

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 darbs

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 DARBA AUTORA APLIECINĀJUMS

Es, Andrejs Potapovs, apliecinu, ka elektroniski ORTUS sistēmā augšuplādētā noslīguma darba „Elektriskā transporta adaptīvās sistēmas un iebūvējamās intelektuālas iekārtas” teksts ir identisks papīra formātā iesietā un promocijas padomē iesniegtā darba tekstam. Apliecinu, ka promocijas darbs ir sagatavots patstāvīgi, tajā nav pieļauts citu personu intelektuālā īpašuma tiesību pārkāpums vai plaģiāts – citas personas radošās darbības rezultātu (izteiksmes līdzekļu, viedokļu, ideju) tālāka paušana savā vārdā. Izmantotie citu autoru darbi un datu avoti ir norādīti atsaucēs.

Iesniegtā darba teksts ne kopumā, ne pa daļām nekad nav nekādā veidā iesniegts kādai citai noslīguma darbu vērtēšanas komisijai.

„_____” _____, 2014 /A. Potapovs/

PATEICĪBAS

Vēlos izteikt lielu paldies visiem, kuri ir veltījuši savu laiku, vērtīgus padomus un sniegtās zināšanas šī promocijas darba izstrādē. Lielāko pateicību izsaku Industriālas Elektronikas un Elektrotehnikas Institūta zinātniekiem akadēmiķim profesoram Leonīdam Ribickim, profesoram Ivaram Raņķim, promocijas darba zinātniskajam vadītājam profesoram Anatolijam Ļevčenkovam un zinātniskajam konsultantam, docentam Mihailam Gorobecam par veltīto laiku, sniegtajiem padomiem teorētiskos un praktiskos jautājumos, kā arī par atbalsta sniegšanu gan studiju, gan šī promocijas darba izstrādes laikā.

Vēlos pateikties arī RTU zinātniekiem – profesorei Anastasijai Žiraveckai, profesoram Oskaram Krievam, profesoram Jānim Valeinim, profesoram Iljam Galkinam, asoc. profesoram Viesturam Bražim, laboratorijas vadītājam Ansim Avotiņam un projektu vadītājai Aijai Laicānei par veiksmīgo sadarbību visā studiju laikā. Izsaku pateicību arī RTU Doktorantu studiju daļas un Doktorantūras skolas darbiniekiem, Doktorantu studiju daļas vadītājam Laurim Biseniekam, Doktorantu studiju daļas vadītāja vietniecei Santai Rendorei, Doktorantūras skolas projekta vadītājai Zanei Skreijai, projektu vadītājai Alīnai Galkinai par atbalstu un vērtīgiem padomiem doktorantūras studiju laikā.

Atsevišķu pateicību izsaku arī visiem kolēģiem no profesora Anatolija Ļevčenkova profesora doktorantu grupas par padomiem un praktisku palīdzību zinātnisko eksperimentu veikšanas laikā.

Visbeidzot pateicos savai ģimenei un tuviniekiem par pacietību, sapratni un atbalstu visu studiju gadu garumā un šī promocijas darba izstrādē.

ANOTĀCIJA

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 automātiskās 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.

Promocijas darbs sastāv no ievada, literatūras apskata, 5 nodaļām, secinājumiem, bibliogrāfiskā saraksta un 6 pielikumiem. Promocijas darba pamatteksts satur 155 lappuses un tas ir iekļauj 36 attēlus un 22 tabulas. Bibliogrāfiskais saraksts satur 207 informācijas avotus.

ANNOTATION

The thesis is devoted to the investigation and development of the transport control system applying adaptive control algorithms and embedded intelligent devices. The introduction contains the basis of the topicality of the subject in accordance with which the aim and objectives of the thesis are determined.

The 1st chapter of the thesis is devoted to the investigation of the control system of the present rolling-stock unit of railway transport, description of adaptive, accurate and soft braking systems (*APBS*) elements and scheme of their interaction, general algorithm of this system operation as well as to the developed target function and hypothesis.

The 2nd chapter of the thesis contains the development of adaptive self-learning algorithm for the rolling-stock physical motion parameters determining, investigation and development of adaptive searching algorithm for the motion parameters calculation, development of the mathematical model of rolling-stock motion and development of automatic control algorithm for train braking system and its description.

The 3rd chapter of the thesis is devoted to the analysis of microprocessor devices application safety requirements in the railway control systems, to the development and application of embedded intelligent devices interface, elaboration of electric circuit of the suggested system and the computer model of interaction of the elements.

The 4th chapter considers the examining of the developed mathematical and computer model in laboratory and then of the prototype under real operation conditions.

The experimental results are statistically analysed in the 5th chapter.

The final part of the thesis are the conclusions and recommendations for further research.

The Doctoral Thesis is written in the Latvian language, contains introduction, 5 chapters, basic results and conclusions, list of references, 32 figures and illustrations, 22 tables, totally 155 pages. The list of references contains 207 items.

АННОТАЦИЯ

Целью работы является исследование и разработка систем управления железнодорожного транспорта, с применением адаптивных алгоритмов управления и встроенных интеллектуальных устройств. В введении диссертации описывается актуальность темы, в соответствии с которой поставлена цель и задачи диссертации.

Первая глава диссертации посвящена исследованию существующих систем управления железнодорожным подвижным составом, описанию элементов и схем их взаимодействия с предлагаемой системой адаптивного, точного и плавного торможения (*APBS*) поездов, описанию общего алгоритма работы данной системы, а также описанию разработки целевой функции и выдвигаемых гипотез.

В второй главе диссертации для определения физических параметров движения подвижного состава проведено исследование и разработка адаптивных алгоритмов поиска и самообучения, описана новая математическая модель движения железнодорожного подвижного состава, а также предложен алгоритм автоматического управления тормозной системы поезда.

Третья глава посвящена анализу выдвигаемых требований к использованию микропроцессорной техники в системах управления железнодорожного транспорта, описанию внутренних интерфейсов встраиваемых интеллектуальных устройств и описанию схем и компьютерных моделей элементов предлагаемой системы.

Четвертая глава посвящена тестированию разработанных математических и компьютерных моделей в лабораторных условиях и тестированию разработанных прототипов оборудования в реальных условиях эксплуатации.

Пятая глава описывает статистический анализ результатов проведенных испытаний.

В окончании диссертации приведены общие выводы и поставлены цели дальнейших исследований.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, пяти основных глав, заключения, библиографии и 6 приложений. Основной текст содержит 155 страниц включая 36 картинок и 22 таблиц. Библиографический список содержит 207 источников информации.

SATURS

Ievads.....	10
Tēmas aktualitāte.....	10
Literatūras apskats.....	12
Adaptīvie vadības algoritmi.....	12
Iebūvējamās intelektuālās iekārtas.....	17
Darba mērķis un uzdevumi.....	24
Pētījuma līdzekļi un metodes.....	25
Darba zinātniskā novitāte.....	25
Darba praktiskais pielietojums.....	26
Darba aprobācija.....	26
Autora publikācijas.....	29
Izstrādātie patenti.....	31
1. Promocijas darba uzdevuma nostādnes formulēšana adaptīvai dzelzceļa transporta bremžu sistēmas vadībai.....	32
1.1 Situācijas raksturojums.....	32
1.2 Dzelzceļa transporta ritošo vienību vadības sistēmu izpēte.....	32
1.3 Dzelzceļa transporta adaptīvas, precīzas un laidenas bremzēšanas sistēmas (<i>APBS</i>) elementu un to mijiedarbības shēmu apraksts.....	38
1.4 Dzelzceļa transporta adaptīvas, precīzas un laidenas bremzēšanas sistēmas kopējā darbības algoritma apraksts.....	48
1.5 Izstrādātā mērķa funkcija un izvirzītā hipotēze.....	52
1.6 Secinājumi par pirmo nodaļu.....	55
2. Iebūvējamo intelektuālo iekārtu adaptīvo vadības algoritmu izstrāde dzelzceļa pretsadursmju sistēmām.....	56
2.1 Situācijas raksturojums.....	56
2.2 Ritošā sastāva fizisko kustības parametru noteikšanas adaptīvā pašapmācības algoritma izstrāde.....	56
2.3 Adaptīvo meklēšanas algoritmu izpēte un izstrāde.....	59
Gausa-Zeideļa metode.....	60
Metode ar atgriešanos neveiksmīga soļa gadījumā.....	62
Labākā mēģinājuma metode.....	63

Kombinētā labākā mēģinājuma metode ar pārslasīšanu beigu posmā.....	64
Atkārtotošās gadījuma meklēšanas metode.....	64
Gadījuma meklēšanas metode ar noteiktu meklēšanas rādīsu un gadījuma virzienu	67
Monte-Karlo metode	68
Ģenētiskais algoritms	70
2.4 Dzelzceļa transporta ritošā sastāva kustības matemātiskā modeļa izstrāde.....	70
2.5 Vilciena bremžu sistēmas automātiskās vadības algoritma izstrāde	73
2.6 Secinājumi par otro nodaļu.....	77
3. <i>APBS</i> sistēmas elementu darbības un mijiedarbības shēmu un datormodeļu izstrāde	78
3.1 Situācijas raksturojums.....	78
3.2 Drošības prasības mikroprocesoru tehnikas izmantošanai	78
3.3 <i>APBS</i> sistēmas elementu elektrisko shēmu izstrāde	87
3.4 <i>APBS</i> sistēmas elementu un to mijiedarbību datormodelēšana	95
3.5 Secinājumi par trešo nodaļu.....	100
4. Piedāvājamās <i>APBS</i> sistēmas iekārtu prototipu un tās vadības algoritmu eksperimentālā testēšana.....	101
4.1 Situācijas raksturojums.....	101
4.2 Izstrādāto <i>APBS</i> sistēmas darbības algoritmu testēšana laboratorijas apstākļos	101
4.3 Izstrādāto iekārtu prototipu testēšana reālajos darba apstākļos	110
Eksperiments reālajos darba apstākļos nr. 1.....	113
Eksperiments reālajos darba apstākļos nr. 2.....	118
Eksperiments reālajos darba apstākļos nr. 3.....	122
4.4 Secinājumi par ceturto nodaļu	122
5. Testēšanas rezultātu statistiskā analīze	124
5.1 Situācijas raksturojums.....	124
5.2 Iegūto eksperimentu datu statistiskā analīze.....	124
5.3 Secinājumi par piekto nodaļu	137
Secinājumi	138
Literatūras saraksts	140
Pielikumi.....	156

IEVADS

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 [147]. 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 [195, 193], 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 [159, 193]. 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 ilgu laiku izmantojamās metodes (automātika, manuālā vadība u. tt.) neļauj sasniegt optimālo risinājumu, savukārt otrais 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 tikai savas attīstības stadijā, līdz ar ko prasa ievērojamus pētījumus gan teorētiskajā līmenī, gan no praktiskās izmantošanas 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 jauno 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 iespējamību.

Literatūras apskats

Atbilstoši promocijas darba tēmai autors promocijas darba turpinājumā apskata literatūru, kas pārsvarā ir saistīta ar adaptīvas vadības sistēmām, to funkcionēšanas algoritmiem, iebūvētajām intelektuālajām iekārtām un dzelzceļa transporta vadības un drošības sistēmām.

Adaptīvie vadības algoritmi

Pirmie ievērojamie pētījumi saistībā ar adaptīvo vadības algoritmu izstrādi aizsākas pagājušā gadsimta 30-tajos gados, kad tiek risināti ražošanas iekārtu darba optimizācijas un iekšdedzes dzinēju lietderības koeficienta palielināšanas uzdevumi [1, 2].

Pirmie pētījumi tādā vai citā veida balstās uz objekta statistiskās raksturlīknes ekstrēma automātisko meklēšanu, kas ļauj realizēt automātisko regulēšanu pēc regulējamo parametru maksimuma vai minimuma vērtībām. Šo regulatoru darbībai ir nepieciešams pielietot meklēšanas metodes.

Vienus no pirmajiem pētījumiem sakarā ar šo tēmu veic J. S. Hlebcevičs (*Ю. С. Хлебцевич*) un V. V. Kazakevičs (*В. В. Казакевич*).

Turpinājumā pagājušā gadsimta 40-tajos un 50-tajos gados ekstrēma regulatoru teorijas jautājumus pēta daudzi zinātnieki visā pasaulē [3, 4, 19, 5, 10, 6, 7, 8].

