojot *AMA*, *NA* un *VKM*, nosaka vilciena fiziskos parametrus un vilciens var turpināt kustību, līdz momentam, kad radīsies nepieciešamība to apturēt. Algoritms pāriet solī nr. 17.
13. Solis – ja mašīnists neveic bremzēšanas mēģinājumu, tiek pārbaudīts nosacījums, vai vilciena ātrums  $V_{vilciena}$  pārsniedz uzstādīto drošības ātruma  $V_{drošibas}$  vērtību. Ja nosacījums izpildās, algoritms pāriet nākamajā solī.
14. Solis – tiek izsaukts *BSAVA*, kas realizē automātisku dienesta bremzēšanas pakāpi līdz pilnīgai bremžu nostrādei.
15. Solis – tajā pat laikā *APA*, izmantojot *AMA*, *NA*, *VKM*, nosaka vilciena fiziskos parametrus.

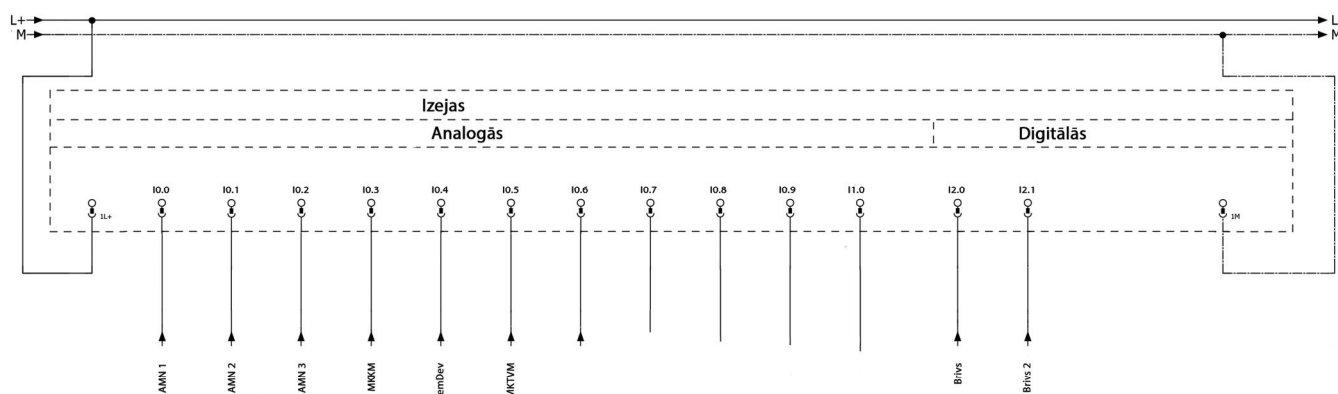
16. Solis – *BSAVA*, pēc tam kad ir fiksēta pilnīga bremžu nostrāde, realizē bremžu atlaišanu.
17. Solis – *APBS* sistēma, izmantojot iegūtos datus, *VKM* un datus *MKRT*, pastāvīgi aprēķina teorētisko vilciena bremzēšanas ceļu  $S_{bremz\_teor}$ .
18. Solis – tajā pat laikā *APBS* sistēma, izmantojot *RVMA*, *GPM*, *MKRT* nosaka iespējamo distanci  $S_{dist}$ , līdz tuvākajam objektam maršrutā, kas pieprasa vilciena apturēšanu vai tā ātruma samazināšanu;
19. Solis – ja  $S_{bremz\_teor} > S_{dist}$ , galvenais *APBS* sistēmas darbības algoritms izsauc *BSAVA*, kas realizē automātisku dienesta bremzēšanas pakāpi.
20. Solis – šajā momentā tiek atkārtoti veikta *APBS* sistēmas pašapmācība, un algoritms izpilda soļus nr. 11 un nr. 12.
21. Solis – momentā, kad aprēķinātais bremzēšanas ceļš  $S_{br\_2pak}$  ir vienāds ar attālumu līdz tuvākajam objektam, kas pieprasa vilciena *V* apturēšanu, izmantojot *BSAVA* (vilciena bremžu sistēmas automātiskās vadības algoritms) tiek uzsākta vilciena *V* automātiskā bremzēšana.
22. Solis – pēc vilciena *V* pilnīgas apstāšanās, algoritms pariet solī nr. 7.

Sistēma turpina izpildīt aprakstītos algoritma soļus līdz momentam, kad *GKM* tiek atslēgts barošanas spriegums. Pārējo algoritmu sīkāk izklāsts ir atrodams promocijas darba pilnajā versijā.

## **APBS SISTĒMAS ELEMENTU ELEKTRISKO UN PNEIMATISKO SHĒMU IZSTRĀDE**

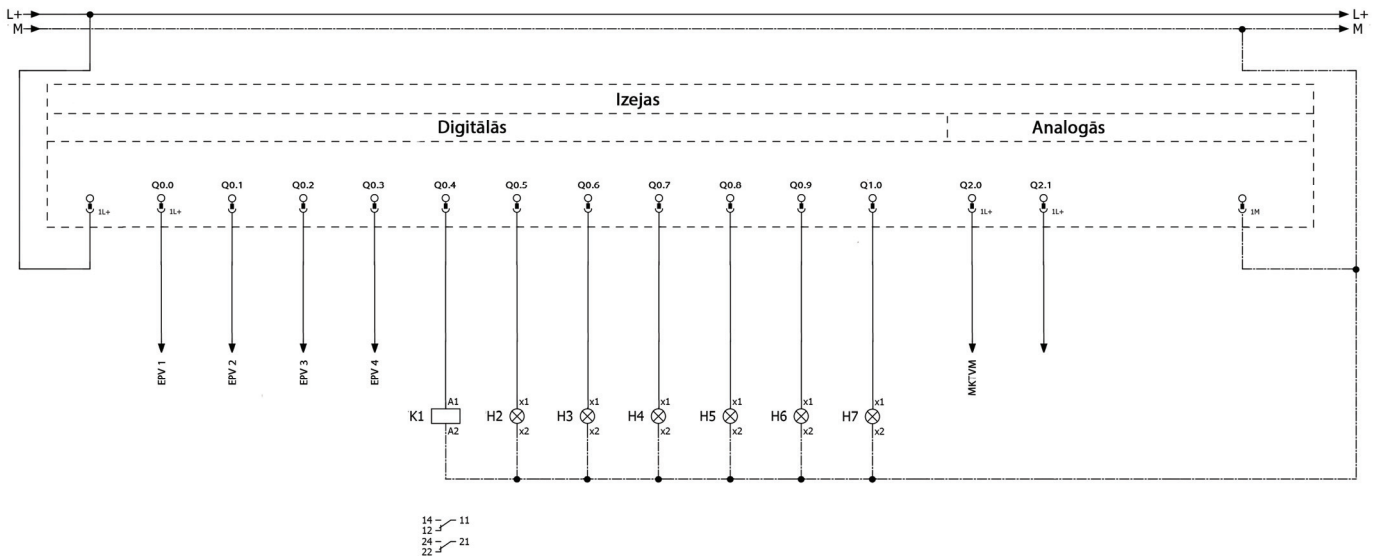
Šajā promocijas darba nodaļā autors apraksta *APBS* sistēmas elementu galvenās slēgumu shēmas, kas tika izmantotas *APBS* sistēmas iekārtu prototipu izstrādē.

Darba turpinājumā (5. att.) ir atspoguļota *IIM* ieeju pieslēguma shēma, kas attēlo *IIM* analogo un digitālo ieeju konfigurāciju un tām pieslēgto elementu sarakstu.



5. att. *IIM* moduļa ieeju pieslēguma shēma

Savukārt *IIM* izeju pieslēguma shēma ir attēlota 6. att. Shēma paredz vairāku elektropneimatisko vārstu, kā arī vadības releju un *APBS* sistēmas darbības indikācijas lampu pieslēgšanu.

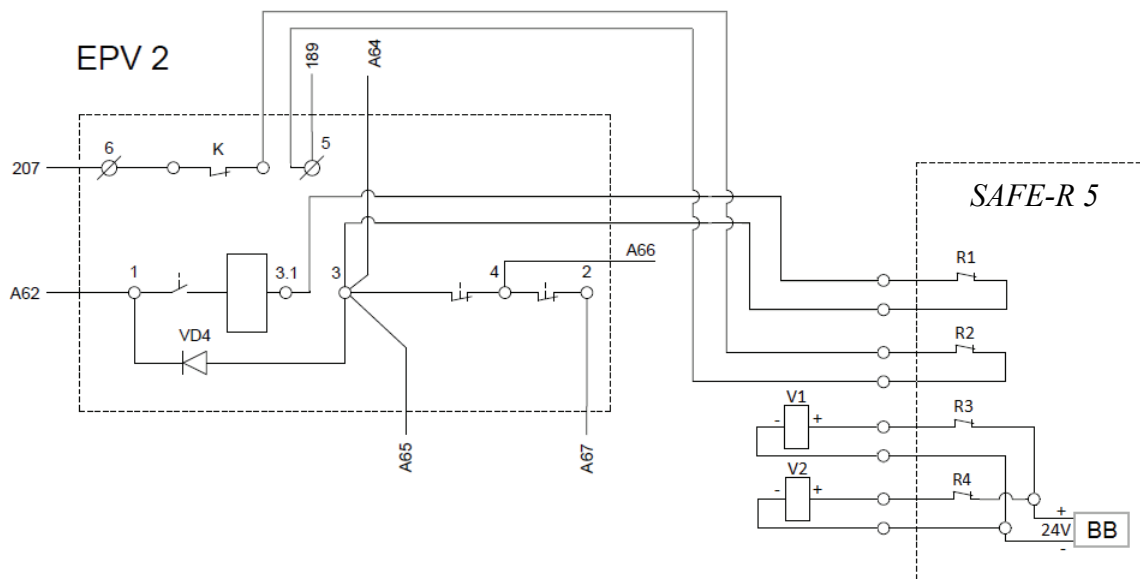


6. att. IIM moduļa izeju pieslēguma shēma

Savukārt 7. att. ir redzama iekārtas *SAFE-R 5* pieslēguma shēma lokomotīves *M-62* pneimatisko bremžu vadības shēmai ar mērķi realizēt avārijas bremzēšanas režīmu. Ar releja *R1* palīdzību tiek palaists avārijas bremzēšanas režīms, savukārt ar releja *R2* darba kontaktiem tiek pārtraukta vilces režīma barošanas ķēde.