Pirmie sistemātiskie ekstrēma regulēšanas apraksti automātiskās optimizācijas jautājumos parādās grāmatā ar nosaukumu „Automātiskās optimizācijas principi” [32], kura tiek izdota ASV Č. S. Dreipera (*C. S. Draper*) un I. T. Li (*Y. T. Li*) redakcijā. Šajā grāmatā tiek apkopoti pētījumi, ko veikuši darbinieki no vienas ASV aviācijas automātikas laboratorijas.

Plašu pētniecības darbu sarakstu, kuri tiek izdoti līdz 1958 g., ir apkopojusi savā rakstā [10] Dž. E. Ezeltains (*J. A. Aseltine*), A. R. Mancini (*A. R. Mancini*), K. V. Seirturs (*Sarture C. W.*).

Tiek pieņemts, ka lielākā daļa pirmo pētniecisko darbu par adaptīvajiem algoritmiem apskata objektu modeļus to statisko attēlojumu veidā, tomēr vēlāk daži autori paplašina pieļaujamo sistēmu klasi līdz R. Vīnera (*R. Wiener*) un Hammerštaina (*O. Hammerstein*) modeļiem [11].

Ar ekstrēma regulēšanas sistēmu stabilitātes jautājumiem, determinētu nelineāru dinamisko objektu vadībā noslēgtā kontūrā, zinātnieki visā pasaulē ir nodarbināti vairāk nekā 40 gadus, līdz brīdim, kamēr 2000. gadā M. Krističs (*M. Krstic*) un H. Vangs (*H. Wang*)

izdod savu grāmatu [12], kurā tiek atspoguļotas teorētiski apstiprinātas ekstrēma regulatoru izmantošanas shēmas dinamisko nelineāro sistēmu vadībai. Šeit galvenais objekta modeļa analīzes instruments balstās uz vidējā rezultāta meklēšanas metodēm.

Šeit var atzīmēt [13] literatūrā aprakstīto adaptīvo regulatora principu, kas tiek saukts par „pašorganizējošais optimālais regulators ar ekstrapolāciju”, kas nodrošina gan parametrisko, gan strukturālo sistēmas adaptāciju. Galvenais šāda veida regulatora darbības princips balstās uz *Kalmana-Bjusi* filtra (*Colemann-Busse filter*) ciklisko kovariāciju matricas elementu uzdošanu.

Iespējamie ekstrēma regulatoru izmantošanas piemēri tiek atspoguļoti literatūrā [14], kur tiek aprakstīta transporta riteņu antibloķēšanas sistēmas darbība, literatūrā [15], kur tiek aprakstīts elektromehānisko vārstu „laidenas” vadības process, kā arī daudzos citos visas pasaules pētnieku izdevumos [83, 152, 14 u. c.].

Neskatoties uz to, šī tipa vadības algoritmu pielietošana praksē vairāku iemeslu dēļ nav plaši izplatīta. Šie iemesli rodas tāpēc, ka sarežģītākos rūpniecības objektos nav iespējams veikt mēģinājuma soļus, kas prasa lielus līdzekļu ieguldījumus un traucē normālam sistēmas darba režīmam, kā arī tas, ka šādos algoritmos ekstrēma meklēšana, izmantojot mēģinājuma signālus, prasa ievērojamu laiku, kuram noritot objekta statistiskā raksturlīkne var mainīties tik ļoti, ka optimizācija jau kļūst neefektīva.

Savukārt apskatot bezmeklēšanas tipa metodes adaptācijas algoritmus, promocijas darba autors vēlas atzīmēt literatūru [16, 33, 17], kurā plaši aprakstītas nepārtrauktu pašorganizējošos sistēmu funkcionēšanas dinamikas īpašības, pielietojot dažādus funkcijas gradienta meklēšanas principus.

Apskatot attiecīgo literatūru, promocijas darba autors secina, ka praktiski visi šī tipa adaptācijas algoritmi balstās uz sekojošām to iegūšanas metodēm, kuras tiek klasificētas pēc šo sistēmu sarežģītības un sekojošiem parametriem [19]:

- a) augsts kontūra pastiprinājuma koeficients;
- b) meklējamo parametru izmaiņa programmas vidē;
- c) parametru izmaiņa atkarībā no sistēmas kvalitātes kritērijiem;
- d) sistēmas struktūras izmaiņa atkarībā no nepieciešamā tās kvalitātes rādītāja.

Līdz ar ko tiek izvirzīts pieņēmums, ka paņēmiens a) ir visvienkāršākais no visiem un parasti tiek izmantots gadījumā, ja nav iespējams iegūt informāciju par objekta nemodelējamo jeb parazīt dinamiku. Teorijā šādus regulatorus, kas paredz iespēju mainīt vadības kontūra pastiprinājuma koeficientu līdz bezgalīgiem lielumiem, sauc par

„regulatoriem ar bezgalīgu koeficienta pieauguma robežu” (*infinite gain margin controllers*). Savukārt tips b), kurā tiek realizēta meklējamo parametru izmaiņa programmas vidē, kas uz doto brīdi ir viens no interesantākajiem risinājumiem, tiek aprakstīts R. H. Mideltona (*R. H. Middleton*), G. K. Gūdvina (*G. C. Goodwin*) un citu darbā [20], kā arī E. S. Morze (*A. S. Morse*), D. Meine (*D. Mayne*) un citu darbā [21], kur adaptīvā regulatora parametri tiek mainīti atbilstoši programmai, kura tiek realizēta izmantojot shēmas ar histerēzi. Par pārslēgšanas kritēriju šajā gadījumā tiek pieņemta kvalitātes funkcionāla vērtība. Norādītajos darbos tiek definēts, ka kontrolera izvēle no to galīgā skaita notiek secīgā cikliskā veidā. Šādu ideju savā darbā [22] apraksta arī K. S. Narendra (*K. S. Narendra*) un Dž. Balakrišnan (*J. Balakrishnan*), kur šī pārslēgšanās notiek atkarībā no sistēmas darba apstākļiem, kuru jau var pieskaitīt pie c) tipa adaptīvajiem vadības algoritmiem.

Pie šī tipa algoritmiem visdrīzāk var attiecināt visu lielo pētījumu kopu mūsdienu parametrisko regulatoru pētījumos, kur regulatora parametri tiek uzstādīti atbilstoši gradienta tipa algoritmiem.

Savukārt paņēmiens d) var tik uzskatīts kā paņēmienu c) apakšklase, kurā ir nepieciešamas vadības funkciju parametrizētās lineārās kombinācijas vienas vienīgas funkcijas vietā. Šī tipa algoritmu izmantošana parasti ir lietderīga apstākļos, kad trūkst informācijas pa vadāmā objekta dinamiskajām īpašībām. Literatūrā [23] D. I. Gibsons (*D. I. Gibson*) analizē pašorganizējošās sistēmas ar vairākiem parametriem un šo sistēmu atbilstošās skaitļojamās mašīnas. Dotajā literatūrā autors apstrīd terminu „pašorganizējošās sistēmas” un izdala trīs galvenos pašorganizēšanas vai adaptācijas procesa pamatposmus:

- a) optimālo darba apstākļu un tiem atbilstošā kvalitātes kritērija noteikšana;
- b) esošo raksturlīkņu salīdzināšana ar optimālajām;
- c) sistēmas uzstādījumu regulēšana ar mērķi pietuvināt esošās raksturlīknes pie optimālajām.

Šeit procesi b) un c) risinās automātiski, savukārt uzdevumu a) risina izstrādātājs sistēmas projektēšanas sākumposmā.

Savukārt pēc Dž. T. Tu (*J. T. Tou*) domām, pie adaptīvās vadības sistēmām ir pieskaitāmas tās vadības sistēmas, kurās vadība, kas apraksta procesa dinamiku, un statistiskās signālu īpašības ir pilnībā vai daļēji nezināmas [24].

R. Bellmana (*R. Bellman*) darbos [25, 26, 27, 42, 28] tiek ieviesta adaptīvās vadības mijiedarbības stratēģija, kas balstās uz gadījuma parametru vērtību novērtēšanu un stohastisko procesu optimālās vadības sintēzi uz dinamiskās vadības teorijas bāzes. Tādā

veidā literatūrā [28] adaptācijas process iegūst sekojošas īpašības: a) identifikācija plaši pieņemtas statistikas formā; b) stohastiskā vadība.

Dž. Traksels (*J. Traksel*) literatūrā [30, 29] izsaka viedokli par to, ka nav iespējams sadalīt vadības sistēmas divās klasēs – adaptējošās un neadaptējošās, jo pat vienkāršu vienkontūra vadības sistēmu var uzskatīt par adaptējošos, ja galveno uzmanību vērš uz pastiprināšanu kontūra atpakaļ saitē, kas samazina jebkuru objekta parametru variāciju ietekmi. Uz šāda viedokļa pamata, Dž. Traksels ievieš trīs dažādus pielāgošanās principus:

- a) objekta darba statisko apstākļu optimizācija, kas parādījās darbos, kurus uzrakstīja Č. S. Dreipers (*C. S. Draper*), H. Š. Tsiens (*H. S. Tsien*), A. G. Ivahnenko (*A. Г. Ивахненко*) un citi autori [3, 34, 31, 10, 6], kur darbi tika saistīti ar adaptīvo sistēmu izstrādi ar automātisko funkcionāla ekstrēma meklēšanu;
- b) vadības sistēmas ar automātisko objekta dinamiskas korekciju, izmantojot vadības sistēmas raksturlielņu pielāgošanu. Šeit būtu svarīgi atzīmēt, ka tieši šis adaptācijas virziens tika attīstīts turpmākajos pētījumos līdz pat mūsdienām pašorganizējošo pašregulējošo sistēmu klasē;
- c) vadības sistēmas ar beigu vērtību, kurā skaitļojamās mašīnas izstrādā tādu vadības signālu, kurš ļautu regulējamai sistēmai sasniegt tās optimālās īpašības konkrētā laika brīdī. Šādu sistēmu strauja izstrāde un attīstība aizsākās pagājušā gadsimta 50-tajos gados, kad parādījās pirmās skaitļojamās mašīnas.

Tādējādi Dž. Trakstela loģiskās teorijas koncepcija noved pie sekojošiem adaptīvās vadības mehānismiem – optimizācija, identifikācija, kurā tiek izmantota sistēmas raksturīpašību jūtības novērtēšana, un stabilitātes nosacījumu analīze nelineārās sistēmās.

A. A. Feldbauma (*A. A. Feldbaum*) un citu iepriekšminēto autoru darbos [25, 37] adaptācija tiek aprakstīta, kā sistēmas iespēja mainīt savu struktūru un pieskaņoties atbilstoši apkārtējās vides izmaiņām.

Kopumā dinamisko sistēmu adaptīvo raksturlielumu vadīšanai pagājušā gadsimta 50-tajos un 60-tajos gados formulētās idejas balstās uz identifikācijas paņēmieni. Šajā pat laikā parādās cita pieeja sistēmu pašapmācībā [37, 42, 55], kurā tiek pielietota regulēšanas likumu vai stratēģijas izmaiņa apstākļos, kad notiek sistēmas funkcionēšanas apstākļu neprognozējamas izmaiņas.

Adaptīvās vadības matemātiskās uzdevuma nostādnes izstrādei un aprakstam savus darbus [75, 44, 45, 50, 58, 51, 49, 46, 47, 48, 61, 52] velta V. G. Sragovičs (*В. Г. Срагович*),

Dž. Dž. Florentins (*J. J. Florentin*), R. C. Lī (*R. C. Lee*), L. A. Zadē (*L. A. Zadeh*) un citi autori. Apskatīsim dažus no tiem. L. A. Zadē [343] apraksta adaptācijas procesu kā sarežģītu problēmu, kurā nenoteiktība rodas paša objekta adaptīvās uzvedības un adaptīvā vadības mehānisma mijiedarbības rezultātā. Šo divu alternatīvo sastāvdaļu apvienošana ir nepieciešama ilustrācijas nolūkiem, jo nepastāv iespēja stingri matemātiski aprakstīt visus iespējamās adaptācijas mehānismus. Līdzīgas domas savā monogrāfijā [47] izsaka arī D. Saridis (*D. Capuduc*).

Veicot plašāku literatūras [54, 55, 56, 57, 53] analīzi, parādās arī citi adaptīvo vadības algoritmu klasifikācijas principi, kuri parādījās iepriekš aprakstītajā laika periodā, taču promocijas darba autors savā darbā tos sīkāk neapskata.

Literatūrā [59] A. A. Voronovs (*A. A. Воронов*) un V. J. Rutkovskijs (*В. Ю. Рутковский*) apkopo sasniegumus adaptīvās vadības teorijā uz pagājušā gadsimta astoņdesmito gadu momentu, kuri tiek veltīti analītiskajām un pašorganizējošām sistēmām, pie kurām tiek pieskaitītas sistēmas ar pašorganizāciju pēc frekvences un laika raksturlīknēm, kā arī sistēmas, kuras darbojas izmantojot objekta etalonmodeli. Tajā pat laikā tiek veikta daudzu konkrētu bezmeklēšanas pašorientējošo sistēmu klasifikācija pēc darba principa: sistēmas bez iepriekšējās objekta identifikācijas, kuras ieguva nosaukumu „sistēmas ar tiešo adaptīvo vadību” (*direct adaptive control vai model reference adaptive systems*) un sistēmas ar pastāvošo objekta dinamisko īpašību un ārējas vides iedarbību identifikāciju, kuras ieguva nosaukumu „identifikācijas adaptīvās sistēmas”. Literatūrā, kas ir publicēta angļu valodā, bieži vien šī veida sistēmas tiek sauktas par „netiešās adaptīvas vadības sistēmām” (*indirect adaptive control systems*).

Tālāk promocijas darbā autors apskata literatūru, kura ir aprakstītas adaptīvo vadības sistēmu sintēzes metodes nelineāro dinamisko sistēmu vadībā. Informācija dotajā jautājumā tiek izpausta rakstā [60], no kuras izriet, ka adaptācijas problēma vēsturiski rodas sistēmu uzvedības optimizācijas uzdevumos, savukārt visi iepriekš aprakstītie adaptīvo vadības sistēmu iedalījumi nespēj pilnā mērā aprakstīt pašu adaptācijas algoritmu sintēzes metožu specifiku. Šī uzdevumu vieni no risinātājiem ir V. N. Fomins (*В. Н. Фомин*) un A. L. Fradkovs (*А. Л. Фрадков*), kuru vieni no darba rezultātiem tiek atspoguļoti literatūrā [82, 84]. Tā rezultātā var izdalīt divas adaptācijas algoritmu metodes, kur pirmā saistīta ar izliktas un lineāras parametrizācijas un otra ar nelineāras parametrizācijas uzdevumiem. Pietam, kā atzīmē J. Z. Cipkins (*Я. З. Ципкин*) savā monogrāfijā [64], loģiski būtu sadalīt

adaptīvo vadības sistēmu sintēzes metodes pēc mērķa kritērija izvēles. Atbilstoši tam rodas sekojošs iedalījums:

1) Sistēmas ar izliektu un lineāru parametrizāciju.

Šajā gadījumā sintēzes procesa augšgalā atrodas objekta regulatora vienādojumi pieņemtajam objekta modelim, bet tam seko šī regulatora parametru iestatīšanas algoritmi. Šī adaptīvo sistēmu sintēzes metode dotajā brīdī ir visur pieņemta. Pirmā uzdevuma risināšanai izmanto vadības teorijas metodes, kas ir aprakstītas ar vispārīgā veida diferenciālvienādojumiem.

Pie šī veida algoritmiem pieder ātruma gradienta metode, kuru pirmo reizi piedāvā A. L. Fradkovs [63], adaptīvo sistēmu sintēzes metode uz nelineāro dinamisko objektu modeļu kanonisko formu bāzes [65, 66], kuru savos darbos attīstīja A. Isidori (*A. Isidori*), I. Kanelakolus (*I. Kanellakoulos*), P. Kotokovičs (*P. Kokotovic*), A. Morze u. c. un integratora adaptīvās apejas metode [67], kuru izstrādāja Z. Jiangs (*Z. Jiang*), L. Prailijs (*L. Praly*) un citi 90-to gadu sākumā.

2) Sistēmas ar neizliektu un nelineāru parametrizāciju.

Šī veida adaptīvās vadības sistēmu arī ieņem zināmu lauku pastāvošajā adaptīvo sistēmu teorijā un dotajā brīdī ir piedāvāts vesels klāsts dažādu darbospējīgu adaptīvo regulatoru sintēzes pieeju, no kurām lielākā daļa balstās uz nelineāri parametrizētas objekta modeļa funkcijas dempfēšanu ar lineāri parametrizētām regulatora funkcijām [68, 69, 71]. Nākamā metožu grupa savukārt balstās uz minimaksimālās adaptīvās vadības tipa sintēzi, kuru savos darbos [74, 73, 72] apraksta A. Kojičs (*A. Kojic*), A. Annasvami (*A. Annaswamy*) u. c. autori.

Iebūvējamās intelektuālās iekārtas

Promocijas darba turpinājumā autors velta uzmanību iebūvējamo intelektuālo iekārtu izpētei.

Literatūrā [171] iebūvējamās intelektuālās iekārtas tiek stādītas priekšā kā mikroprocesoru vadības iekārtas, kas paredzētas funkcionēšanai, iebūvējot tās citā lielākā ierīcē vai sistēmā, ar kuru notiks iebūvējamās intelektuālās iekārtas mijiedarbība. Tiek definēts arī tas, ka iebūvējamā intelektuālā iekārta tiek veidota pēc datoru principa, tomēr lietotājs neuztver to kā datoru, jo tai nav datoram piemītošo perifēro iekārtu un plaši pazīstamo operētājsistēmu. Vienlaicīgi ar to šīm iekārtām, to izstrādes posmā, tiek izvirzītas konkrētas prasības, kuras raksturo to maksimālo enerģijas patēriņu, izmērus, aizsardzības

pakāpi, mikroprocesora esamību un tā funkcionēšanas loģiku, kā arī pildāmās funkcijas u. c. raksturīpašības.

Tādējādi iebūvējamās intelektuālās iekārtas pēc savas definīcijas var tikt uzskatītas par iekārtām, kuras tiek iebūvētas citās lielākās iekārtās vai pat veselās to sistēmas, ar mērķi kaut kādā veidā palielināt šo abu iekārtu funkcionalitāti, ātrdarbību, ekonomiskos rādītājus u. tt. No šo iekārtu nosaukumā redzamā vārda „intelektuālās” var secināt to, ka šīs iekārtas darbojas, pielietojot kādus no zināmiem intelektuālajiem funkcionēšanas algoritmiem. Tas šī promocijas darba ietvaros liek apskatīt intelektuālo sistēmu jēdzienu, kurš ir cieši saistīts ar mākslīgā intelekta izstrādes un pielietošanas teoriju.

Mākslīgais intelekts (*MI*) ir zinātnes un tehnikas attīstības virziens, kurš ir mērķēts uz programmu un iekārtu radīšanu intelektuālo uzdevumu risināšanai [142].

Ideja par cilvēka saprāta modelēšanu parādījās jau seno laikos, tomēr pats termins “mākslīgais intelekts” (*Artificial Intelligence*) tiek piedāvāts tikai 1956. g. ASV. Šeit ir svarīgi atzīmēt to, ka vārds „Intelligence” burtiski nozīmē „spēja domāt saprātīgi”, nevis vārdu „intelekts” (*Intellect*).

Nopietna *MI* izpēte aizsākas pagājušā gs. 50-tajos gados. Tajā laikā N. Vīners (*N. Wiener*) izdod savu grāmatu [149], kurā tiek plaši aprakstīti daudzi jautājumi, kas ir saistīti ar tā laika pētījumiem kibernetikas jomā. Ap to laiku *MI* sāk iedalīties neirokibernetikā un „melnās kastes” kibernetikā, kas turpinājumā attīstās neatkarīgi viena no otras. Šajos gados tiek likti galvenie pamati neirokibernetikā un turpmākajiem pētījumiem neiroinformātikas jomā. Lielu ieguldījumu *MI* attīstībā tajā laikā dod tādi zinātnieki kā A. Novels (*A. Newell*), A. Turings (*A. Turing*), K. Šenons (*K. Shannon*), Dž. Lovs (*G. Low*) u. c.

Pagājušā gadsimta 60-tajos gados „melnās kastes” kibernetikas pētījumi galvenokārt tiek veltīti cilvēka radošo darbību modelēšanai, kas tādā vai citā veidā ir saistīti ar evristisko uzdevuma risināšanas metožu un matemātiskās loģikas attīstību. Tajā laikā rodas jauns plaša intelektuālo uzdevumu loka risināšanas virziens, kura attīstību ievērojami traucē tā laika skaitļojamo mašīnu veikspēja.

1970-tajos gados, pamatojoties uz iepriekš izstrādāto *MI* teorētisko bāzi, rodas jauna datorindustrijas nozare – *intelektuālo sistēmu* izstrāde, kas balstās uz to, ka cilvēka prātojumumu modelēšanā tiek izmantoti loģiskie un evristiskie modeļi, kas pielieto ekspertu sistēmas pieredzi. A. N. Averkins (*A. H. Аверкин*) savā darbā [144] atzīmē, kā visas evristikas (teorētiski nepierādīti likumi) parasti tiek pierakstīti simbolu veidā, kas liek nodrošināt to

noteikšanu, t. i. izstrādāt speciālas formalizācijas, strukturizācijas un manipulācijas u. c. veida metodes. Tēlainas informācijas apstrādes modelēšanai tiek izmantoti citi algoritmi, piemēram, neironu tīkli, ģenētiskie algoritmi u. c. Tāpēc svarīgu lomu *MI*, no vienas puses, aizņem cilvēka saprātīgas uzvedības izpēte, ieskaitot dažādas smadzeņu darbības smadzeņu modelēšanas koncepcijas, bet no otras puses, tiek veikti pētījumi par modeļiem, kas modelē zināšanu priekšstatus un uztveri par apkārtējo vidi.

Tai pat laikā notiek strauja attīstība simboliskās informācijas apstrādes jomā, pateicoties tam, ka Dž. Makkartijs (*John McCarthy*) izveido programmēšanas valodu „*ALGOL*”, bet A. Komeroe (*A. Colmerauer*) loģiskās programmēšanas valodu „*PROLOG*”. Tas rada jaunu zinātniskās pētniecības virzienu, kas pēta iespēju cilvēkam sazināties ar elektrisko skaitļojamo mašīnu cilvēkam saprotamā valodā. Tādā veidā visā pasaulē rodas vairākas dotā tipa valodas. Šī jautājuma pētīšanai [145] rodas vesela zinātnes joma, ko nosauc par kognitoloģiju (zināšanu inženieriju).

70-to gadu beigās un 80-to gadu sākumā notiek pāreja uz tehnoloģisko industrijas zināšanu bāzi. Par pamatu tam kalpo pētījumi, kas ir saistīti ar to, kā iegūt zināšanas no dažāda veida informācijas avotiem, kā tās strukturizēt un formalizēt un kā tās izmantot. Tas prasa ciešu pētnieku sadarbību ar psihologiem, lingvistiem, sociologiem u. c. Rezultātā rodas pirmās komerciālās ekspertu sistēmas, kas tiek izmantotas medicīnā (*MYCIN*) un ķīmijā (*DENDRAL*). Tiek izstrādātas arī jaunas paaudzes elektriskās skaitļojamās mašīnas, kas balstās uz zināšanu bāzi. Tāpat turpina strauji attīstīties arī dažādu programmēšanas valodu joma.

90-to gados aizsākas integrēto intelektuālo sistēmu ēra, rodas integrētas ekspertu sistēmas (*IES*) un daudzagentu sistēmas (*DAS*). Notiek virspusēja tradicionālās programmēšanas industrijas integrācija intelektuālajās sistēmās un tehnoloģijās, tiek izveidotas dažādas sistēmas (*CENTAUR*, *KEE*, *Knowledge Craft*, *CLIPS* u. c.) intelektuālo sistēmu ražošanai.