Tupinājumā 8. att. ir redzama pneimatisko elementu slēgumu shēma, pēc kuras tika veikts *APBS* sistēmas iekārtas *SAFE-R 5* prototipa pieslēgums lokomotīvē, veicot tās eksperimentālo testēšanu reālajos darba apstākļos. Dotā shēma atbilst lokomotīves *M-62* pneimatisko bremžu vadības shēmai, ar sekojošiem papildus elementiem:

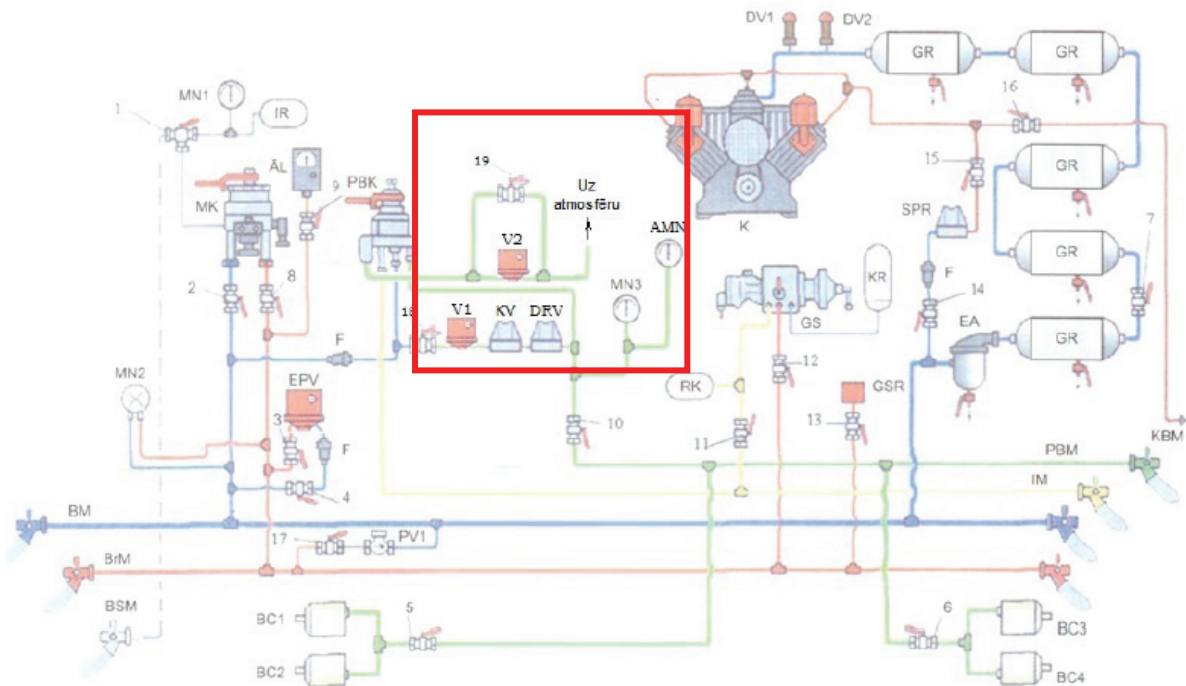
- *V1, V2* – elektropneimatiskie vārsti;
- *I8, I9* – drošības ventiļi;
- *DRV* – drošības vārsts;
- *AMN* – analogais manometrs.



7. att. Lokomotīves *EPV* pieslēgšanas shēma

Ekonomisko apsvērumu dēļ, praktiskajos eksperimentos nebija iespējas veikt *APBS* sistēmas testēšanu veselam vilciena sastāvam ar vairākiem vagoniem, līdz ar ko izveidotā

shēma paredz tikai lokomotīves pneimatisko bremžu vadību, jo sistēmas pieslēgums tiek veikts paralēli palīgbremžu krānam *PBK*, nevis mašīnista krānam *MK*.



8. att. Pneimatiskā *APBS* sistēmas elementu pieslēgšanas shēma

## PIEDĀVĀJAMĀS *APBS* SISTĒMAS UN TĀS VADĪBAS ALGORITMU EKSPERIMENTĀLĀ TESTĒŠANA

### Izstrādāto *APBS* sistēmas darbības algoritmu testēšana laboratorijas apstākļos

Šajā promocijas darba nodaļā autors apraksta veiktos eksperimentus laboratorijas apstākļos. Šajos eksperimentos tika izmantots *VKM* datormodelis, izvēlētie adaptīvie meklēšanas algoritmi un metodes. Eksperimentu rezultātā tika iegūtas datu kopas tālākai to statistiskai analīzei, kuras mērķis ir atklāt efektīvākos meklēšanas algoritmus un pierādīt kopējo *APBS* sistēmas funkcionēšanas spēju, kā arī izcelt iespējamās nepilnības.

Tabulā 2. redzamo algoritmu saraksts satur sekojošus meklēšanas algoritmus un metodes (sīkāk tie ir aprakstīti otrajā promocijas darba nodaļā):

1. Algoritms – Pārlasīšanas metode;
2. Algoritms – Labākā mēģinājuma metode;
3. Algoritms – Gadījuma meklēšanas metode ar noteiktu meklēšanas rādiusu un gadījuma virzienu;
4. Algoritms – Kombinētā labākā mēģinājuma metode ar pārlasīšanu beigu posmā;
5. Algoritms – Ģenētiskais algoritms;
6. Algoritms – Metode ar atgriešanos neveiksmīga soļa gadījumā;
7. Algoritms – Gausa-Zeideļa metode;
8. Algoritms – Monte-Karlo metode.

Kā redzams, pirmā algoritma vietā ir atzīmēta vienkārša pārlasīšanas metode. Ar šīs metodes palīdzību vienmēr ir iespēja atrast mērķa funkcijas meklējamo minimumu, taču šāda

metode raksturojama ar lielu mašīnlaika patēriņu, jo mērķa funkcijas aprēķina iterāciju skaits ir praktiski maksimāli iespējamais. Pārējo algoritmu izmantošanas mērķis ir atrast mērķa funkcijas minimumu ar mazāku iterāciju skaitu.

Veicamajos eksperimentos tiek izmantoti sekojoši ieejas dati:

- $m_{\text{vag\_fakt}}$  – vilciena vagona vidējā faktiskā masa, t;
- $n_{\text{vag\_fakt}}$  – vilciena vagonu faktiskais skaits, n;
- $k_{\text{k\_fakt}}$  – bremžu kluču vidējais faktiskais spiedspēks, kN;
- $V_{\text{vilciena}}$  – vilciena faktiskais ātrums, km/h.

Minēto eksperimentu veikšanai, šiem ieejas datiem tiek izvēlētas sekojošas vērtības:

1. tabula

**Eksperimentu ieejas datu vērtības**

| Parametri              | Vērtības |     |     |     |     |    |     |     |     |
|------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
|                        | 1.       | 2.  | 3.  | 4.  | 5.  | 6. | 7.  | 8.  | 9.  |
| $m_{\text{vag\_fakt}}$ | 20       | 40  | 60  | 80  | 100 |    |     |     |     |
| $n_{\text{vag\_fakt}}$ | 2        | 10  | 20  | 40  | 60  |    |     |     |     |
| $k_{\text{k\_fakt}}$   | 1        | 1,4 | 1,8 | 2,2 | 2,6 | 3  | 3,4 | 3,8 | 4,2 |
| $V_{\text{vilciena}}$  | 20       | 40  | 60  | 80  | 100 |    |     |     |     |

Ar dzeltenu krāsu atzīmētas parametru vērtības, kas turpinājumā tiek uzskatītas par mazām, ar zilo krāsu vērtības, kas tiek uzskatītas par vidējām, bet ar sarkano krāsu vērtības, kas tiek uzskatītas par lielām.

Kopējo eksperimentu skaitu nosaka visu iespējamo parametru vērtību kombināciju skaits, ievērojot sekojošus izņēmumus:

- Ja  $3,8kN \leq k_k$ , tad  $m_{\text{vag}} \geq 60t$ ;
- Ja  $2,3kN \leq k_k$ , tad  $m_{\text{vag}} \geq 35t$ .

Tādējādi kopējais kombināciju skaits ir 925. Sakarā ar meklēšanas algoritmu gadījuma raksturu, ir jāiegūst statistika no katra eksperimenta vairākiem mēģinājumiem (izvēlētais mēģinājumu skaits 10), līdz ar ko kopējais eksperimentu skaits vienam algoritmam ir vienāds ar 9250.

Pārlasīšanai izvēlēta minimālā soļa vērtība katram parametram:

- $\Delta n_{\text{vag}} = 1$ ;
- $\Delta m_{\text{vag}} = 1$ ;
- $\Delta k_k = 0.1$

Tas savukārt nozīmē to, ka kopējais kombināciju skaits vienam eksperimentam ir 280000.

Katra eksperimenta rezultātā tiek iegūta datu tabula (2. tabula), kas satur sekojošus ieejas datus (atzīmēti ar dzeltenu):

- Algoritma numurs – testējamā algoritma kārtas skaitlis, kas atbilst konkrētajam izvēlētajam meklēšanas algoritmam;
- Lielumi  $m_{\text{vag\_fakt}}, n_{\text{vag\_fakt}}, k_{\text{k\_fakt}}, V_{\text{vilciena}}$  – dotās vilciena fizisko parametru vērtības;
- $S_{\text{br\_fakt}}$  – aprēķinātais faktiskais vilciena bremzēšanas ceļš atbilstoši izvēlētajiem vilciena fiziskajiem parametriem.

Datu tabula satur arī sekojošus izejas datus (atzīmēti ar zilu):

- Lielumi  $m_{vag\_mod}$ ,  $n_{vag\_mod}$ ,  $k_k\_mod$ ,  $V_{vilciena}$  – vilciena fizisko parametru modelētās vērtības;
- $S_{br\_mod}$  – modelētais vilciena bremzēšanas ceļš atbilstoši modelētajiem vilciena fiziskajiem parametriem;
- Iterāciju skaits – mērķa funkcijas aprēķinu skaits, testējamā algoritma ātrdarbības novērtēšanai;
- Kļūda – vidējā kvadrātiskā kļūda starp praktisko un noteikto vilciena kustības parametra līkni (mērķa funkcijas minimums);
- Kopējā kļūda – meklēšanas algoritma darbības precizitātes novērtēšanas parametrs, ko aprēķina izmantojot  $S_{br\_fakt}$  un  $S_{br\_mod}$ .

Datoreksperimentu laikā tiek izveidota MySQL datubāze. Datubāze satur 4 galvenās tabulas.

Pirmā tabula (9. att.) satur datus par veicamajiem eksperimentiem. Tabula satur visu modelējam eksperimentu parametru vērtību kombinācijas, kas tiek izmantotas katra konkrētā eksperimenta veikšanai. Tabula satur sekojošus datus:

- exp – eksperimenta kārtas skaitļa numurs;
- nvag – praktiskais vagonu skaits, kas tiek pieņemts konkrētajā eksperimentā;
- mvag – praktiskā vagonu masa, kas tiek pieņemta konkrētajā eksperimentā;
- kbr – praktiskais bremžu kluču spiedspēks;
- vkmh – vilciena kustības sākuma ātrums.

| Lauks | Tips    | Atribūti | Nulle | Noklusēts |
|-------|---------|----------|-------|-----------|
| exp   | int(11) |          | Nē    | 0         |
| nvag  | int(11) |          | Nē    | 0         |
| mvag  | int(11) |          | Nē    | 0         |
| kbr   | double  |          | Nē    | 0         |
| vkmh  | int(11) |          | Nē    | 0         |

9. att. Eksperimentu datu tabulas truktūra

| exp | nvag | mvag | kbr | vkmh |
|-----|------|------|-----|------|
| 1   | 2    | 20   | 1   | 20   |
| 2   | 2    | 20   | 1   | 40   |
| 3   | 2    | 20   | 1   | 60   |
| 4   | 2    | 20   | 1   | 80   |
| 5   | 2    | 20   | 1   | 100  |
| 6   | 2    | 20   | 1.4 | 20   |
| 7   | 2    | 20   | 1.4 | 40   |
| 8   | 2    | 20   | 1.4 | 60   |
| 9   | 2    | 20   | 1.4 | 80   |
| 10  | 2    | 20   | 1.4 | 100  |
| 11  | 2    | 20   | 1.8 | 20   |
| 12  | 2    | 20   | 1.8 | 40   |

10. att. Eksperimentu datu tabulas fagments

Otrā tabula (11. att.) satur katra konkrētā eksperimenta modelēšanas rezultātus, kas attēlo sekojošus vilciena bremzēšanas parametrus:

- exp – eksperimenta kārtas skaitļa numurs;
- sbr – aprēķinātais praktiskais bremzēšanas ceļš;
- tsag – vilciena bremžu sistēmas sagatavošanas laiks (laiks, kurā vilciena bremžu sistēma sasniedz savu maksimālo bremzēšanas efektivitāti).

| Lauks | Tips    | Atribūti | Nulle | Noklusēts |
|-------|---------|----------|-------|-----------|
| exp   | int(11) |          | Nē    | 0         |
| sbr   | double  |          | Nē    | 0         |
| tsag  | double  |          | Nē    | 0         |