Autors secina, ka intelektuālo sistēmu jomā ir izstrādāts liels datorsistēmu skaits, kuras tiek pielietotas praktiski visās cilvēces darbības sfēras, kas ir saistītas ar informācijas apstrādi. Kā savā grāmatā [148] S. Rasselss un P. Norvigs (*S. Russell, P. Norvig*) atzīmē to, ka pašas modernākās mūsdienu intelektuālās sistēmas balstās uz antoloģijas un jaunu aģentorientētu piramīdu izmantošanu. Kopumā mākslīgais intelekts tiek definēts kā „zinātne par aģentiem, kas saņem aktu uztveršanas rezultātus un izpilda rīcības, pietam katrs no šiem aģentiem atspoguļo funkciju, kas apraksta saistību starp uztveres un rīcības aktiem”. Kopumā

veicot ar *MI* saistītās literatūras izpēti, autors secina, ka *MI* ir ļoti plaša zinātnes joma un šobrīd nepastāv tās vienota un universāla definīcija.

Atgriežoties pie iebūvēto intelektuālo iekārtu definīcijas, jāsecina, ka šādas iekārtas pamatelementa uzdevums apstrādāt lietotāja iepriekš norādītos algoritmus, ar mērķi, izmantojot piesaistītos izpildorgānus, veikt kāda vadības procesa funkcijas. Šī elementa lomu mūsdienās visefektīvāk pilda dažāda veida mikroprocesori [76], kuru parādīšanās savā laikā nebūtu iespējama, ja 1947. gadā Dž. Berdens (*J. Bardeen*) un V. Braitens (*W. Brattain*) neizgudrotu pirmo tranzistoru [77]. Attīstoties pusvadītāju tehnoloģijām, 1970. gadā M. E. Hoffs (*M. E. Hoff*), strādājot kompānijā Intel, uzkonstruē pirmo integrālo shēmu (pirmais mikroprocesors *Intel-4004*), kas pēc savām funkcijām ir analoga lielas elektriskās skaitļojamās mašīnas procesoram.

Mikroprocesoru plašo izmantošanu izsauc tas, ka tiem piemīt daudz pozitīvu īpašību, piemēram, ātra vadības algoritmu (programmu) iestatīšana un pāriestatīšana, izmantojot dažādas specializētas programmēšanas vides [79, 80, 81]. Mikroprocesoru izmantošana ļauj arī ievērojami samazināt dažādu skaitļojamo mašīnu izmērus, paaugstināt to ātrdarbību un samazināt energopatēriņu.

Mikroprocesori ir galvenais elements tādās iekārtās kā programmējamie mikrokontrolleri un industriāli programmējamie loģiskie kontrolleri (*PLC*), kuri plaši pierādījuši savu darba efektivitāti dažādās vadības sistēmas visdažādākajās tautsaimniecības, ražošanas un citu sfēru visdažādāko sistēmu vadības jomās, un var tikt pielietoti kā iebūvējamo intelektuālo iekārtu pamatelementi. Tāpēc promocijas darba autors apskata literatūru [160, 161, 162], kurā ir aprakstīti dažādu tipu mikrokontrolleri un kontrolleri, to programmēšanas valodas, funkcionēšanas īpašības un citi raksturlielumi.

Jāatzīmē, ka izņemot galveno mikroprocesoru, pie iebūvējamo intelektuālo iekārtu sastāvdaļām pieder arī citi elementi, kas nodrošina iebūvējamo iekārtu mijiedarbību ar apkārtējiem objektiem. Šo elementu skaitā ir mikrokontrolleru vai kontrolleru ieejas vai izejas, kuras parasti ir analogās vai digitālās, informācijas saņemšanas un nosūtīšanas kanāli un to apstrādes bloki, informācijas izvades un ievades elementi u. c.

Tādējādi papildus minētajai literatūrai par iebūvējamām intelektuālām iekārtām, promocijas darba autors apskata literatūru par dažādu sistēmu aprakstiem un to funkcionēšanas īpašībām, kuras mūsdienās ir cieši iesaistītas iebūvējamo intelektuālo iekārtu darbības procesā.

Piemēram, informācijas plūsmu nodrošināšanai starp iebūvējamā intelektuālajām iekārtām, tiek pielietoti dažāda veida informācijas pārsūtīšanas kanāli un interfeisi, kuri tiek aprakstīti literatūrā [162, 163].

Savukārt bezvadu sakaru nodrošināšanai tiek pielietoti dažāda veida radio vai *GSM* sakari, kuru galvenās funkcionēšanas īpašības tiek aprakstītas literatūrā [164].

Tā kā galvenie dzelzceļa transporta sistēmas elementi ir vilcieni un citas kustīgās vienības, tad praktiski jebkuras modernas drošības sistēmas funkcionēšanai ir nepieciešama šo kustīgo vienību pozīcijas noteikšana telpā, kura tiek veikta ar dažādu pozicionēšanas sistēmu palīdzību. Objektu koordināšu noteikšanai tiek izmantota kāda no pavadoņu navigācijas sistēmām, piemēram, Eiropā darbojās paaugstinātas precizitātes pozicionēšanas sistēma *GALILEO*, kuru izstrādāja un uztur Eiropas Savienība un Eiropas Kosmosa Aģentūra *ESA (European Space Agency)* [166]. Vēl pasaulē tiek plaši izmantota ASV globālā pozicionēšanas sistēma *GPS (Global Positioning System)*, kuru izstrādāja ASV Aizsardzības ministrija un kuru uztur ASV Gaisa spēki. No 1976. gada Krievijā tiek izmantota pozicionēšanas sistēma *GLONASS (ГЛОНАСС – Глобальная Навигационная Спутниковая Система)* [165].

Promocijas darba zinātniskās un praktiskās vērtības paaugstināšanai, promocijas darba autors apskata arī citu pieejamāko un izplatītāko Latvijas autoru izstrādāto literatūru, kas tiešā vai netiešā veidā ir saistīta ar dotā promocijas darba tēmu.

Tāpēc jāatzīmē, ka arī Latvijā intelektuālo iekārtu izmantošanas iespējas transporta sistēmās tiek plaši pētītas no dažādiem to pielietošanas iespēju redzeslokiem. Daudzus transporta vadības sistēmu izpēti un izstrādes tēmai veltītus darbus ir izstrādājis *LZA* akadēmiķis, profesors L. Ribickis [84, 87, 91, 92, 89 u. c.]. Profesors I. Raņķis un asoc. profesors V. Bražis ir veikuši ievērojamus pētījumus elektriskā transporta vadības un elektroenerģijas rekuperācijas sistēmu izstrādē [88, 40, 86 u. c.]. Profesori J. Dirba, K. Ketners un J. Valeinis veikuši lielu ieguldījumu elektriskās piedziņas un elektrisko vilces dzinēju izpēti un izstrādes jomā. Profesors A. Ļevčenkovs ciešā sadarbībā ar doc. M. Gorobecu un kolēģiem savu zinātnisko darbību velta tieši transporta plūsmu optimālas vadības izpētei [99, 100, 101, 102, 103], sarakstu teorijas un evolucionāro algoritmu pielietošanas iespēju izpētei transporta plūsmu vadībā [93, 98, 108, 109] un intelektuālo iebūvējamo iekārtu izstrādei [107]. A. Ļevčenkovs ir arī autors un līdzautors daudziem rakstiem un monogrāfijām, kas ir veltīti transporta vadības sistēmu izstrādei no to datu plūsmu vadīšanas viedokļa [110, 110, 111, 113, 114, 115, 116, 90].

Daudzi Latvijas zinātnieki ir veikuši arī mākslīgā intelekta izpēti. Profesors J. Grundspenķis veicis ievērojamus pētījumus intelektuālo sistēmu jomā [95], profesors L. Rastrigins adaptīvo vadības algoritmu jomā, kura sasniegumus promocijas darba autors vēlas izcelt atsevišķi, par viņa sekojošiem darbiem [167, 168, 169], A. Borisovs vispārīgo mākslīgā intelekta metožu un ģenētisko algoritmu jomā [118], profesors A. Glazs, kurš ilgu darba gadus ir veltījis kibernetikas un datorgrafikas jomas pētījumiem [170], kā arī daudzi citi.

Apskatot aizstāvētos promocijas darbus, autors vēlas atzīmēt Rīgas Tehniskajā universitātē O. Krūmiņa izstrādāto un aizstāvēto promocijas darbu [119], kurā viņš aplūko intelektuālo transporta sistēmu izveides principus un iespēju ar intelektuālām iekārtām vadīt autotransporta vienības. Šajā promocijas darbā arī tiek aplūkota iespēja, koordinēti vadot luksoforu darbību, palielināt ceļu posmu caurlaides spēju autotransportam, bet netiek aplūkota piedāvājamās sistēmas darbības ietekme uz dzelzceļa transporta plūsmu un tās iespējamo prioritāti.

I. Beinarts savā promocijas darbā [119] pēta sabiedriskā transporta salonu mikroklimata regulēšanas iespējas, izmantojot izplūdušās loģikas programmējamus kontrollerus, taču neaplūko mākslīgā intelekta un programmējamo kontrolleru izmantošanas iespējas transporta vadībai.

M. Gorobecs [99] savā promocijas darbā apraksta elektriskā transporta optimālās vadības uzdevumu, pielietojot mākslīgo intelektu, sarakstu teoriju, evolucionāros un ģenētiskos algoritmus, kā arī neironu tīklus. Par mērķa funkcijas galvenajiem kritērijiem M. Gorobecs izvirza elektroenerģijas patēriņa minimizēšanu, procesu ātruma maksimizēšanu un procesu izpildīšanas laika minimizēšanu. Saskaņā ar minētajiem kritērijiem tiek izstrādāts elektromehānisko objektu kustības vadības matemātiskais modelis, bet kustības vadības modelī netika ņemti vērā tādi kritēriji sistēmas transportlīdzekļu bremsēšanas īpašības dažādiem transporta veidiem, tajā skaitā arī dzelzceļa transportam.

Savukārt I. Uteševs savā promocijas darbā [121] aplūko elektriskā sliežu transporta bremsēšanas vadības algoritmus, izmantojot iebūvētās intelektuālās iekārtas. Promocijas darba galvenā mērķa funkcija ir saistīta ar vilciena apstādināšanu pirms luksofora ar aizliedzošo gaismas signālu. Par šī promocijas darba nepilnību var tikt uzskatīts tas, ka netiek izpētīta iespēja nodrošināt vilciena apturēšanu pirms kāda cita ritošā sastāva objekta vai, piemēram, maršrutā paredzētajā pieturā, kā arī tas, ka vilciena apturēšana paredzēta tikai

pielietojot avārijas bremsēšanu režīmu, kas manāmi ierobežo šādas sistēmas pielietošanas iespējas vilcienu apturēšanai standartās darba situācijās.

A. Berežņojs savā promocijas darbā [122] pēta autotransporta plūsmas un to blīvumu noteicošos faktorus atsevišķos ceļu posmos, bet neapskata minēto autotransporta plūsmu mijiedarbību ar dzelzceļa transporta plūsmām.

Ievērojot to, ka Latvijā ekspluatējamā dzelzceļa transporta sistēma pamatā vēl ir aizgūta vēl no *PSRS* laikiem, tiek apskatīti arī Krievijas zinātnieku aizstāvētie promocijas darbi par tēmām, kas ir saistītas ar šī promocijas darbu. Tā, piemēram S. Džiraphons (*С. Джиранхон*) savā promocijas darbā [139] apraksta netiešās parametriskās adaptācijas algoritmu pielietošanas iespējas dinamisko slodžu izvērtēšanai dažādos slodzes apstākļos un apbilstošo mēriekārtu izstrādi uz minēto algoritmu bāzes.

A. N. Antropovs (*А. Н. Антропов*) savā promocijas darbā [140] apraksta liela ātruma kravas vilcienu pneimatiskās bremžu sistēmas darbības uzlabošanas iespējas un apraksta prasības, kuras jāizvirza jaunām vilciena bremžu sistēmas iekārtām.

J. V. Komkovs (*Е. В. Комков*) savā promocijas darbā [141] apraksta automātiskas precīzas (pēc apstāšanās punktā) vilciena bremsēšanas sistēmu, sastāda šīs sistēmas matemātisko modeli, kā arī pēta vilciena masas noteikšanas algoritmus, vilciena bremsēšanas procesā.

M. G. Komogorcevs (*М. Г. Комогорцев*) savā promocijas darbā [142] veic vilcienu kustības drošības nosacījumu analīzi, apraksta salīdzinošu kontroles aparatūras signālu filtrācijas metožu analīzi un apraksta izstrādāto svarīgu parametru kontroles sistēmu dzelzceļa transportam.

Tas, ka mūsdienās adaptīvo vadības sistēmu un iebūvējamo intelektuālo iekārtu izmantošana visdažādākās sistēmas ir plaši izplatīta un aktuāla, apliecina arī neskaitāms publikāciju un referātu skaits dažādās lielās starptautiskās konferencēs [150, 151, 152, 153, 154, 155 u. c.].

Savukārt tēmas aktualitāti no praktiskā pielietojuma skatupunkta apliecina ļoti liels daudzums izstrādāto patentu, kuros tiek patentētas iekārtas, veselas sistēmas vai to darbības algoritmi, elektriskā un dzelzceļa transporta vadībai. Tā, piemēram, savus izgudrojumus pasaules līmenī ir patentējuši T. Jasuši (*T. Yasushi*) [130], Č. O. D. Torres (*C. O. D. Torres*) [131], K. Dž. Klinemans (*C. J. Klineman*) u. c. [132], A. J. Smits (*A. E. Smith*) [133], A. Štriberskis (*A. Shtriberski*) [134], M. Liu (*M. Lui*) [135], B. I. Vetlugins (*Б. И. Ветлугин*)

u. c. [137], U. Rozeknkranes (*U. Rosenkranz*) u. c. [137], kā arī daudzi citi patenti, kuru skaits ar katru dienu palielinās.

Tomēr jāatzīmē, ka daudzos iepriekšminētajos literatūras avotos autori dzelzceļa transporta vadības un drošības sistēmu realizācijas uzdevumus neapskata no adaptīvo vadības algoritmu un iebūvējamo intelektuālo iekārtu pielietošanas puses. Adaptācijas algoritmi minēto uzdevumu risināšanai tiek aplūkoti teorētiski, bez priekšlikumiem par to praktisko izmantošanu ar transportu sistēmu vadību saistīto uzdevumu risināšanai, netiek piedāvāts arī adaptīvo vadības algoritmu pielietojums dzelzceļa transporta kopējās pretsadursmju sistēmas vadīšanai un šo uzdevumu risināšanai netiek pētītas iebūvēto intelektuālo iekārtu pielietošanas iespējas.

Pēc veiktā literatūras apskata promocijas darba autors secina, ka:

- Adaptīvo algoritmu teorētiskais pamatojums balstās uz plaši aprakstītu matemātisko aparātu, tomēr šobrīd praktiskais pielietojums šī veida algoritmiem ir salīdzinoši mazs;
- Salīdzinot ar citiem vadības algoritmiem, kas pēc savas būtības un funkcionēšanas principiem varētu būt salīdzināmi ar adaptīvajiem algoritmiem, var secināt, ka adaptīviem algoritmiem piemīt virkne pozitīvu unikālu īpašību (piemēram, *PID* regulatori, kas tagad plaši tiek izmantoti rūpniecībā, nodrošina vadības procesu pēc regulējamā objekta izejas, nevis pēc tā stāvokļa, kā tas ir, pielietojot adaptīvos algoritmus. Tas savukārt paver mazākas iespējas noslēgtas sistēmas dinamikas korekcijai);
- Literatūrā ir sastopama informācija, par elektriskā transporta automātiskām bremžu sistēmām, bet tajā nav minēta adaptīvo algoritmu izmantošana laidenai un precīzai elektriskā transporta apturēšanai;
- Adaptācijas algoritmi šobrīd tiek plaši izmantoti dažādu citu mehatronisku procesu vadībā, kas nav saistīti ar doto promocijas darba tēmu;
- Datorvadības tehnoloģiju strauja attīstība pēdējā laikā ļauj ievērojami plašāk izmantot līdz šim izstrādātos matemātiskos pamatojumus dažādiem sarežģītiem algoritmiem.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izpētīt esošās un izstrādāt jaunas adaptīvās vadības sistēmas dzelzceļa transporta 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 pielietošanas 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 un darbības algoritmi adaptīvās vilciena laidenās un precīzās bremzēšanas sistēmai:

1. Vispārējs adaptīvās vilciena laidenas un precīzās bremsēšanas 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 10th International Conference”, Polija, Katowice-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 11th International Conference”, Polija, Katowice-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 „25th 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 „Rītošā 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 „2nd International Doctoral School of Electrical Engineering and Power Electronics”, Latvija, Rīnīši 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 9th 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 51th 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 5th 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 11th 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 52th 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 7th 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 53th 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 8th International Conference (ITELMS’2013), Lithuania, Kaunas: Technologija, 2013. – pp 196.–199.
12. Potapovs, A., Gorobets, M., Ļevčenkova, A. „Adaptive System of Smooth and Accurate Braking of Railway Transport” // Proceedings of 8th International Conference (ITELMS’2013), Lithuania, Kaunas: Technologija, 2013. – pp 190.– 195.
13. Potapovs, A., Gorobets, M., Ļevčenkova, A. „Mathematical Modelling of Smooth and Precise Adaptive Train Braking System” // Proceedings of the 3rd 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 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.

1. PROMOCIJAS DARBA UZDEVUMA NOSTĀDNES FORMULĒŠANA ADAPTĪVAI DZELZCEĻA TRANSPORTA BREMŽU SISTĒMAS VADĪBAI

Situācijas raksturojums

Balstoties uz veikto literatūras apskatu, uzstādīto darba mērķi un uzdevumiem, promocijas darba pirmajā nodaļā tiek veikts neliels ieskats izplatītāko dzelzceļa transporta ritošo vienību vadības sistēmu izpētē, ar mērķi izcelt to trūkumus un piedāvāt to iespējamus risinājumus. Atbilstoši tam, otrajā apakšnodaļā tiek aprakstītas piedāvājamās vilcienu adaptīvas, precīzas un laidenas bremsēšanas sistēmas (*APBS*) elementi un to mijiedarbības shēmas. Pēc minēto shēmu un elementu apraksta tiek veikts arī *APBS* sistēmas kopējā darbības algoritma apraksts.

Nodaļas beigās tiek izstrādāta mērķa funkcija un izvirzītas hipotēzes, kā arī izteikti secinājumi par paveikto dotajā promocijas darba nodaļā.

Dzelzceļa transporta ritošo vienību vadības sistēmu izpēte

Jebkuras jaunas sistēmas izstrādē svarīgs posms ir esošās infrastruktūras funkcionēšanas algoritmu izpēte un analīze. Ņemot vērā to, ka veiktā teorētiskā materiāla izpēte aptver plašu iespējamā praktiskā pielietojuma loku, autors šajā promocijas darba apakšnodaļā izceļ konkrētu ekspluatācijā esošo dzelzceļa transporta vadības sistēmu trūkumus, ar mērķi promocijas darba praktiskajā daļā sniegt definēto problēmu risinājumus.

Veicot atbilstošās literatūras [95, 191] analīzi, var teikt, ka dzelzceļa transporta ritošo vienību vadības un drošības sistēmu izstrāde notiek kompleksā formā, t. i. bieži vien šādu sistēmu ieviešana ekspluatācijā prasa lielus ieguldījumus dzelzceļa transporta infrastruktūrā, ar tās elementu daļēju vai pat pilnīgu nomaiņu. Šādu pieeju var realizēt tikai ļoti lielu un finansiāli dārgu projektu ietvaros, tādēļ promocijas darbā piedāvājamās *APBS* sistēmas viena no pamatīpašībām ir tās spēja darboties autonomi, neatkarībā no citām vadības sistēmām.

Pasaulē pastāv vairākas dzelzceļa transporta vadības un drošības sistēmas, kuras tiek plaši pielietotas dažādās pasaules valstīs.

Tā, piemēram, Krievijā un daudzās bijušās *PSRS* sastāva valstīs tiek izmantota dzelzceļa transporta vadības sistēma, kur par bāzes iekārtu kalpo *KLUB-U (KJVB-Y -*

унифицированное комплексное локомотивное устройство безопасности). Šī iekārta var tikt pielietota dažādos lokomotīvu tipos un visos dzelzceļa posmos ar autonomo vai elektrisko līdzstrāvas vai maiņstrāvas vilci, kas ir aprīkoti ar *ALSN* (*АЛСН – путевые устройства автоматической локомотивной сигнализации*), automātiskas bremžu vadības sistēmu *SAUT* (*САУТ – система автоматического управления тормозами*) un vilcienu kustības koordināšu regulēšanas sistēmu uz ciparu radiokanāla bāzes, kā arī citām pieejamām dzelzceļa drošības un vadības sistēmām [199, 200].

Galvenās sistēmas funkcijas ir:

- *ALS* (*ALSN, ALS – EN*) signālu pieņemšana, dešifrēšana un attēlošana lokomotīves luksoforā, attēlojot informāciju par priekšā esošo lauka luksoforu;
- Atļautā kustības ātruma kontrole atkarībā no *ALS* un elektroniskās kartes rādījumiem;
- Automātiska vilciena apstādināšana pirms luksofora ar aizliedzošo gaismas signālu *ALS* kodētā ceļa posmā, nesankcionētas kustības uzsākšana, kustības parametru un sistēmas darbības pamatrādītāju reģistrēšana;
- Signālu pieņemšana no ciparu radiokanāla (*RK*);
- Navigācijas sistēmas *GPS/Glonass* signālu pieņemšana un apstrāde;
- Maršruta koordinātes noteikšana izmantojot elektronisko karti un navigācijas sistēmu;
- Lokomotīves mašīnista modrības kontrole;
- Bremžu sistēmas parametru (spiediens bremžu maģistrālē, spiediens bremžu cilindros un izlīdzināšanas rezervuārā) kontrole;
- Datu reģistrēšana elektroniskā datu nesējā u. c.

Neskatoties uz plašo funkciju klāstu, *KLUB – U* iekārta pastāv vairākas nepilnības, kas izpaužas tajā, ka netiek nodrošināta automātiska datu apmaiņa starp tuvākajiem vilcieniem maršrutā, netiek realizēta vilciena apturēšana noteiktā punktā un pastāv zema sistēmas darbības efektivitāte nekodētos ceļa posmos.

Eiropā tiek pielietota „Eiropas Dzelzceļa Transporta Vadības Sistēma” (*ERTMS – European Train Control System*), kuras pamatā vilcienu vadībai tiek pielietota „Eiropas Vilcienu Vadības Sistēma” (*ETCS – European Train Control System*) [201].

Signalizācijas sistēma (*CCS – Control Command and Signaling*) kopumā nepilda vilciena bremzēšanas sistēmas funkcijas. *ETCS* (un citas speciāli izstrādātas *CCS* sistēmas)

kontrolē vilciena atrašanas vietu un ātrumu, lai tas pastāvīgi brauktu ar atļauto ātrumu un noteikto distanču robežās no citiem objektiem.