11. att. Modelēšanas datu tabulas struktūra

|       |       | exp | sbr             | tsag |
|-------|-------|-----|-----------------|------|
| Labot | Dzēst | 629 | 1734.6904659692 | 17   |
| Labot | Dzēst | 626 | 116.85075938389 | 15   |
| Labot | Dzēst | 1   | 93.496147612253 | 21   |
| Labot | Dzēst | 2   | 317.51723193215 | 21   |
| Labot | Dzēst | 3   | 695.20703314679 | 21   |
| Labot | Dzēst | 4   | 1222.3485607473 | 21   |
| Labot | Dzēst | 10  | 1530.3722961562 | 21   |
| Labot | Dzēst | 800 | 4069.0737441403 | 21   |
| Labot | Dzēst | 5   | 1878.4114201995 | 21   |
| Labot | Dzēst | 6   | 82.334192373692 | 21   |
| Labot | Dzēst | 7   | 265.06301967427 | 21   |
| Labot | Dzēst | 8   | 568.53552997764 | 21   |
| Labot | Dzēst | 9   | 994.08286044612 | 21   |
| Labot | Dzēst | 11  | 75.790755053279 | 19   |
| Labot | Dzēst | 12  | 234.63774815703 | 21   |

12. att. Modelēšanas datu tabulas fragments

Trešā tabula (13. att.) satur datus par vilciena kustības parametru praktiskās bremzēšanas līknēm, kas tiek iegūtas katrā no eksperimentiem. Tabula satur tādus lielumus kā:

- exp – eksperimenta numurs;
- dt – laika moments;
- acc – vilciena palēninājuma vērtība konkrētajā laika momentā;
- vkmh – vilciena ātruma vērtība konkrētajā laika momentā;
- sp – vilciena nobrauktais bremzēšanas ceļš konkrētajā laika momentā.

| Lauks | Tips    | Atribūti | Nulle | Noklusēts |
|-------|---------|----------|-------|-----------|
| exp   | int(11) |          | Nē    | 0         |
| dt    | float   |          | Nē    | 0         |
| acc   | double  |          | Nē    | 0         |
| vkmh  | double  |          | Nē    | 0         |
| sp    | double  |          | Nē    | 0         |

13. att. Vilciena kustības parametru bremzēšanas līkņu datu tabulas struktūra

| exp | dt | acc                | vknh            | sp              |
|-----|----|--------------------|-----------------|-----------------|
| 176 | 0  | 0                  | 20              | 0               |
| 176 | 1  | 0.00924            | 19.966736       | 5.5463155555556 |
| 176 | 2  | 0.009237738933195  | 19.93348013984  | 11.083393372178 |
| 176 | 3  | 0.0092354801894226 | 19.900232411159 | 16.611235708611 |
| 176 | 4  | 0.0092332237668162 | 19.866992805598 | 22.129844821277 |
| 176 | 5  | 0.0092309696635117 | 19.833761314809 | 27.63922296428  |
| 176 | 6  | 0.0092287178776474 | 19.80053793045  | 33.139372389405 |
| 176 | 7  | 0.0092264684073643 | 19.767322644183 | 38.630295346122 |
| 176 | 8  | 0.040239540263596  | 19.622460299234 | 44.080978762576 |
| 176 | 9  | 0.07267604952614   | 19.36082652094  | 49.458986129504 |
| 176 | 10 | 0.10133409711651   | 18.996023771321 | 54.735659399315 |
| 176 | 11 | 0.12727815236122   | 18.53782242282  | 59.885054516766 |
| 176 | 12 | 0.15127234029977   | 17.993241997741 | 64.883177293916 |
| 176 | 13 | 0.17388945055125   | 17.367239975757 | 69.707410620515 |
| 176 | 14 | 0.17572087534286   | 16.734644824523 | 74.355923071771 |
| 176 | 15 | 0.17763702813293   | 16.095151523244 | 78.826798494895 |

14. att. Vilciena kustības parametru bremsēšanas līkņu datu tabulas struktūra

Ceturtā tabula (15. att.) satur datus par meklēšanas algoritmu darbības rezultātiem. Sakarā ar to, ka visiem adaptācijas algoritmiem piemīt gadījuma raksturs, ir nepieciešams veikt vairākus eksperimentus ar vieniem un tiem pašiem datiem statistikas iegūšanai. Tāpēc tiek ieviests lielums „trial”, kas attēlo katra konkrētā meklēšanas algoritma veicamā eksperimenta mēģinājuma kārtas skaitli. Tabula satur sekojošus datus:

- exp – eksperimenta kārtas skaitlis;
- trial – konkrētā eksperimenta mēģinājuma kārtas numurs;
- alg – algoritma kārtas skaitļa numurs;
- steor – noteiktais bremsēšanas ceļš;
- nvag – noteiktais vagonu skaits;
- nvag – noteiktais vagona masa;
- kbr – noteiktais bremžu kluču spiedspēks;
- iterations – meklēšanas algoritma mērķa funkcijas aprēķina reižu skaits;
- error – vidējā kvadrātiskā kļūda starp praktisko un noteikto vilciena kustības parametra līkni (mērķa funkcijas minimums);
- Total\_error – starpība starp praktisko un aprēķināto bremsēšanas ceļu.

| Lauks       | Tips    | Atribūti | Nulle | Noklusēts |
|-------------|---------|----------|-------|-----------|
| exp         | int(11) |          | Nē    | 0         |
| trial       | int(11) |          | Nē    | 0         |
| alg         | int(11) |          | Nē    | 0         |
| steor       | double  |          | Nē    | 0         |
| nvag        | int(11) |          | Nē    | 0         |
| mvag        | int(11) |          | Nē    | 0         |
| kbr         | double  |          | Nē    | 0         |
| iterations  | int(11) |          | Nē    | 0         |
| error       | double  |          | Nē    | 0         |
| Total_error | double  |          | Nē    | 0         |

15. att. Rezultātu datu tabulas struktūra

| exp | trial | alg | steor           | nvag | mvag | kbr | iterations | error                | Total_error           |
|-----|-------|-----|-----------------|------|------|-----|------------|----------------------|-----------------------|
| 31  | 1     | 5   | 116.81259372711 | 4    | 40   | 1.4 | 101        | 5.9426154167747e-026 | 0                     |
| 46  | 10    | 5   | 90.232626988203 | 7    | 40   | 2.6 | 101        | 6.75116629019e-026   | 0                     |
| 48  | 10    | 5   | 677.29039106487 | 4    | 40   | 2.6 | 101        | 6.638028490252e-024  | 0                     |
| 50  | 8     | 5   | 1916.6809365921 | 13   | 40   | 2.6 | 101        | 7.5209424413032e-024 | -2.2737367544323e-013 |
| 51  | 7     | 5   | 181.21720076483 | 4    | 60   | 1   | 101        | 1.5788073224907e-024 | 0                     |
| 89  | 1     | 5   | 1369.1159847801 | 13   | 60   | 3.8 | 101        | 7.1441698511952e-024 | 0                     |
| 92  | 5     | 5   | 317.98890953165 | 12   | 60   | 4.2 | 101        | 5.9221607268189e-024 | 0                     |
| 98  | 3     | 5   | 2218.7739739594 | 4    | 80   | 1   | 101        | 7.4853736497199e-024 | 0                     |
| 113 | 3     | 5   | 1319.400714267  | 12   | 80   | 2.2 | 101        | 6.4513171046719e-024 | 2.2737367544323e-013  |
| 117 | 10    | 5   | 506.89506803425 | 12   | 80   | 2.6 | 101        | 6.5144095687828e-024 | 0                     |
| 125 | 10    | 5   | 3229.9617197709 | 3    | 80   | 3   | 101        | 5.5545349789069e-024 | 4.5474735088646e-013  |
| 139 | 8     | 5   | 1650.0949929511 | 12   | 80   | 4.2 | 101        | 8.0083593998001e-024 | 4.5474735088646e-013  |
| 9   | 9     | 5   | 994.08286044612 | 11   | 20   | 1.4 | 201        | 6.0703414636609e-024 | 0                     |
| 16  | 4     | 5   | 71.559948730869 | 2    | 20   | 2.2 | 201        | 1.0314262658532e-025 | 0                     |
| 17  | 9     | 5   | 214.59265636532 | 2    | 20   | 2.2 | 201        | 3.392496322903e-024  | 0                     |
| 34  | 6     | 5   | 1787.6680512332 | 9    | 40   | 1.4 | 201        | 7.9278097594011e-024 | 0                     |
| 36  | 10    | 5   | 104.3076422113  | 12   | 40   | 1.8 | 201        | 5.5134750843345e-026 | -1.4210854715202e-014 |
| 52  | 6     | 5   | 737.86487634839 | 12   | 60   | 1   | 201        | 3.138231464793e-024  | 0                     |
| 60  | 8     | 5   | 4031.6082724913 | 11   | 60   | 1.4 | 201        | 6.0585855429069e-024 | -2.7284841053188e-012 |

16. att. Rezultātu datu tabulas fragments

### Izstrādāto iekārtu prototipu testēšana reālajos darba apstākļos

*APBS* sistēmas iekārtu prototipu testēšana reālajos darba apstākļos notiek vairākos posmos, testējot dažādas *APBS* sistēmas darba funkcijas un iekārtu prototipu mezglus atsevišķos eksperimentos. Tiek testētas gan *APBS* sistēmas galvenās funkcijas (adaptīva un precīza vilciena bremsēšana), gan arī papildus funkcijas, kuras arī tiek paredzēts izmantot sistēmā (piemēram, vilciena apturēšana avārijas bremsēšanas režīmā).

Minēto iekārtu prototipu testēšana notiek gan izmantojot *VAS LDz* standus, gan reālos darba apstākļos stacija „*Bolderāja*”, ar lokomotīvi *M62* un ceļa mašīnu *ADM1*.

Šajos eksperimentos tiek izmantoti iekārtu *SAFE – R5*, *SAFE – R6* un *SAFE – R7* prototipi, kuru nosaukumi ir radušies vēsturiski no iepriekšējiem *RTU* zinātnieku pētījumiem, taču funkcijas katrā no iekārtu sērijām (ko apzīmē cipars iekārtas prototipa nosaukumā) tiek ievērojami mainītas un papildinātas (iekārtu prototipu agrāko versiju izstrādes un funkcionēšanas nosacījumi plaši aprakstīti literatūrā [106, 107]).

Šajos iekārtu prototipos par *GKM* kalpo *Siemens* firmas programmējamie loģiskie kontrolleri un to perifērās iekārtas.

Izvēlētā *PLC* centrālā procesora pieslēgšanai datoram vai programmatoram tiek izmantots *PC/PPI* kabelis, *USB/PPI* (*Universal Serial Bus* – universālā seriālā kopne/*Programmable Peripheral Interface* – programmējamo perifēro iekārtu interfeiss) kabelis, komunikācijas procesori *CP 5511*, *CP 5611*, *PCMCIA* – *Personal Computer Memory Card International Association* – karte, *PCI* – *Peripheral component interconnect* – perifēro iekārtu mijiedarbība – karte ar *IMP* kabeli, kā arī iebūvēti *SIMATIC* programmatoru interfeisi.



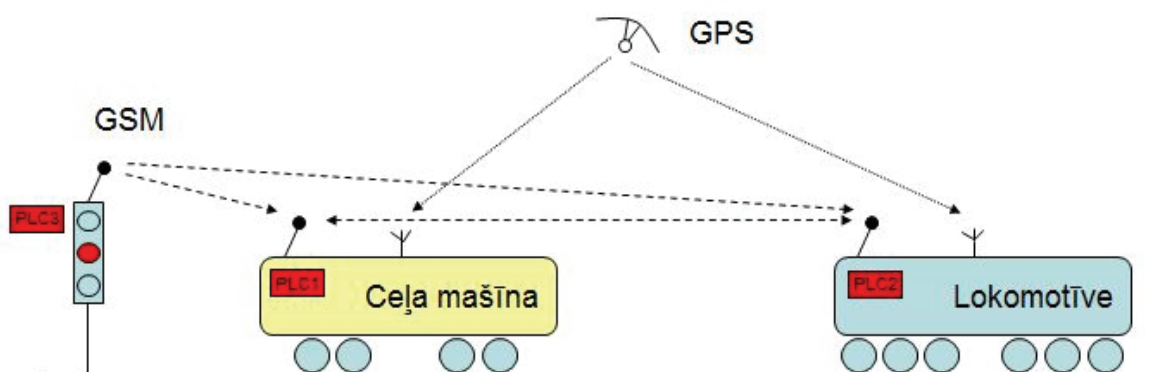
17. att. *SAFE-R 5* iekārtas prototipa pneimatiskās daļas pieslēgums lokomotīvē *M62*

### **Eksperimenti reālajos darba apstākļos**

Promocijas darba turpinājumā šim eksperimentam tiek piešķirts kārtas skaitlis nr. 1.