Ja ir nepieciešams, tā var regulēt bremsēšanas sistēmas darbību tādā veidā, lai varētu izvairīties no iespējamajiem riskiem vilcienam sekojot uzdotajā maršrutā. Šim nolūkam *ETCS* borta dators prognozē vilciena ātruma samazināšanos, ņemot pamatinformāciju no vilciena bremsēšanas dinamikas matemātiskā modeļa un sliežu ceļa raksturojošiem datiem [202]. Šo ātruma samazināšanas prognozi attiecībā pret attālumu sauc par bremsēšanas līkni. Atbilstoši šai prognozei, *ETCS* borta dators reālā laikā aprēķina bremsēšanas attālumus, kas arī var palīdzēt vadītājam uzturēt vilciena ātrumu atbilstošās robežās. Šim nolūkam ir nepieciešams, lai:

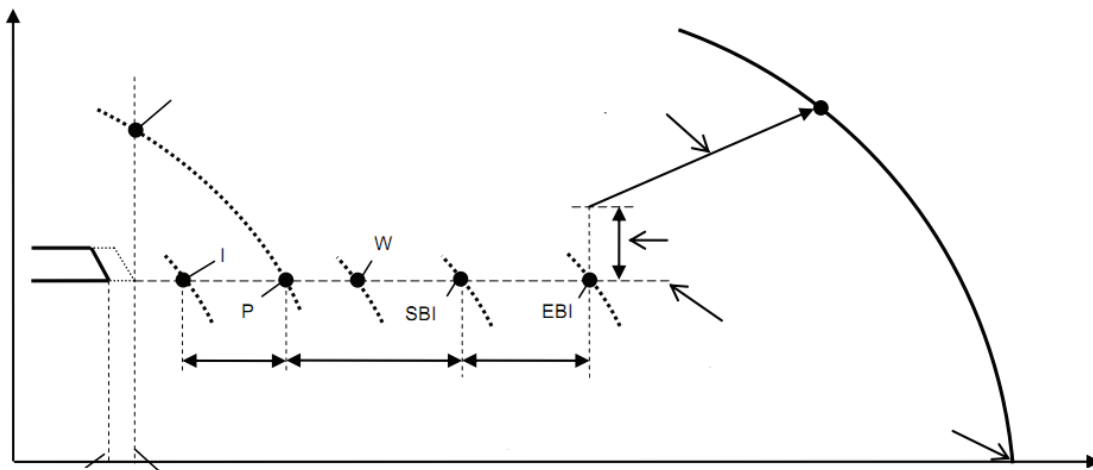
- vilciena kustības parametru izmaiņas attiecībā pret tā bremsēšanas līknēm būtu pilnīgi prognozējamas;
- drošības robežām, kas nosaka bremsēšanas līknes uzticamību, jābūt nepārprotami sadalītām starp sliežu ceļu un borta apakšsistēmām.

Bremsēšanas līkni, kas attiecas uz pēkšņo bremsēšanu, sauc par *EBD* (*Emergency Brake Deceleration*) līkni. Katrai mērķa vietai, kuru nosāka *ETCS* lauka sistēma, *ETCS* borta sistēma izrēķina pilnīgi determinētu *EBD* līkni. Šī līkne ir atkarīga no sliežu ceļa posma un ritošā sastāva tipa. Atbilstoši *EBD* un ātrumam *ETCS* borta iekārta reālā laikā aprēķina attālumu līdz apstāšanai (vai ātruma samazināšanai) no laika momenta, kad *ETCS* borta iekārta palaidīs pēkšņo bremsēšanu. Šeit tiek ņemts vērā:

- vilciena dinamika pirms pēkšņas bremsēšanas;
- bremsēšanas spēka izveidošanas laiks;
- neprecizitāte ātruma mērīšanā.

Šis attālums nosāka pēkšņas bremsēšanas (*EBI – Emergency Brake Intervention*) iejaukšanās punktu, kur *ETCS* ignorē mašīnista rīcības. *EBD* līkni un rezultējošo *EBI* punktu sauc par *ETCS* izpletni.

Mijiedarbība ar mašīnistu notiek, izmantojot noteiktus laika momentus un tajos ģenerētos signālus.



1.1. att. ETCS mijiedarbība ar vilciena mašīnistu

Attēlā (1.1. att.) ir atzīmēti sekojoši laika posmi:

- 1. laika posms (atzīmēts ar P) – vilciena mašīnists var izvairīties no ātruma pārsniegšanas;
- 2. laika posms (atzīmēts ar SBI) – vilciena mašīnists var izvairīties no dienesta bremsēšanas iejaukšanās;
- 3. laika posms (atzīmēts ar EBI) – dienesta bremsēšanas sagatavošanas laiks.

Līdz ar to *ETCS* borta iekārta aprēķina sekojošus kontroles punktus:

- Indikācija (*I*);
- Atļauts ātrums (*P*);
- Brīdinājums (*W*);
- Dienesta bremsēšanas iejaukšanās (*SBI*) (tajās ceļa posma vietās, kur *ETCS* konstruēts tā, lai būtu iespēja palaist dienesta bremsēšanu).

Šajos punktos vilciena mašīnists saņem atbilstošu informāciju grafiskā, krāsu un skaņu veidā. Funkcionēšanas laikā *ETCS* sistēma izmanto šādus ieejas pamat datus:

- Fizikālie reālā laikā mērāmie dati par vilciena atrašanās vietu, ātrumu un paātrinājumu;
- *ETCS* fiksētās vērtības, kas attiecas uz bremsēšanas līknes ergonomiku (piemēram, vilciena mašīnista reakcijas laiks);
- *ETCS* lauka sistēmas dati, kas atrodas zem stingras kontroles un tiek nodoti ar atbilstošu *ETCS* sakaru līdzekli (balisa, noslēgtā ķēde, radio (*GSM-R*)):
 - mērķu ātrumi un punkti;

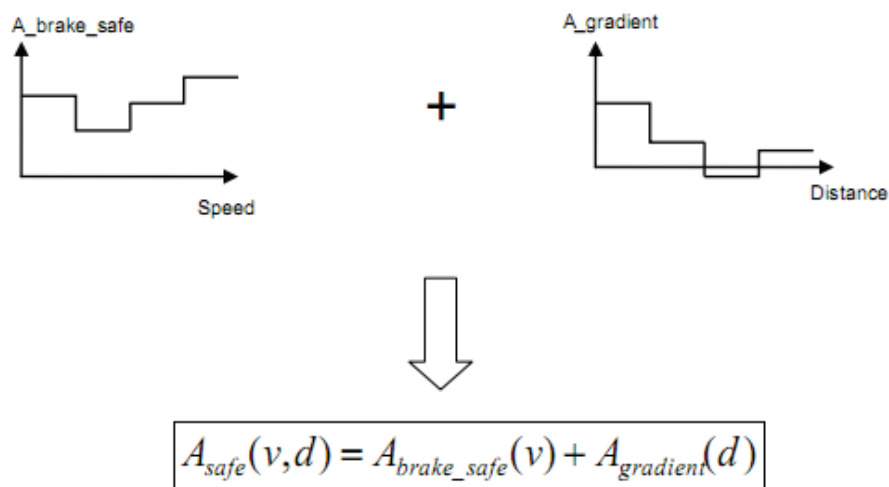
- infrastruktūras slīpums;
- lokālie parametri (*National Values*), kas ietekmē bremzēšanas līknes modeli.

Borta dati, kas attiecas uz bremzēšanas līknes aprēķinu, tiek ievadīti pirms braukšanas uzsākšanas, kas ir viens no iespējamajiem *ETCS* sistēmas trūkumiem, kas ir saistīts ar iespējamajām kļūdām cilvēciskā faktora dēļ vai vilciena bremžu sistēmas darbības parametru izmaiņām tā maršrutēšanas laikā.

Pēkšņas bremzēšanas līkne *EBD* ir paraboliska un sākas no mērķa punkta. Šeit vilciena palēninājumu aprēķina ņemot vērā:

- garantēto palēninājumu, ko nodrošina bremzēšanas sistēma (A_{brake_safe}) atkarībā no ātruma;
- palēninājumu/paātrinājumu, ko nosaka ceļa profila slīpums ($A_{gradient}$), ko nodod lauka sistēma, ka daļveida slīpuma funkciju no attāluma.

To kombinācija dod sava starpā savienotu parabolu kopu, kur katra atbilst ātruma un attāluma sadaļām.



1.2. att. Gradianta aprēķins

ETCS bremzēšanas līknes modelī robežu starp nominālo pēkšņas bremzēšanas izpildi ($A_{brake_emergency}$) un garantēto nosāka korekcijas faktori, kas atkarīgi no:

- Vilciena bremzēšanas sistēmas elementu darbības dispersijas (bremžu cilindri, kluči u. c.)
- Vilciena bremzēšanas sistēmas komponentu uzticamība;

- Vilciena bremsēšanas sistēmas arhitektūras (neatkarīgo komponentu daudzums);
- Rīteņu slīdēšanas aizsardzības sistēmas (*WSP – Wheel Slide protection*) darbības efektivitāte u. c.

Samērā vienkārši tiek aprēķinātas bremsēšanas līknes uz sausām sliedēm, izmantojot statistisko modeli, bet aprēķināt fiziskās ietekmes uz vilciena bremžu sistēmas darbību slapju sliežu gadījumā ar minēto modeli ir ārkārtīgi grūti. Lai izvairīties no šīs grūtības, izveidoti divi atšķirīgi korekcijas kritēriji:

- K_{dry_rst} – lai izteiktu pēkšņas bremsēšanas izpildi uz sausām sliedēm. Līdz ar to garantēto *EBD* līkni nosāka palēninājums $A_{brake_emergency} \cdot K_{dry_rst}$. Šo korekciju nav nepieciešams rēķināt reālā laikā un to var izdarīt ar modelēšanas palīdzību, piemēram, izmantojot ar *Monte-Karlo* metodi;
- K_{wet_rst} – lai izteiktu bremsēšanas izpildes zaudējumus no saķeres samazinājuma uz slapjām sliedēm. To nosāka lauka izmēģinājumi, kas novērtē *WSP* sistēmu pēc standarta *EN15595*.

ETCS sistēmas trūkums ir lielā cena, uz šo brīdi pastāvošās nepilnības iekārtu programnodrošinājumā, kā rezultāta vēl aizvien pastāvošās vilcienu sadursmes un avārijas.

Tāpat Eiropā un arī citās pasaules valstīs tiek izmantota firmas „Knorr Bremse” sistēma ar nosaukumu „*LEADER*” (*Locomotive Engineer Assist Display&Event Recorder*) [204]. Šīs sistēmas funkcijas atšķiras no iepriekšminēto sistēmu funkcijām, jo dotā sistēma paredzēta tieši garu un smagu vilcienu sastāvu vadīšanai. Šādu sastāvu vadīšanai mašīnistam jāievēro liels informācijas apjoms par vilciena kustību, ko var sniegt „*LEADER*” sistēma.

Sistēmas darbības pamatā ir vilciena sastāva kustības modelēšana esošajos funkcionēšanas apstākļos, ievērojot ceļa posma parametrus, vilciena sastāva parametrus, kā arī vilciena ekspluatācijas ierobežojumus konkrētajā ceļa posmā. Vilciena koordinātes noteikšanai tiek izmantota globālās pozicionēšanas sistēma *GPS*.

Sistēma reālajā laikā aprēķina un kontrolē vilciena sastāva gareniskās slodzes, kā arī nosaka to vērtības un iespējamās izmaiņas tuvākajā laikā nākamajā ceļa posmā. Ja kādi no parametriem pārsniedz savas robežvērtības, sistēma nosaka to, kādas rīcības mašīnistam ir jāveic, lai tas labotu nelabvēlīgo situāciju.

Sistēma ir aprīkota ar papildus displeju, kurā tiek attēlota informācija par rīcībām, kas jāveic mašīnistam noteiktās sarežģītās situācijās. Sistēma kalpo kā palīgīdzeklis vilciena sastāva vadībā un strādā pilnīgi neatkarīgi no pašas vilciena bremžu un vilces vadības sistēmām.

Šī sistēma paredz visu apstrādājamo datu saglabāšanu ar iespēju veikt to statistisko analīzi, kas savukārt ļauj praktiski reālajā laikā iegūt informāciju par vilciena bremžu sistēmas stāvokli (iespējamajiem tās bojājumiem), līdz ar ko ievērojami samazinot šādu vilcienu sastāvu apkopes un remonta laiku.

Sistēmas uzkrātā informācija kalpo arī vilcienu mašīnistu apmācībai uz augstas klases trenāžieriem.

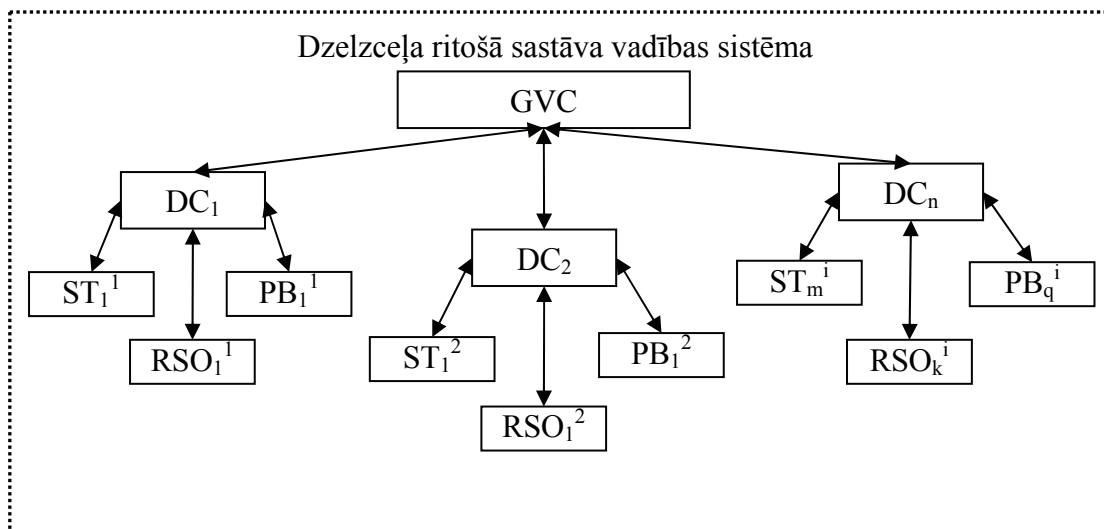
Izmantojot šādu sistēmu, ir iespējams veikt enerģijas ekonomiju līdz pat 15 %, kā arī ievērojami samazināt bremžu sistēmas un vagonu mehānisko mezglu nodilumus, kas atpelnā sistēmā veiktos ieguldījumus diezgan īsā tās ekspluatācijas laikā [203].

Neskatoties uz to, sistēmai ir arī savi trūkumi, kas izpaužas tajā, ka sistēma kalpo tikai kā mašīnista „palīgs” un neparedz vilciena bremžu sistēmas kaut kāda veida automātisku vadību. Pie „LEADER” sistēmas trūkumiem ir pieskaitāms arī tas, ka pirms katras tās ekspluatācijas, tā prasa liela datu apjoma ievadi, un to iespējamās kļūdainības dēļ sistēmas funkcionalitāte var ievērojami kristies vai pat ļoti traucēt mašīnista darbam.

Visi uzskaitītie minēto sistēmu trūkumi apliecina to, ka pasaulē vēl nav izstrādāta dzelzceļa transporta vadības sistēma ar pilnīgi visām nepieciešamajām funkcijām, kuras pieprasa mūsdienu dzelzceļa transporta industrija.

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. *APBS* sistēmas apraksts tiek realizēts, pielietojot atsevišķu sistēmas mehānisko un elektrisko elementu definēšanu. Pirmais līmenis satur esošās dzelzceļa ritošā sastāva vadības sistēmas pamat elementus (1.3. att.).



1.3. att. Dzelzceļa ritošā sastāva vadības sistēmas blokhēma

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.

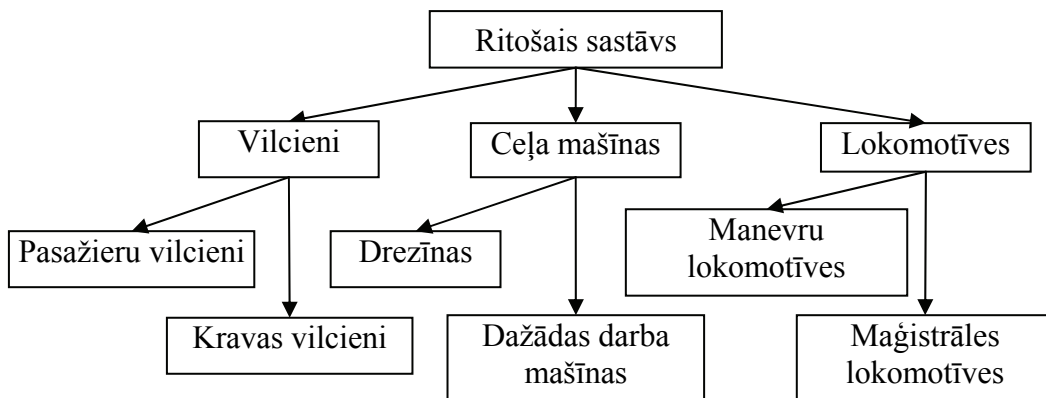
- $PB_i = \{Pb_1^i, Pb_2^i, \dots, Pb_{q_i}^i\}$ – pārbrauktuves,

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

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

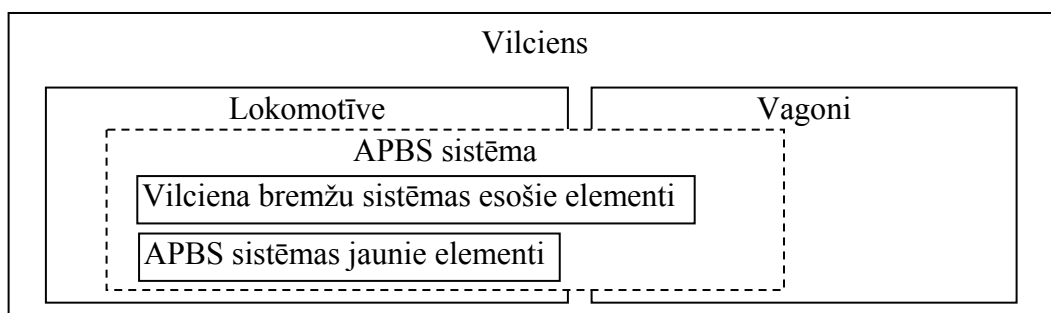
kur $i(t) = \overline{1, n}$ – dispečeru centra indekss, kurš mainās laikā t atkarībā no ritošā sastāva.

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 [111, 122, 181].



1.4. att. Ritošā sastāva elementu blokshēma

Dzelzceļa ritošā sastāva objektu kopa sastāv no vairākām grupām (1.4. att.). Katra no šo objektu grupām pilda savas funkcijas un ir raksturojama ar dažādiem parametriem. Pieņemot, ka izstrādājamā *APBS* sistēma ir salīdzinoši universāla, tās pielietošana teorētiski iespējama katrā no šiem objektiem, līdz ar ko tiek piedāvāta šo objektu parametru sīkāka definīcija.



1.5. att. APBS sistēmas vispārīgā integrēšanas shēma vilcienā

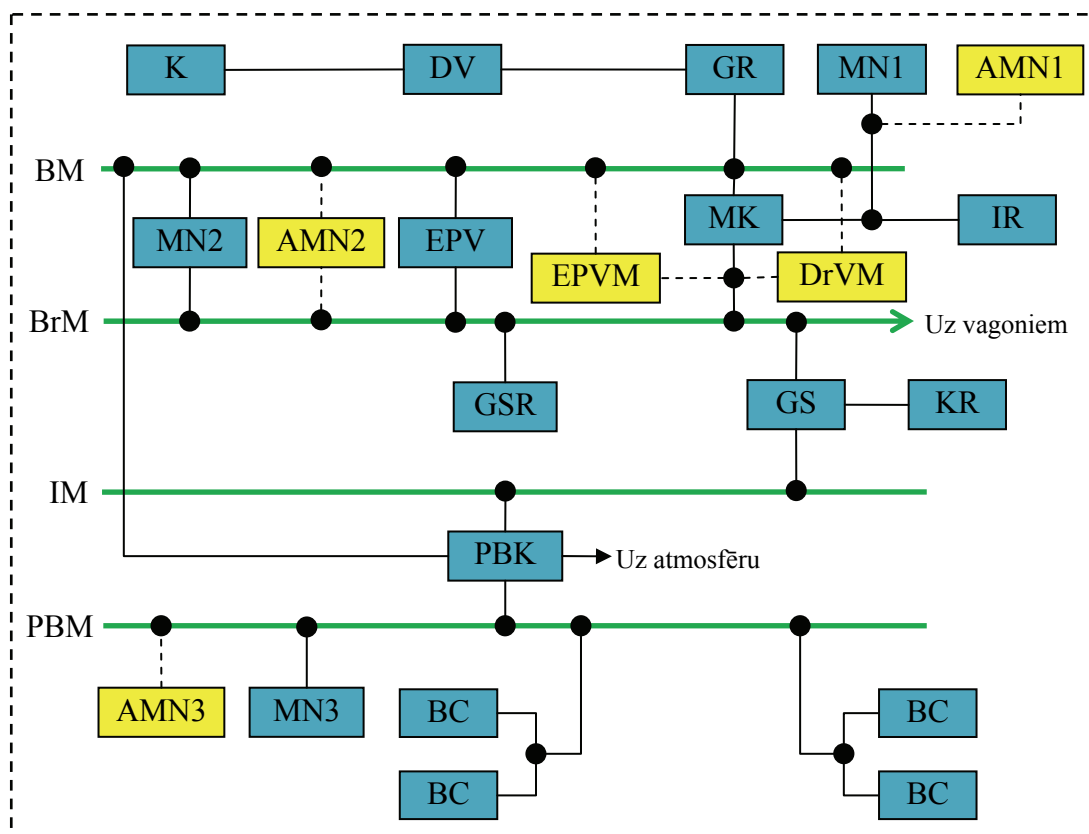
Darba turpinājuma, aprakstot *APBS* sistēmu, promocijas darba autors iedala šīs sistēmas elementus divās sekojošās pamat grupās:

- 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).

Vilciena bremžu vadības sistēmas esošie elementi iedalās sekojošās funkcionālo bloku grupās (norādīto elementu funkcijas un parametri plaši aprakstīti literatūrā [191, 189, 190, 187 u. c.]):

- Elektriskie bloki (1.7. att. atzīmēti ar zilu):
 - *ECUSS* – elektriskās centralizācijas un signalizācijas sistēmas elementi;
 - *MKT* – mašīnista kontrolleris (tā elektriskā daļa);
 - *VG* – vilces ģenerators;
 - *VDVS* – vilces dzinēju vadības spēka daļas elementi;
 - *VE* – vilces elektrodzinēji;
 - *EME* – elektrisko mēriekārtu elementi;
 - *LABB* – lokomotīves akumulatoru bateriju bloks;
 - *PEA* – pašpatēriņa elektroenerģijas avoti u. c.

- Mehāniskie un pneimatiskie bloki (1.6. att. atzīmēti ar zilu):
 - *K* – saspiebtā gaisa kompresors;
 - *DV* – drošības vārsts;
 - *DR* – galvenie rezervuāri;
 - *MKT* – mašīnista kontrolleris (mehāniskā daļa);
 - *MK* – mašīnista krāns;
 - *IR* – izlīdzināšanas rezervuārs;
 - *EPV* – elektropneimatiskais vārsts;
 - *BM* – barošanas maģistrāle;
 - *BrM* – bremžu sistēmas gaisa maģistrāle;
 - *PBM* – palīgbremžu maģistrāle;
 - *IM* – impulsu maģistrāle;
 - *GSR* – gaisa spiediena relejs;
 - *GS* – gaisdalis;
 - *BC* – bremžu cilindri u. c.



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

Savukārt APBS sistēmas jaunie elementi iedalās sekojošās galvenajās funkcionālo moduļu grupās:

1. Elektriskie bloki (1.7. att. attēloti ar dzeltenu):

- ADIIM – analogo un digitālo ieeju/izeju modulis, kura funkcijas ir

$$DAN_{out} = ADIIM(SAN_{in}), \quad (1.1)$$

kur SAN_{in} – ienākošais analogais signāls, DAN_{out} – izejošie analogā signāla dati no ADIIM.

$$DDIG_{out} = ADIIM(SDIG_{in}), \quad (1.2)$$

kur $SDIG_{in}$ – ienākošais digitālais signāls, $DDIG_{out}$ – izejošie digitālā signāla dati no ADIIM.

$$SAN_{out} = ADIIM(DAN_{in}), \quad (1.3)$$

kur SAN_{out} – izejošais analogais signāls, DAN_{in} – ieejošie analogā signāla dati $ADIIM$.

$$SDIG_{out} = ADIIM(DDIG_{in}), \quad (1.4)$$

kur $SDIG_{out}$ – izejošais digitālais signāls, $DDIG_{in}$ – ieejošie digitālā signāla dati no $ADIIM$.

- BB – barošanas bloka modulis, kura funkcija ir

$$U_{APBS} = BB(U_{LABB}), \quad (1.5)$$

kur U_{APBS} – APBS sistēmas elektrisko elementu barošanas spriegums (V), U_{LABB} – lokomotīves akumulatoru baterijas bloka LABB spriegums (V).