Atbilstoši demonstratoru testēšanas programmai [102], eksperimentā nr. 1 tiek izmantoti iekārtu *SAFE – R5*, *SAFE – R6* un *SAFE – R7* prototipi. Tie attiecīgi pilda 18. att. redzamo bloku *PLC1*, *PLC2* un *PLC3* lomu. Eksperimenta norises laikā tiek pārbaudīts, vai visi minēto iekārtu prototipi, mijiedarbojoties savā starpā, spēj izpildīt sekojošas galvenās funkcijas:

- Spēj automātiski apstādināt lokomotīvi pirms izlidošā luksofora gaismas signāla, izmantojot ekstrēmās bremsēšanas režīmu. Lokomotīves apstāšanās punkts ir paredzēts 50 m no stacijas „Bolderāja” ieejas luksofora;
- Spēj automātiski apstādināt lokomotīvi pirms ceļa mašīnas, izmantojot avārijas bremsēšanas režīmu. Lokomotīves apstāšanās punkts ir paredzēts 150 m no ceļa mašīnas;
- Spēj automātiski apstādināt ceļa mašīnu pirms stacijas „Bolderāja” izlidošā ieejas luksofora gaismas signāla, izmantojot avārijas bremsēšanas režīmu;
- Spēj automātiski apstādināt ceļa mašīnu pirms lokomotīves, izmantojot avārijas bremsēšanas režīmu;
- Spēj nodrošināt savstarpējo datu apmaiņu izmantojot *GSM* sakaru kanālu;
- Spēj noteikt kustīgo vienību atrašanās vietu telpā, izmantojot *GPS* u. c. funkcijas.



18. att. Eksperimenta nr. 1. principiālā norises shēma

*APBS* sistēmas iekārtas *SAFE – R5* prototipa elektrobarošanas pieslēgums lokomotīvē notiek izmantojot shēmu (skat. pielikumu nr. 2). Lai būtu iespējams izmantot lokomotīves borta 75V DC spriegumu, iekārtas *SAFE – R5* prototipā speciāli šim nolūkam ir uzstādīts pārveidotājs, kura ieejas spriegums ir no 48V DC līdz 110V DC, bet izejas spriegums atbilst normālam *PLC* darba spriegumam 24V DC. Iekārtas *SAFE – R5* prototipa vadības releja pieslēgums lokomotīves *EPV* vadības shēmai notiek izmantojot shēmu (skat. pielikumu nr. 3). Šajā pieslēgumā tiek izmantoti releja *RI* normāli saslēgtie kontakti nr. 11 un nr. 12. Iekārtas *SAFE – R5* prototipa pieslēgšana lokomotīvē notiek pēc testēšanas programmas instrukcijas punkta 3.1. (skat. literatūru [102]), bet darba gatavība pēc pieslēgšanas procesa pabeigšanas tiek pārbaudīta pēc testēšanas programmas instrukcijas punkta 4.1.

Iekārtas *SAFE – R6* prototipa elektrobarošanas pieslēgums ceļa mašīnā notiek izmantojot shēmu (skat. pielikumu nr. 4). Šajā gadījumā netiek izmantoti jeb kāda veida pārveidotāji, jo ir iespējams veikt pieslēgumu ceļa mašīnas borta spriegumam, kura vērtība ir 24V DC. Iekārtas *SAFE – R6* prototipa vadības releja pieslēgums ceļa mašīnas *EPV* vadības shēmai notiek izmantojot shēmu (skat. pielikumu nr. 5). Šajā pieslēgumā tiek izmantoti releja *RI* normāli saslēgtie kontakti nr. 11 un nr. 12. Iekārtas *SAFE – R6* prototipa pieslēgšana ceļa mašīnā notiek pēc testēšanas programmas instrukcijas punkta 3.2., bet darba gatavība pēc pieslēgšanas procesa pabeigšanas tiek pārbaudīta pēc testēšanas programmas instrukcijas punkta 4.2.

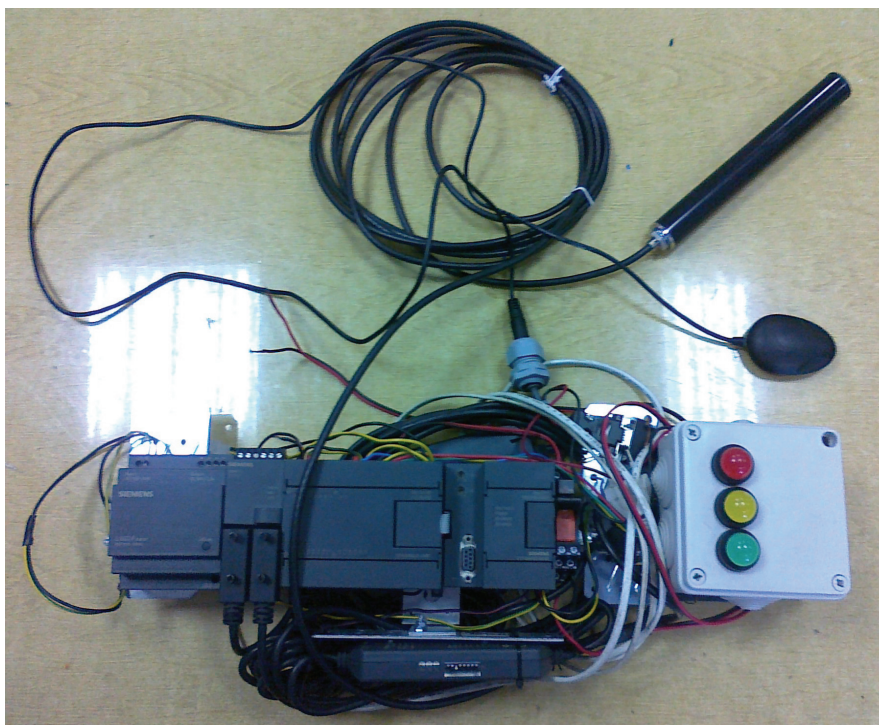
Savukārt iekārtas *SAFE – R7* prototipa barošanas pieslēgums notiek izmantojot shēmu (skat. pielikumu nr. 6). Šeit tiek izmantots standarts *Siemens* firmas ražojuma barošanas bloks „*LOGO!POWER*”, kurš tiek pieslēgts releju skapī *ESD* nr. 2 esošajai rozetei ar

spriegumu 220V AC. Iekārtas *SAFE – R7* prototipa ieeju pieslēgums pie atbilstošajiem releju kontaktiem notiek izmantojot shēmu (skat. pielikumu nr. 6). Degot dzeltenajai ieejas luksofora gaismai, tiek padots signāls uz iekārtas *SAFE – R7* prototipa *PLC* ieeju *I1.0*, kas apzīmē kustību atļaujošā signāla esamību. Degot sarkanajai gaismai, signāls attiecīgi tiek padots uz *PLC* ieeju *I0.7*, kas apzīmē kustību aizliedzošā signāla esamību. Iekārtas *SAFE – R7* prototipa pieslēgšana releju skapī *ESD* nr. 2. notiek pēc testēšanas programmas instrukcijas punkta 3.3., bet darba gatavība pēc pieslēgšanas procesa pabeigšanas tiek pārbaudīta pēc testēšanas programmas instrukcijas punkta 4.3.

### **Eksperimenta norise**

Pēc iekārtu prototipu uzstādīšanas un to pareizas funkcionēšanas pārbaudes, lokomotīve izbrauc no stacijas „*Bolderāja*” un attālinās no tās ieejas luksofora uz uzdoto attālumu (skat. rezultātu tab. nr. 1). To pašu veic arī ceļa mašīna. Kad abas kustīgās vienības atrodas eksperimenta uzsākšanas sākumpozīcijā, sākas iekārtu *SAFE – R5*, *SAFE – R6* un *SAFE – R7* prototipu funkcionēšanas eksperimentālā pārbaude.

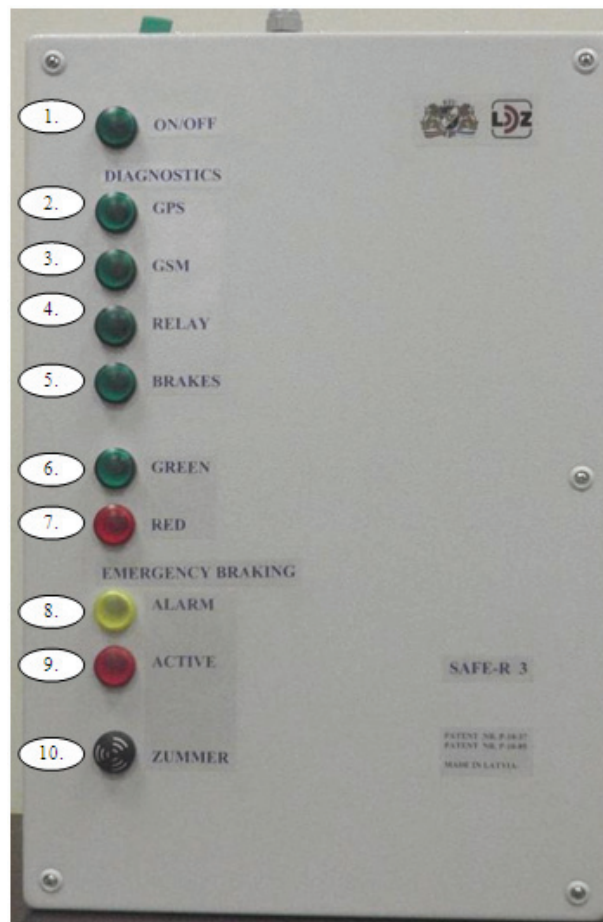
Ceļa mašīna sāk kustību stacijas „*Bolderāja*” ieejas luksofora virzienā. Tuvojoties ieejas luksoforam, iekārtas *SAFE – R6* prototips noteiktā laika momentā, izmantojot lampu nr. 2 (skat. 20. att.) un teksta displeju *TD400C*, sāk padot brīdinājuma signālu, kas apzīmē darba bremsēšanas procesa uzsākšanas nepieciešamību. Pēc tam, kad mašīnists ignorē minēto brīdinājumu, iekārtas *SAFE – R6* prototipa vadības releja kontakti nr. 11 un nr. 12 tiek atslēgti un tiek palaists avārijas bremsēšanas process (iedegas lampas nr. 3), kura gaitā ceļa mašīna tiek apstādināta uzdotajā punktā.



19. att. Iekārtas *SAFE – R6* prototips

Pēc tam, kad ceļa mašīna ir veikusi pilnīgu apstāšanos, lokomotīve sāk kustību stacijas „*Bolderāja*” ieejas luksofora virzienā. Tuvojoties ceļa mašīnai, iekārtas *SAFE – R5* prototips noteiktā laika momentā izmantojot uz priekšējā paneļa izmantoto lampu nr. 8 (skat. 20. att.) un teksta displeju *TD400C* sāk padot brīdinājuma signālu, kas apzīmē darba bremsēšanas procesa uzsākšanas nepieciešamību. Pēc tam, kad mašīnists ignorē minēto

brīdinājumu, iekārtas *SAFE – R5* prototipa vadības releja kontakti nr. 11 un nr. 12 tiek atslēgti un tiek palaists ekstrēmās bremzēšanas process (iedegas lampa nr. 9), kura gaitā lokomotīve tiek apstādināta uzdotajā punktā.



20. att. Iekārtas *SAFE – R5* prototipa priekšējais panelis

Testēšanas rezultāti un piezīmes ir redzami tabulā nr. 2 Siemens firmas divsimtās sērijas *PLC* vadības programmas izstrādes, ielādes un vadības procesu autors sīki apraksta literatūrā [45]. Pārējie praktiskie eksperimenti ir apskatāmi promocijas darba pilnajā versijā.

2. tabula

Eksperimenta nr. 1 rezultāti

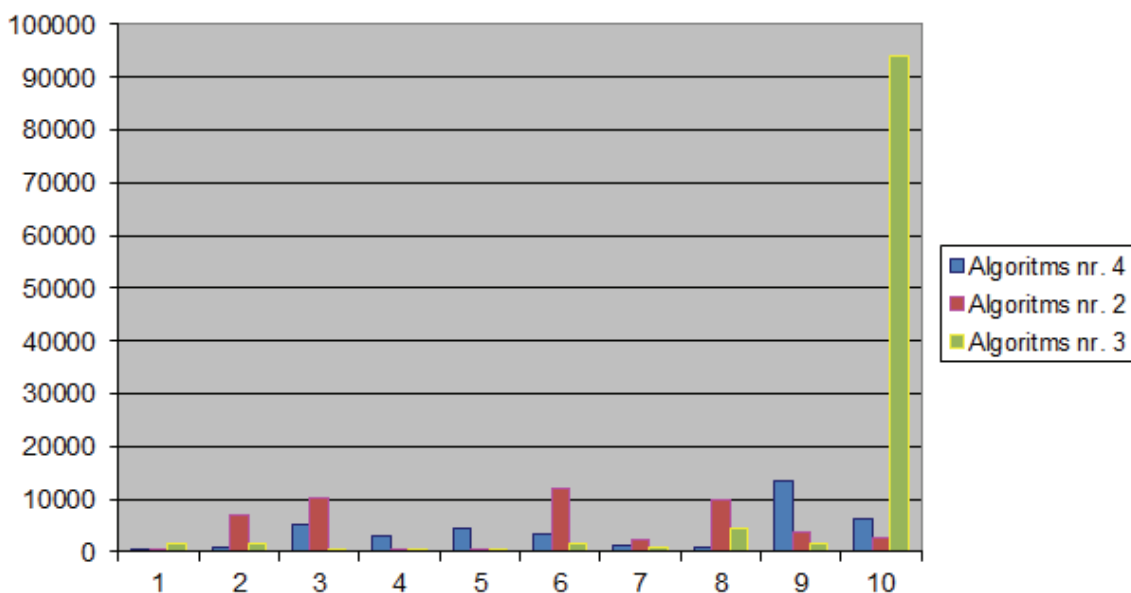
| Lokomotīves sākotnējais attālums no luksofora, m | Ceļa mašīnas sākotnējais attālums no luksofora, m | Ceļa mašīnas kustības ātrums, km/h | Lokomotīves kustības ātrums, km/h | Attālums starp stacijas ieejas luksoforu un ceļa mašīnu pēc tās pilnīgas apstāšanas, m | Attālums starp ceļa mašīnu un lokomotīvi pēc tās pilnīgas apstāšanas, m | Piezīmes |
|--|---|------------------------------------|-----------------------------------|--|---|----------|
| 600  | 300   | 15                                 | 15                                | 42   | 165   |          |
| 700  | 400   | 24                                 | 25                                | 76   | 158   |          |
| 1100   | 600   | 35                                 | 35                                | 130  | 201   |          |
| 1100   | 659   | 35                                 | 35                                | 131  | 219   |          |

|      |     |    |                            |     |     |  |
|------|-----|----|----------------------------|-----|-----|--|
| 1000 | 600 | 30 | 30                         | 289 | 341 | Lokomotīve un ceļa mašīna uzsāka kustību praktiski vienlaicīgi |
|      |     |    | 8                          |     | 28  | uzbraukšana uz lokomotīvi                                      |
|      |     |    | 28<br>(samazināts līdz 23) |     | 89  | uzbraukšana uz lokomotīvi                                      |

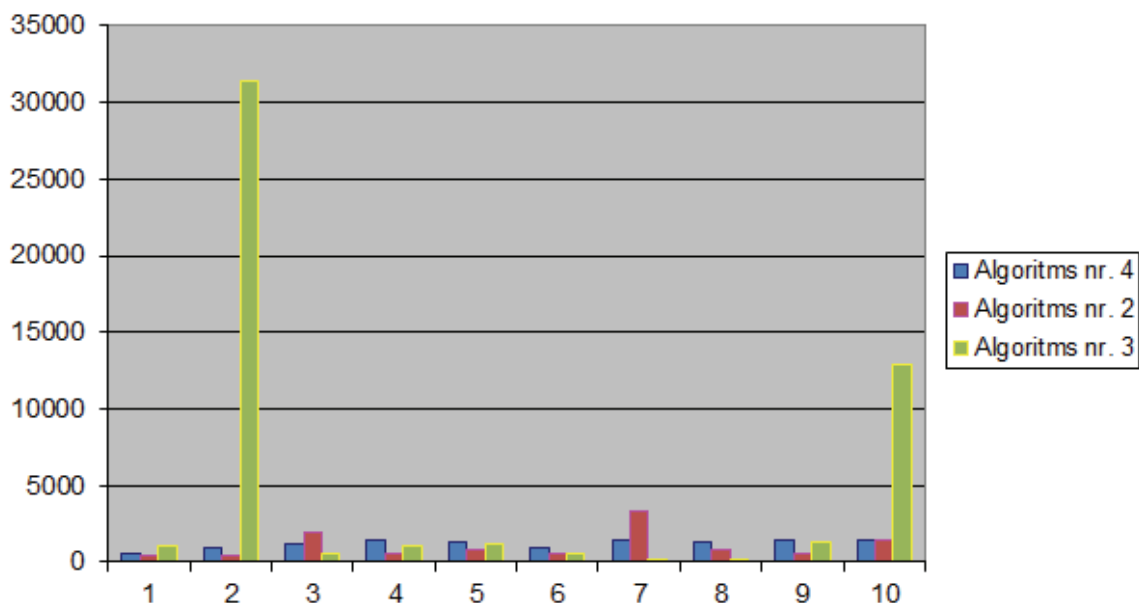
## TESTĒŠANAS REZULTĀTU STATISTISKĀ ANALĪZE

Tiek izvirzīta hipotēze, ka izvēlētie adaptīvie meklēšanas algoritmi var palielināt *APBS* sistēmas *AMA* algoritma ātrdarbību, salīdzinot ar gadījumu, kad tiku izmantota vienkārša pārlasīšanas metode, kurai pie dotas ieejas parametru konfigurācijas (kas ietver tikai daļu visu iespējamo ieejas parametru, to diskretizācijas līmeņa, *VKM* sarežģītības u.c.) vienmēr būtu nepieciešams veikt 280000 meklēšanas iterācijas. Tik liels meklēšanas algoritma darbības iterāciju skaits savukārt ir nepieņemams *APBS* sistēmas efektīvai darbībā, jo pieļaujamo maksimālo iterāciju skaitu manāmi ierobežo *GKM* veikspēja un ierobežotais laiks, kurā *APBS* sistēmai būtu jāveic pilnīga apmācība pēc ieejas datu saņemšanas.

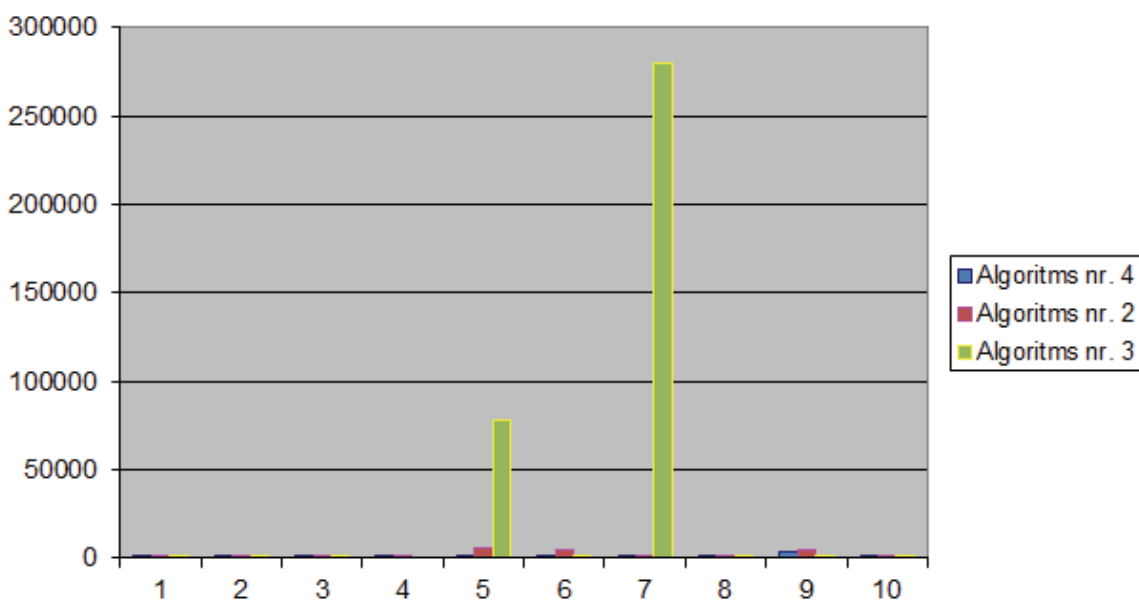
Meklēšanas algoritmu darbības gadījuma rakstura apstiprināšanai, no kopējā eksperimentu skaita tiek izvēlēti 3 dažādi gadījuma datoreksperimenti (eksperiments nr. 5, 260. un 495.). Šo eksperimentu 10 mēģinājumu rezultāti attēloti grafiskā veidā 21. att., 22. att. un 23. att.



21. att. Eksperimenta nr. 5 katra algoritma veiktais meklēšanas iterāciju skaits atkarībā no mēģinājuma kārtas skaitļa



22. att. Eksperimenta nr. 260 katra algoritma veiktais meklēšanas iterāciju skaits atkarībā no mēģinājuma kārtas skaitļa



23. att. Eksperimenta nr. 495 katra algoritma veiktais meklēšanas iterāciju skaits atkarībā no mēģinājuma kārtas skaitļa

Turpinājumā seko hipotežu Z-testa pārbaudes rezultāti, kas ir sadalīti pēc atsevišķām meklējamo parametru grupām.

3. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula īsa sastāva vilcieniem

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 1530.5     | 61.6              | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 5861.8     | 277.2             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 4        | 1722.1     | 60.2              | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

Tabulā nr. 4 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vidēji garu sastāvu vilcienu gadījumā.

4. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula vidēji gara sastāva vilcieniem

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 4325.9     | 202.6             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 12947.4    | 1218.2            | 0       | 0                 | -1.6     | 0.6               |
| 4        | 4509.5     | 212.5             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

Tabulā nr. 5 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti garu sastāvu vilcienu gadījumā.

5. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula gara sastāva vilcieniem

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 4784.5     | 357.4             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | nav        | nav               | nav     | nav               | nav      | nav               |
| 4        | 3859.9     | 247.6             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

Tabulā nr. 6 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vieglu vagonu sastāvu vilcienu gadījumā.

6. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula vieglu vagonu sastāva vilcieniem

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 5001       | 309.7             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 9455.3     | 1215.4            | 0       | 0                 | -1.3     | 0.6               |
| 4        | 4333.3     | 225.4             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

Tabulā nr. 7 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vidēji smagu vagonu sastāvu vilcienu gadījumā.

7. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula vidēji smagu vagonu sastāva vilcieniem

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 2967.9     | 185.9             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 7915.4     | 1094.7            | 0       | 0                 | -0.5     | 0.3               |
| 4        | 3243.3     | 213.8             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

Tabulā nr. 8 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti smagu vagonu sastāvu vilcienu gadījumā.

8. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula smagu vagonu sastāva vilcieniem

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 2519.9     | 135.2             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 6254.7     | 694.4             | 0       | 0                 | -0.4     | 0.3               |
| 4        | 2681.5     | 147               | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

Tabulā nr. 9 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti maza bremžu kļuču spiedspēka sastāvu vilcienu gadījumā.

9. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula maza bremžu kļuču spiedspēka sastāva vilcieniem

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 4341.6     | 226.8             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 9941       | 1062.3            | 0       | 0                 | -1.5     | 0.6               |
| 4        | 3902.1     | 177               | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

Tabulā nr. 10 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vidēji liela bremžu kļuču spiedspēka sastāvu vilcienu gadījumā.

10. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula vidēja bremžu kļuču spiedspēka sastāva vilcieniem

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 2693.2     | 145               | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 6718.7     | 728.2             | 0       | 0                 | -0.1     | 0.1               |
| 4        | 2753.6     | 132.5             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

Tabulā nr. 11 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti liela bremžu kļuču spiedspēka sastāvu vilcienu gadījumā.

11. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula liela bremžu kļuču spiedspēka sastāva vilcieniem

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 2438.3     | 213.5             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 4657.7     | 788.4             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 4        | 2940.2     | 273.4             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

Tabulā nr. 12 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vilcieniem ar mazu kustības ātrumu.

12. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula vilcieniem ar mazu kustības ātrumu

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 5589.9     | 366.8             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 7976.5     | 1272.9            | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 4        | 5446.4     | 365.5             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

Tabulā nr. 13 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vilcieniem ar vidēju kustības ātrumu.

13. tabula

Vidējo eksperimentu rezultātu tabula vilcieniem ar vidēju kustības ātrumu

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 2627.8     | 162.3             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 6656.5     | 824.1             | 0       | 0                 | -0.4     | 0.2               |
| 4        | 2396.4     | 97.7              | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

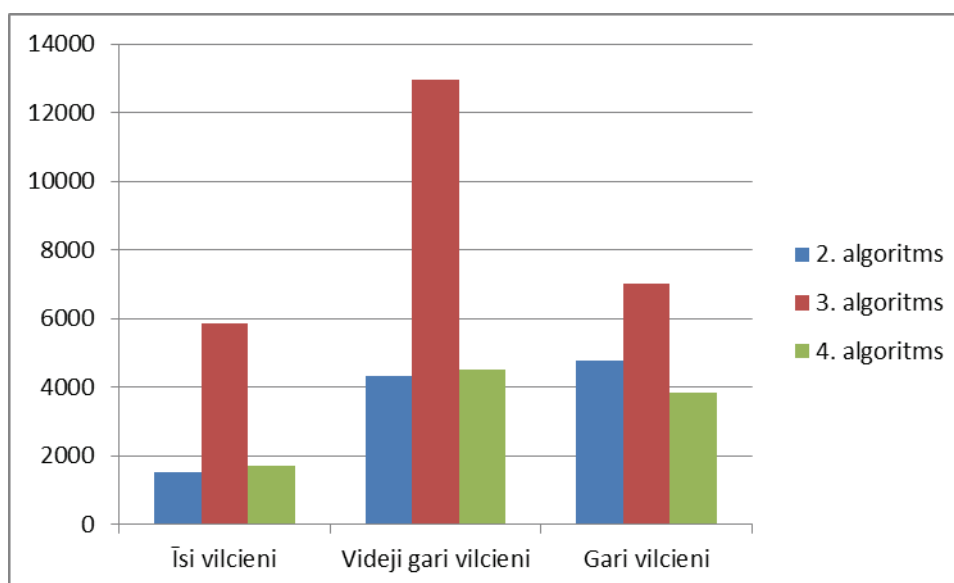
Tabulā nr. 14 redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vilcieniem ar lielu kustības ātrumu.

14. tabula

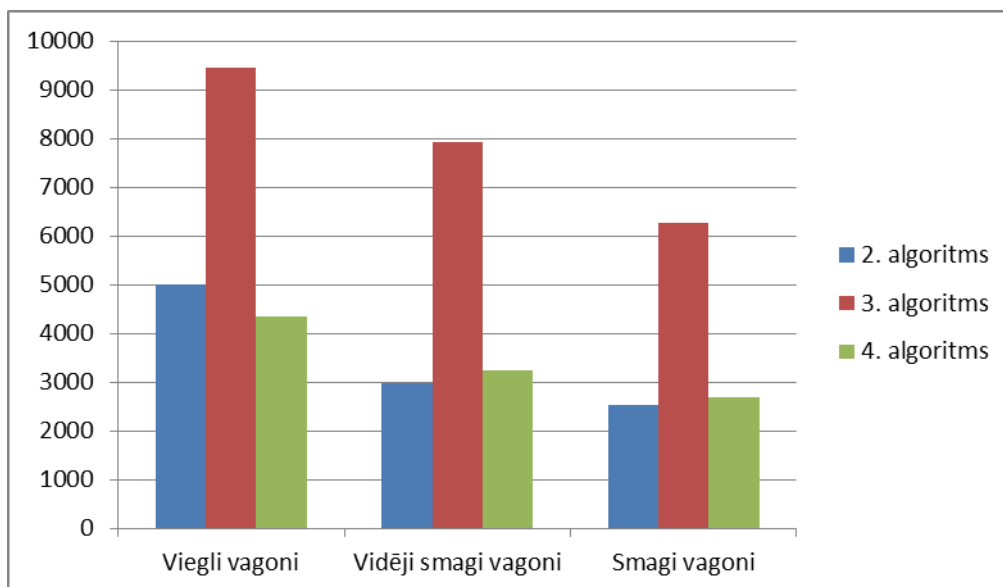
Vidējo eksperimentu rezultātu tabula vilcieniem ar lielu kustības ātrumu

| Alg. nr. | Iterācijas |                   | Kļūda   |                   | Starpība |                   |
|----------|------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|
|          | Skaitis    | Standarta novirze | Vērtība | Standarta novirze | Vērtība  | Standarta novirze |
| 2        | 2942.2     | 203.4             | 0       | 0                 | 0        | 0                 |
| 3        | 8775.6     | 1303              | 0       | 0                 | -1.9     | 1.1               |
| 4        | 3327.2     | 238               | 0       | 0                 | 0        | 0                 |

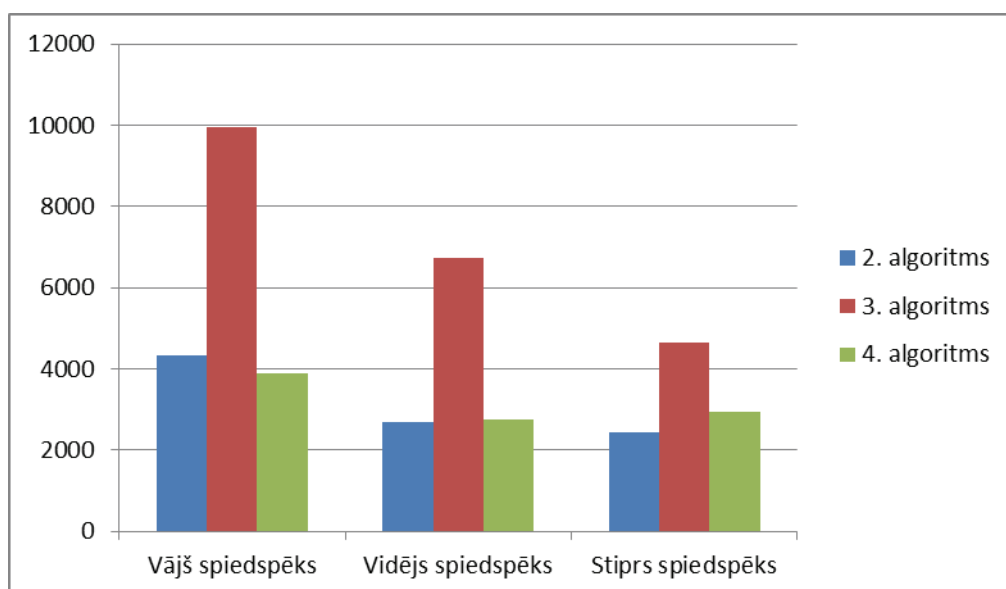
Turpinājumā seko iepriekš minēto tabulu grafisks apkopojums.



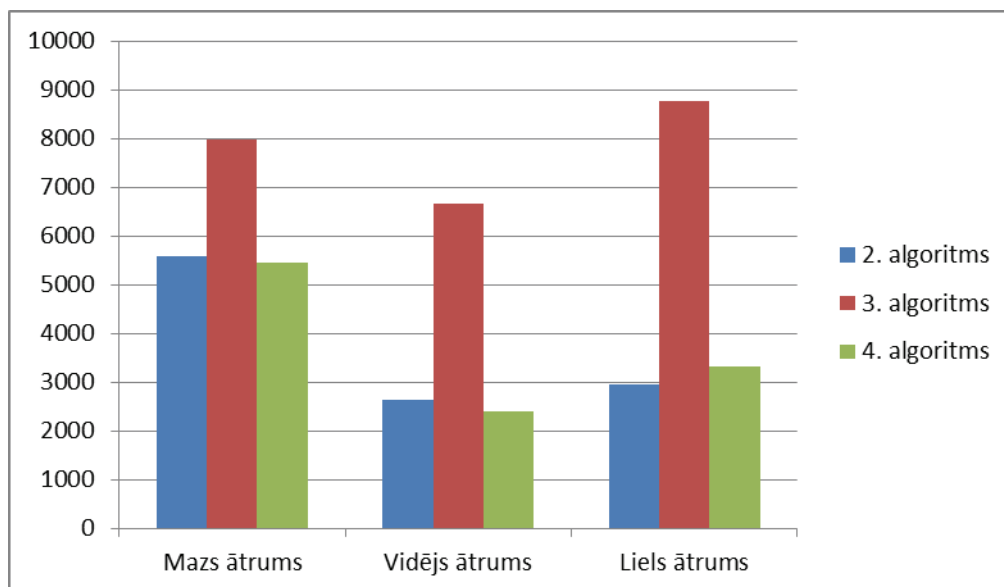
24. att. Meklēšanas algoritmu iterāciju skaita sadalījums pēc vilciena garuma



25. att. Meklēšanas algoritmu iterāciju skaita sadalījums pēc vilciena vagonu svara



26. att. Meklēšanas algoritmu iterāciju skaita sadalījums pēc bremžu kluču spiedspēka



27. att. Meklēšanas algoritmu iterāciju skaita sadalījums pēc vilciena kustības ātruma

Turpinājumā seko hipotēžu Z-testa pārbaudes rezultāti, kas ir sadalīti pēc atsevišķām meklējamo parametru grupām.

Pirmā grupa satur H03 hipotēzes pārbaudi katram no adaptīvajiem meklēšanas algoritmiem, meklējot vilciena vagonu skaitu (15. tabula). Hipotēžu pārbaudes rezultāti pēc parējām parametru grupām ir atspoguļoti promocijas darba pilnajā versijā.

15. tabula

H03 hipotēzes pārbaudes rezultātu tabula meklējot vilciena vagonu skaitu

| Kritērijs                       | Ticamības līmenis | Testa intervāls     | Pārbaudāmā vērtība | Rezultāts                                    |
|---------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|--|
| Vag. skaits<br>nvag=2<br>alg=3  | 99.90 %           | (8.619 ; 8.6707)    | 2                  | H03 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %   |
| Vag. skaits<br>nvag=2<br>alg=4  | 99.90 %           | (9.4086 ; 9.4282)   | 2                  | H03 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %   |
| Vag. skaits<br>nvag=2<br>alg=5  | 99.90 %           | (8.3681 ; 8.4146)   | 2                  | H03 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %   |
| Vag. skaits<br>nvag=10<br>alg=3 | 99.90 %           | (8.5863 ; 8.6353)   | 10                 | H03 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %   |
| Vag. skaits<br>nvag=10<br>alg=4 | 99.90 %           | (9.3447 ; 9.3688)   | 10                 | H03 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %   |
| Vag. skaits<br>nvag=10<br>alg=5 | 99.90 %           | (8.3535 ; 8.3968)   | 10                 | H03 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %   |
| Vag. skaits<br>nvag=20<br>alg=3 | 99.90 %           | (20 ; 20)           | 20                 | H03 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 % |
| Vag. skaits<br>nvag=20<br>alg=4 | 99.90 %           | (14.6608 ; 14.8268) | 20                 | H03 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %   |

|                                 |          |           |          |  |
|---------------------------------|----------|-----------|----------|--|
| Vag. skaits<br>nvag=20<br>alg=5 | 99.90 %  | (20 ; 20) | 20       | H03 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 % |
| Vag. skaits<br>nvag=40<br>alg=3 | 99.90 %  | (40 ; 40) | 40       | H03 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 % |
| Vag. skaits<br>nvag=40<br>alg=4 | Nav datu | Nav datu  | Nav datu | Nav datu                                     |
| Vag. skaits<br>nvag=40<br>alg=5 | 99.90 %  | (40 ; 40) | 40       | H03 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 % |
| Vag. skaits<br>nvag=60<br>alg=3 | 99.90 %  | (60 ; 60) | 60       | H03 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 % |
| Vag. skaits<br>nvag=60<br>alg=4 | Nav datu | Nav datu  | Nav datu | Nav datu                                     |
| Vag. skaits<br>nvag=60<br>alg=5 | 99.90 %  | (60 ; 60) | 60       | H03 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 % |

## SECINĀJUMI

Veicot promocijas darba rezultātu analīzi, var secināt, ka kopumā promocijas darba mērķis ir sasniegts. Promocijas darba izstrādes gaitā ir veikts sekojošais:

1. Analizēta literatūrā aprakstītā informācija par adaptīvajām vadības sistēmām un to funkcionēšanas algoritmiem, iebūvējamām intelektuālajām iekārtām un esošajām dzelzceļa transporta drošības sistēmām;
2. Izstrādāts piedāvājamās *APBS* objektu matemātiskais modelis, definēti un aprakstīti konstantie un mainīgie sistēmas elementi;
3. Izpētītas dažādu adaptīvo meklēšanas algoritmu un metožu pielietošanas iespējas *APBS* sistēmas apmācības procesa realizēšanai tās funkcionēšanas laikā;
4. Definēti galvenie *APBS* ietekmējošie kritēriji un kopējā mērķa funkcija precīzai un laidenai dzelzceļa transporta bremsēšanai;
5. Izstrādāts kopējais algoritms mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanai;
6. Izstrādāti *APBS* sistēmas iekārtu prototipi uz iebūvējamo intelektuālo iekārtu bāzes, izmantojot programmējamus loģiskos controllerus dzelzceļa ritošās vienības bremžu sistēmas vadībai;
7. Izstrādāts kravas vilciena kustības un tā pneimatiskās bremžu sistēmas darbības datormodelis, piedāvājamās sistēmas testēšanai laboratorijas apstākļos;
8. Veikti vairāki datoreksperimenti izstrādāto vadības algoritmu aprobācijai;
9. Veikta datoreksperimenta rezultātu analīze un hipotēžu pārbaude, kas apliecina adaptīvo meklēšanas algoritmu izmantošanas efektivitāti, salīdzinot ar vienkāršu pārlasīšanas metodi;
10. Veikta dažādu algoritmu salīdzināšana ņemot vērā to darbības precizitāti un efektivitāti.

Promocijas darba laikā veikto praktisko eksperimentu rezultāti ļauj izdarīt sekojošus secinājumus:

1. Pēc vagona vidējās masas un bremžu kļuču spiedspēka kritērija 99 % gadījumos adaptīvie meklēšanas algoritmi ļauj ātrāk veikt *APBS* apmācību un aprēķināt mērķa funkcijas minimumu nekā vienkārša pārlasīšanas metode.
2. Pēc vagonu skaita kritērija īsu sastāvu vilcieniem 99 % gadījumos izvēlētie adaptīvie meklēšanas algoritmi neļauj precīzi atrast uzdoto vagonu skaitu, bet aprēķinātā bremzēšanas ceļa līknes vidējā kvadrātiskā kļūda tomēr nepārsniedz 10–23;
3. Salīdzinot divus efektīvākos meklēšanas algoritmus, jāsecina, kombinētā labākā mēģinājuma metode ar pārlasīšanu beigu posmā ir vidēji 1.2 reizes efektīvāka par labākā mēģinājuma metodi pie mazākām meklējamo vilciena parametru vērtībām;
4. Labākā mēģinājuma metode ir vidēji 1.1 reizes efektīvāka par kombinēto labākā mēģinājuma metodi ar pārlasīšanu beigu posmā pie lielākām meklējamo vilciena parametru vērtībām;
5. *APBS* spēj laicīgi reaģēt arī uz negaidītu luksofora gaismas pārslēgšanu, kas liecina par sistēmas iekārtu ātrdarbību un mobilitāti;
6. *APBS* sistēma ļauj realizēt lokomotīves apturēšanu gan laicīgi uzdotajos apstāšanās punktos, gan arī avārijas situācijās pēkšņi aprēķinātajos apstāšanās punktos pie dažādiem lokomotīves sākotnējiem kustības ātrumiem;
7. *APBS* sistēmas iekārtu prototipi spēj apturēt lokomotīvi uzdotajā punktā ar vidējo pieļaujamo kļūdu  $\pm 10$  m;
8. *APBS* sistēma salīdzinājumā ar esošajām sistēmām spēj automātiski noteikt vilciena kustības parametrus, veikt pašapmācību un automātisku bremžu sistēmas vadību ar mērķi apturēt vilcienu vai piebremzēt to kādu neparedzētu vai arī dienesta apstākļu gadījumā;
9. Ritošo vienību mijiedarbības algoritms spēj nodrošināt operatīvu datu plūsmas apmaiņu starp dzelzceļa sistēmas elementiem, kas ļauj novērst iespējamo sadursmi starp divām ritošām vienībām, apturot vienu vai abus transporta līdzekļus.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Morosanov I. S. "Method of extremum seeking control" // Automation and Remote Control, 1957. y. – Vol. 18. – pp. 1077–1092.
2. Ostrovskii I. I. "Extremum regulation" // Automation and Remote Control. 1957. – Vol. 18. – pp. 900–907.
3. Pervozvanskii A. A. "Continuous extremum control systems in the presence of random noise" // Automation and Remote Control. 1960. – Vol. 21. – pp. 673–677.
4. Aseltine J. A., Mancini A. R., Sarture C. W. "A survey of adaptive control systems" // IRE Trans. on Automatic Control, 1958. – Vol. AC-6, no. 12. – pp. 102–108.
5. Wittenmark B., Urquhart A. "Adaptive extremal control" // Proc. of 34-th IEEE Conference on Decision and Control. – New Orleans, LA: 1995. – pp. 1639–1644.
6. Krstic M., Wang H.-H. "Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems" // Automatica. 2000. y. Vol. 36. – pp. 595–601.

7. Красовский А. А. „Теория самоорганизующегося оптимального регулятора с экс-траполяцией” // Под ред. А. А. Колесникова. ТРТУ, 2000. – с. 268–311.
8. S. Drakunov, U. Ozguner, P. Dix, B. Ashrafi „ABS control using optimum search via sliding modes” // IEEE Trans. on Control Systems Technology. 1995. y. – 3. pp.
9. Peterson K. S., Stefanopoulou A. G. „Extremum seeking control for soft landing of an electromechanical valve actuator” // Automatica, 2004. y.– Vol. 40, no. 6.– pp. 1063–1069.
10. Middleton R. H., Goodwin G. C., Hill D. J. „Design issues in adaptive control” // IEEE Trans. on Automatic Control, 1988. Vol. 33, no. 1. – pp. 50–58.
11. Morse A. S., Mayne D. Q., Goodwin G. C. „Applications of hysteresis switching in parameter adaptive control” // IEEE Trans. on Automatic Control, 1988. y.– Vol. 37, no. 9. – pp. 1343–1354.
12. Narendra K. S., Balakrishnan J. „Adaptive control using multiple models” // IEEE Trans. on Automatic Control, 1997. y.– Vol. 42, no. 2. – pp. 171–187.
13. Tou J. T. „Modern Control Theory” // N.-Y.: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1964. y. – 343 pp.
14. Bellman R., Kalaba R. „Dynamic programming and adaptive control processes: Mathematical foundations” // IRE Trans. on Automatic Control, 1960. y.– Vol. AC-5. – pp. 5–10.
15. Bellman R. „Adaptive Control Processes – A Guided Tour” // Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1961. y.
16. Bellman R., Kalaba R. „Dynamic Programming and Modern Control Theory” // N.-Y.: Academic Press, 1965. y.
17. Квакернаак Х. „О допустимом адаптивном управлении” // М.: Наука, 1969. г. – с. 17–22.
18. Draper C.S., Li Y. „Principles of Optimizing Control Systems” // NewYork: ASME, 1954. y.
19. Tsien H. S. Engineering Cybernetics. – McGraw Hill, 1954. y. – 289 pp.
20. Bellman R., Kalaba R. Dynamic programming and adaptive control processes: Mathematical foundations // IRE Trans. on Automatic Control. – 1960. y. – Vol. AC-5. – pp. 5–10.
21. Bellman R. Adaptive Control Processes – A Guided Tour. – Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1961. y.
22. Widrow B., McCool J. M., Larimore M. G., Jonson C. R. „Stationary and nonstationary learning characteristics of the lms adaptive filter” // Proc. IEEE. – 1976. y. – Vol. 64, no. 8. – pp. 1151–1162.
23. Zadeh L. A. „On the definition of adaptivity” // Proc. IEEE, 1963. y.– Vol. 51.– pp. 469–470.
24. Programming and Modern Control Theory”//N.-Y.: Academic Press, 1965. y.
25. Zadeh L. A. “On the definition of adaptivity” // Proc. IEEE, 1963. y.– Vol. 51.– Pp. 469–470.
26. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. „Адаптивное управление динамическими объектами” // М.: Наука, 1981. г. – 448 с.
27. Фрадков А. Л. „Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы”// М.: Наука, 1990. г. – 286 с.
28. Фрадков А. Л. „Схема скоростного градиента и ее применение в адаптивном управлении” // Автоматика и Телемеханика, 1979. г. – с. 90–101.

29. Цыпкин Я. З. „Информационная теория идентификации” // М.: Наука, Физмат- лит, 1995. г. – 336 с.
30. Isidori A. „Nonlinear control systems” // Springer-Verlag, 1989. y.
31. Kanellakopoulos I., Kokotovic P. V., Morse A. S. „Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems” // IEEE Trans. on Automatic Control, 1991. y.– Vol. 36. – pp. 1241–1253.
32. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. „Nonlinear and Adaptive Control Design” //Wiley and Sons Inc., 1995. y.
33. Lin W., Qian C. „Adaptive control of nonlinearly parameterized systems: The smooth feedback case” // IEEE Trans. Automatic Control, 2002. y. – Vol. 47, no. 8.– pp. 1249–1266.
34. Lin W., Qian C. „Adaptive control of nonlinearly parameterized systems: A nons- mooth feedback framework” // IEEE Trans. Automatic Control, 2002. y.– Vol. 47, no. 5. – pp. 757–773.
35. Ding Z. „Adaptive control of triangular systems with nonlinear parameterization” // IEEE Trans. Automatic Control, 2001. – Vol. 46, no. 12. – pp. 1963–1968.
36. Boskovic J. „Stable adaptive control of a class of first-order nonlinearly parame- terized plants” // IEEE Trans. on Automatic Control, 1995. – Vol. 40, no. 2. – pp. 347–350.
37. Annaswamy A. M., Skantze F. P. „Adaptive control of continuous time systems with convex/concave parametrization” // Automatica, 1998. y. – Vol. 34, no. 1. – pp. 33–49.
38. Kojic A., Annaswamy A. „Adaptive Control of Nonlinearly Parameterized Systems with a Triangular Structure” // Automatica, 2002. y. – Vol. 38, no. 1. – pp. 115–123.
39. Annaswamy A., Skantze F. „Adaptation in the presence of general nonlinear parameterization: An error model approach” // IEEE Trans. on Automatic Control, 1999. y. – Vol. 44, no. 9. – pp. 1634–1652.
40. Tsien H. S. „Engineering Cybernetics” // McGraw Hill, 1954. y. – 289 pp.
41. Osborne A. „An Introduction to Microcomputers – 2<sup>nd</sup> Ed.” // Berkely (California): Osborne-McGraw Hill, 1980. y.
42. Amos S. W., James M. R. „Principles of Transistor Circuits. Butterworth-Heinemann” // ISBN 0-7506-4427-3.
43. Godse A. P., Godse D. A. „Microprocessors & Microcontrollers Technical Publications” // 2010. y. – 948 p.
44. Wilmshurst T. „Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers, Second Edition: Principles and Applications” // 2009. y. – 750 p.
45. Reese R.B. „Microcontrollers: From Assembly Language to C Using the PIC24 Family” // 2008. y. – 824 p.
46. Ceruzzi P. E. „A History of Modern Computing (History of Computing)” // 2003. y. – 459 p.
47. Волкова В. Н., Денисов А. А. „Теория систем: учебное пособие” // М.: Высшая школа, 2006. г. – 511 с. ISBN 5-06-005550-7
48. Корилов А. М., Павлов С. Н. „Теория систем и системный анализ: учеб. Пособие” // Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2008. г. – 264 с. ISBN 978-5-86889-478-7
49. Эшби У. Р. „Введение в кибернетику” // М.: КомКнига, 2005. г. – 432 с. ISBN 5-484-00031-9

50. Ļevčenkovs A., Gorobecs M., Ribickis L. „Vizuālorientētas programmēšanas pamati industriālajā elektronikā” // Rīga: RTU izdevniecība, 2010. g. – 522 lpp.
51. Ribickis L., Ļevčenkovs A., Gorobecs M. „Sistēmu teorijas pamati industriālās elektronikas modelēšanā” // Rīga: RTU izdevniecība, 2008. g. – 100 lpp.
52. Raņķis I., Bražis V. „Elektrotehnoloģiskās iekārtas” Rīga: RTU izdevniecība, 2005. g. – 108 lpp.
53. Ribickis L., Ļevčenkovs A., Kuņicina N., Gorobecs M. „Ievads dinamisko procesu modelēšanā mehatronikas sistēmās. Mācību grāmata” // Rīga: RTU izdevniecība, 2006. g. – 97 lpp.
54. Ribickis L., Raņķis I., Bražis V. „Elektrotransporta rekuperācijas iespējas” // Rīgas pilsētā. Rīgas Domes zin.-tehn. konferences materiāli, 2001. – 4. lpp.
55. Ribickis L., Vītols A. „Maiņstrāvas elastīgo pārvades sistēmu jaudas plūsmas kontrolleris – UPFC” // Rīga, RTU zinātniskie raksti ”Energētika un elektrotehnika”, 4. sērija, 10. sējums, 59.– 64.lpp.
56. Rankis I., Gorobetz M., Levchenkov A. „Optimal Electric Vehicle Speed Control By Intelligent Devices” // Rīgas Tehniskās universitātes raksti. Energētika un Elektrotehnika. Sērija 4, sējums 16. 2006. g.
57. Ribickis L., Rankis I. „Electrical drives static characteristics and methods of speed control” // Rīga: RTU izdevniecība, 1995. g. – 107 lpp.
58. Ribickis L., Gorobetz M., Levchenkov A. „Intelligent Electric Vehicle Motion and Crossroad Control” // In Proceedings of 12<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference. Portoroz, Slovenia, 2006 – pp. 1239–1244.
59. Gorobecs Mihails „Ģenētisko algoritmu izpēte elektriskā transporta optimālai vadībai. Promocijas darbs” // Rīga: RTU izdevniecība, 2008. g. – 189 lpp.
60. Grundspeņķis, J. „Ievads intelektuālās sistēmās” // Rīga: RTU izdevniecība, 1993. g. – 158 lpp.
61. Garey M.R. and Johnson D. S. „Computers and Intractability: A guide to the Theory of NP- Completeness” // Bell Laboratories Murray Hill, New Jersey, 1979. y. – 145 p.
62. Gen M., Cheng R. “Genetic algorithms and engineering design” // John Wiley & Sons, New York, 1997. y. – 79 pp.
63. Ming L. „Method for Monitoring Signals in Communication System Working Based on Different Time Proportions”, patent nr. CN20101606642 20101220, 2012. y.
64. Rosenkranz U., Scharnweber K. „Method and Arrangement for the Operation of Railroad Line”, PCT/EP2008/057611, 2008. y.
65. Norbert Wiener „Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine” // Paris, (Hermann & Cie) & Camb. Mass, 1961. y.
66. Yuheng H. Y. D., Rupeng X., Yingzhuang L. „A new rate adaptive system: Controlled soft demodulation” // Computing Communications and Applications Conference, China, Hong Kong, 2012. y. – pp. 360–364.
67. Chuan Jun R., Hongbing H., Shiyao J. „Specification of Agent in Complex Adaptive System” // Computer Science and Computational Technology, China, Shanghai, 2008. y. – pp. 210–216.
68. Krishna K. „Microprocessors and Microcontrollers – Architecture, Programming and System Design” // Prentice-Hall of India, 2013. y. – 744 pp.
69. Singh R. „Microprocessors Interfacings and Applications” // New Age International Pvt Ltd Publishers, 2007. y. – 420 pp.

70. Catsoulis J. „Designing Embedded Hardware” // O'Reilly Media, 2005. y. – 398 pp.
71. European Railway Agency, Railway Safety Performance in the European Union 2010, Espace International, 299 Boulevard de Leeds, Lille, France, 64 pp.
72. Seyedreza F. „Programming with SIEMENS SIMATIC S7 300/400 programmable controllers” // www.plc-doc.com, 2008. y.
73. Bolton W. „Programmable Logic Controllers” // Newnes, 5<sup>th</sup> Revised edition edition, 2009. y. – 403 pp.
74. Valvano J. W. „Embedded Systems: Introduction to Arm Cortex Microcontrollers” // CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. y. – 500 pp.
75. Berger H. „Automating with Simatic: Controllers, Software, Programming, Data: Controllers, Software, Programming, Data Communication Operator Control and Process Monitoring” // Wiley VCH; 5<sup>th</sup> Edition edition, 2012. y. – 284 pp.
76. Johnson R., Jeremiah R., Shamjith S. M., Vimal A. „Security System of Oilfield using Wireless in PLC & TESTBED for SCADA: Implementation of wireless communication in PLC and creating a TESTBED for SCADA” // LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. y. – 60 pp.
77. Klūga A. „Satelītu rādonavigācijas sistēmas” // Rīga: RTU Izdevniecība, 2010. – 152 lpp.
78. Растринг Л. А. „Адаптация сложных систем. Методы и приложения” // Рига, 1981. г. – 394 с.
79. Растринг, Л. А. „Адаптивное обучение с моделью обучаемого” // Рига: Зинатне, 1988. г. – 160 с.
80. Krechetova K., Sisojevs A., Glazs A., Platkajis A. „Medical Image Region Extraction and 3D Modeling Based on Approximating Curves” // International Journal of Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications: Switzerland, 2011. y. – Vol. 222, – pp. 285–288.
81. e.g. ISO 26262, RTCA DO 178B, IEC or CENELEC EN 5012x, 50125x and IEC 61508 standards.
82. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A., Ribickis L. „Algorithm of Precise Control of Timetable for Intelligent Embedded Devices in City Electric Transport” // In proceedings of 9<sup>th</sup> International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering", Estonia, Parnu, 2010. – pp. 180–185.
83. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A., Ribickis L. „Modeling of Embedded Intelligent Device for Control of City Electric Transport” // In proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2010)”, Lithuania, Panevezys, 2010. – pp. 37–42.
84. Пархомов В.Т. „Устройство и эксплуатация тормозов” // М.: Транспорт, 1994. г. – 208 с.
85. Крылов В.И., Крылов В.В. „Автоматические тормоза подвижного состава” // М.: Транспорт, 1983. г. – 360 с.
86. Венцевич Л. Е. „Локомотивные устройства обеспечения безопасности движения поездов и расшифровка информационных данных их работы” // М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп., 2006. г. – 327 с.
87. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Скворцова А. И. „Тяговые расчеты. Справочник” // М.: Транспорт, 1987. г. – 272 с.

88. Kolomeičuks A., Dmitrijevs N. „Dzelzceļa ritošā sastāva automātiskās bremzes” // Rīga, RTU izdevniecība, 2010. g. – 449 lpp.
89. Altbergs T., Balckars P., Bukovskis V. u. c. „Dzelzceļi. Vispārīgais kurss” // Latvijas dzelzceļš, 1996. g. – 279 lpp.
90. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Некрасов О. А. и др. „Правила тяговых расчетов для поездной работы” // М.: Транспорт, 1985. г. – 289 с.
91. Смитиенко Б. М. „Мировая экономика” // М.: Юрайт-Издат, 2013. г. – 590 с.
92. Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД) „Основные принципы обеспечения безопасности и безотказности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики” // Польша, Варшава, 2006. г. – 24 с.
93. Mikulski J. „Activities of Transport Telematics” // Proceedings of „Communications in Computer and Information Science”, Vol. 395., Poland, Katowice-Ustron, 2013. – pp. 488.
94. Ļevčenkovs A., Potapovs A., Raņķis I. „Programmēšanas tehnoloģijas pamati studiju projektam (EEI345 3 kr.p.)” // RTU – 2011., 111 lpp. ISBN-978-9934-10-194-6
95. Mezītis M. „Vilcienu kustības intervālu regulēšanas mikroprocesoru sistēmas” // Rīga: RTU Izdevniecība, 2012. – 187 lpp.
96. Mezītis M. „Vilcienu kustības intervālu regulēšanas sistēmas (releju)” // Rīga: RTU Izdevniecība, 2007. g. – 297 lpp.
97. Багажов В.В. „Системы безопасности движения для специального самоходного подвижного состава КЛУБ-П и КЛУБ-УП” // М: Маршрут”, 2006 г. – 86 с.
98. Ning B. „Advanced Train Control Systems” // WIT Press, 2010. y. – 177 p.
99. Flammini F. „Railway Safety, Reliability, and Security: Technologies and Systems Engineering” // Idea Group, U.S., 2012. y. – 488 p.
100. G. Fregien, Paddison J., Beck M., Kock G. „Zeitgemäße Güterwagenausrüstung für hochwertige Transportaufgaben” // Knorr Bremse, 2013. j. – 19 s.
101. Gfatter G., Berger P., Krause G., Vohla G. „Grundlagen der Bremstechnik Basics of Brake Technology” // Knorr Bremse, 2012. j. – 136 s.
102. Gorobecs M., Korago I. „PSAFECER 2. Posma demonstratoru testēšanas plāns” // RTU, 2013. g. – 16 lpp.
103. Patel J.K., Campbell R.B. “Handbook of The Normal Distribution” // Southern Methodist University, Dallas, US, 1972. y. – 94 p.
104. Pourbaix J. „Employment in public transport: 13 million people worldwide” // Observatory of employment in public transport, 2011. y.
105. A. Ļevčenkovs, M. Gorobecs, I. Raņķis, L. Ribickis, P. Balckars, A. Potapovs „Vilcienu pretsadursmju iekārta ar satelītu navigāciju”, patenta Nr. LV14384B no 26.05.2011.
106. Uteševs I. „Elektriskā sliežu transporta iebūvētās bezvadu bremzēšanas iekārtas vadības algoritmu izstrāde, izmantojot pozicionēšanas informācijas sistēmas. Promocijas darbs” // Rīga: RTU izdevniecība, 2010. g. – 139 lpp.
107. Potapovs A., Moor-Yaroslavtsev A., Gorobetz M., Levchenkov A. „Smooth Braking of Train Using Adaptive Control Algorithms on Embedded Devices” // In proceedings of 53<sup>th</sup> Annual Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 2012. – pp. 135.