- BSM – bezvadu sakaru modulis, kura funkcijas ir

$$DR_{in} = BSM(F_r, SR_{in}), \quad (1.6)$$

kur F_r – radio frekvence (Hz), SR_{in} – ienākošais radiosignāls, DR_{in} – ienākošie dati.

$$SR_{out} = BSM(F_r, DR_{out}), \quad (1.7)$$

kur DR_{out} – nosūtāmie dati, SR_{out} – izejošais radiosignāls.

- GPM – globālās pozicionēšanas modulis, kura funkcija ir

$$DP_{in} = GPM(F_p, P_n), \quad (1.8)$$

kur F_p – pozicionēšanas signāla frekvence (Hz), P_n – pavadonu skaits (n) un $DP_{in} = \{X_{vilciena}, Y_{vilciena}, V_{vilciena} \dots\}$ – lokomotīves pozicionēšanas dati, kur $X_{vilciena}$ – ģeogrāfiskais platums ($^\circ$), $Y_{vilciena}$ – ģeogrāfiskais garums ($^\circ$), $V_{vilciena}$ – vilciena ātrums (km/h).

- IIM – informācijas izvades modulis, kura funkcija ir

$$VI = IIM(SI_{out}), \quad (1.9)$$

kur SI_{out} – izvadāmās informācijas signāls no GKM, VI – vizuālā informācija mašīnistam par $APBS$ darbību.

- DGM – datu glabāšanas modulis, kura funkcijas ir

$$DGKM_{in} = DGM(SGKM_{in}), \quad (1.10)$$

kur $SGKM_{in}$ – signāls no GKM ar saglabājamajiem datiem un $DGKM_{in}$ – saglabātie dati DGM atmiņā.

$$DGKM_{in} = DGM(SGKM_{out}), \quad (1.11)$$

kur $SGKM_{out}$ – signāls no GKM ar pieprasītiem datiem un $DGKM_{out}$ – no DGM atmiņas sūtāmie dati uz GKM.

$$DINIT = DGM(VIN, EMK), \quad (1.12)$$

kur $DINIT$ – vilciena kustības sākuma datu kopa, VIN – dati par vilciena identifikācijas numuru, DMK – dati ar elektronisko maršruta karšu informāciju.

- $MKTVM$ – mašīnista kontrollera vadības modulis, kuram ir sekojošas funkcijas:
 - mašīnista kontrollera pozīcijas noteikšana

$$VRN = MKTVM(MKT_{poz}), \quad (1.13)$$

kur MKT_{poz} – mašīnista kontrollera pozīcija (n), VRN – vilces režīma numurs (n).

- mašīnista kontrollera pozīcijas vadība

$$MKT_{poz} = MKTVM(VRN). \quad (1.14)$$

- $MKKM$ – mašīnista krāna pozīcijas kontroles modulis, kura funkcija ir

$$BRN = MKKM(MKK_{poz}), \quad (1.15)$$

kur MKK_{poz} – mašīnista krāna pozīcija (n), BRN – bremzēšanas režīma numurs (n).

- $EPVM$ – elektropneimatisko vārstu modulis (elektriskā daļa), kura funkcija ir

$$EPV_{poz} = EPVM(SEPV_{poz}), \quad (1.16)$$

kur $SEPV_{poz}$ – signāls no GKM par EPV stāvokli (atvērts/aizvērts), EPV_{poz} – elektropneimatisko vārstu aizbīdņu pozīcija.

- AMN – analogie manometri (elektriskā daļa), kuru funkcija ir

$$AS_{gs} = AMN(ME_{poz}), \quad (1.17)$$

kur ME_{poz} – AMN membrānas pozīcija, AS_{gs} – analogais signāls, kas satur informāciju par gaisa spiediena izmaiņu atbilstošā bremžu maģistrāles posmā (V).

- GKM – galvenā kontrollera modulis, kura funkcijas ir

$$S_{obj} = GKM_1(DP_{in}, DR_{in}, DGKM_{out}), \quad (1.18)$$

kur S_{obj} – distance no vilciena lokomotīves līdz objektam pirms kura ir nepieciešams apstāties.

$$t_1 = GKM_2(t_{mom}, SAN_{out}, VRN, BRN, DP_{in}), \quad (1.19)$$

kur t_1 – pirmās bremzēšanas pakāpes izpildes uzsākšanas laika moments (tiek pieņemts par $t_1 = 0$ s), t_{mom} – momentānais laiks.

$$t_2 = GKM_3(t_{mom}, SAN_{out}, VRN, BRN, DP_{in}), \quad (1.20)$$

kur t_2 – pirmās bremzēšanas pakāpes laikā maksimālā bremžu spēka sasniegšanas laika moments.

$$t_3 = GKM_4(t_{mom}, SAN_{out}, VRN, BRN, DP_{in}), \quad (1.21)$$

kur t_3 – vilciena bremžu atlaišanas moments, pēc pirmās bremzēšanas pakāpes izpildes.

$$S_{br_1pak} = GKM_5(t_{mom}, S_{AN_in}, DP_{in}, AS_{gs}), \quad (1.22)$$

kur $S_{br_1pak} = \{s_t : t \in [t_1, t_2]\}$ – bremzēšanas ceļa diskreto mērījumu kopa, veicot pirmo bremzēšanas pakāpi.

$$\langle m_{vag}, n_{vag}, F_{br} \rangle = GKM_6(S_{br_1pak}, k_k, k_a, \sum k, \varphi_k, F_{br}, F_{berz}, m_{kop}, \omega_0, q_0, DP_{in}), \quad (1.23)$$

kur m_{vag} – vidējā vilciena vagona masa (t), n_{vag} – vilciena vagonu skaits (n), k_k – spiedspēks uz vienu bremžu kluci, k_a – spiedspēks uz vienu asi, $\sum k$ – summārais bremžu kļuču spiedspēks, φ_k – bremžu kļuču berzes koeficients, F_{br} – vilciena summārais bremzēšanas spēks, F_{berz} – vilciena summārais rites berzes spēks, m_{kop} – kopējā vilciena masa, ω_0 – vilciena kustības pamat pretestības koeficients, q_0 – vidējais spiediens uz vagona asi.

$$S_{br_2pak} = GKM_7(m_{vag}, n_{vag}, F_{br}, k_k, k_a, \sum k, \varphi_k, F_{br}, F_{berz}, m_{kop}, \omega_0, q_0, DP_{in}, DR_{in}, AS_{gs}), (1.24)$$

kur S_{br_2pak} – aprēķinātais vilciena bremzēšanas ceļš, izpildot otro bremzēšanas pakāpi (m).

$$t_5 = GKM_8(S_{br_2pak}, DP_{in}), (1.25)$$

kur t_5 – aprēķinātais laika moments, kurā jāsāk veikt otro bremzēšanas pakāpi.

$$SEPV_{poz} = GKM_9(t_5, t_{mom}) (1.26)$$

$$SI_{out} = GKM_{10}(m_{vag}, n_{avg}, F_{br}, t_1, t_5) (1.27)$$

$$SGKM_{in} = GKM_{11}(DAN_{out}, DIG_{out}, DR_{in}, AS_{gs}, DP_{in}, m_{vag}, n_{vag}, F_{br}, k_k, k_a, \sum k, \varphi_k, F_{br}, F_{berz}, m_{kop}, \omega_0, q_0) (1.28)$$

2. Mehāniskie un pneimatiskie bloki (1.6. att. attēloti ar dzeltenu):

- *BMP* – jauni bremžu maģistrāles posmi un to savienojumi (att. 1.6. att. atzīmēti ar raustītu līniju);
- *EPVM* – elektropneimatisko vārstu modulis (mehāniskā daļa), kura funkcija ir

$$BrM_{gs} = EPVM(EPV_{poz}), (1.29)$$

kur BrM_{gs} – gaisa spiediens bremžu maģistrāles posmā (atm).

- *AMN* – analogie manometri (mehāniskā daļa), kuru funkcija ir

$$ME_{poz} = AMN(BrM_{gs}), (1.30)$$

kur BrM_{gs} – gaisa spiediens uz AMN membrānu (atm).

- *DrVM* – drošības vārstu modulis, kura funkcija saspīestā gaisa pārspiediena novēršana saspīesta gaisa maģistrālēs

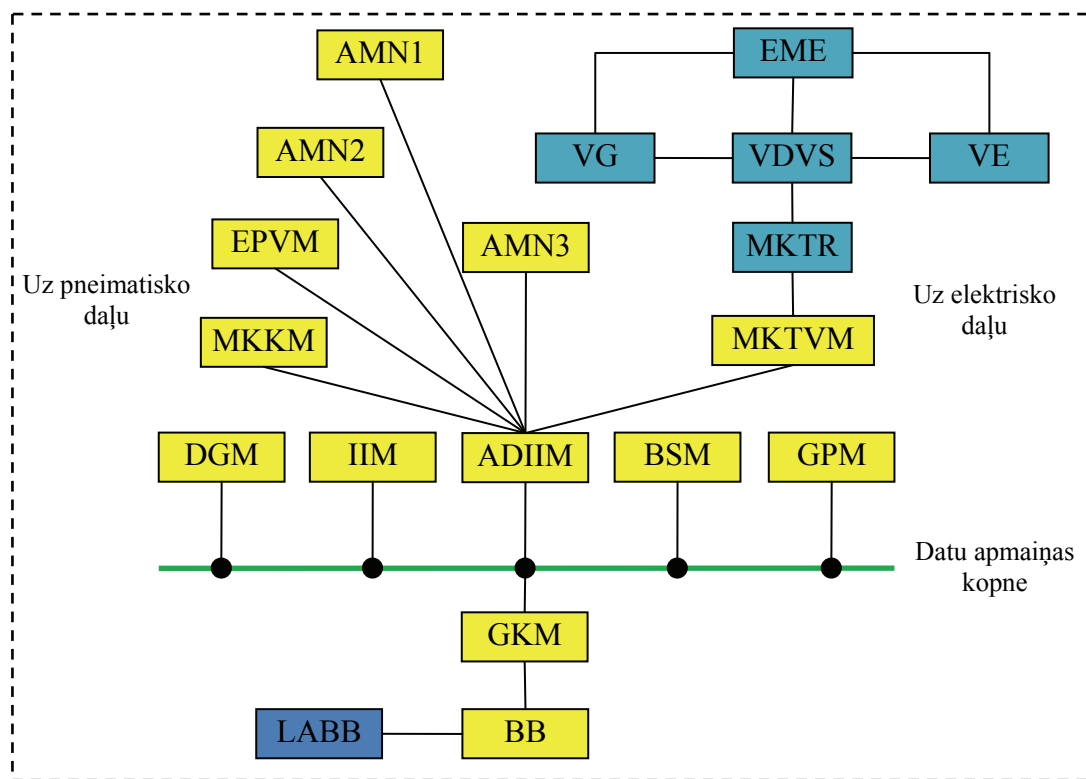
$$DrV_{stav} = DrVM(BrM_{gs}, BrM_{gs_max}, BM_{gs}, BM_{gs_max}, BC_{gs}, BC_{gs_max}), (1.31)$$

kur BrM_{gs_max} – maksimālais atļautais gaisa spiediens bremžu maģistrālē, BM_{gs_max} – maksimālais atļautais gaisa spiediens barošanas maģistrālē un BC_{gs_max} – maksimālais atļautais gaisa spiediens lokomotīves bremžu cilindros.

- AVM – avārijas ventiļu modulis, kuri tiek izmantoti avārijas situācijās, lai veiktu bremžu maģistrāles atbilstošo posmu pārslēgšanu vai šuntēšanu.

$$DR = AVM(AV_{st}), \quad (1.32)$$

kur DR – $APBS$ sistēmas darba režīms (ar adaptīvo bremžu sistēmas vadību vai bez tās), AV_{st} – avārijas ventiļu stāvoklis (atvērts vai aizvērts).



1.7. att. APBS sistēmas elektrisko elementu kopējā blokshēma

PLC izmantošana šāda veida sistēmās no vienas puses pieprasa vairāku dzelzceļa drošības standartu $EN 50126$, $EN 50128$, $EN 50129$ u. c. izpildi. No otras puses programmējamo ierīču pielietošana jau ilgu laiku pierāda savu darbību visdažādākās pielietojuma sfērās un paver daudz lielākas iespējas jebkuras sistēmas funkcionalitātes palielināšanai.

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 pielietošanu, kas dod iespēju realizēt piedāvājamās sistēmas efektīvāku pašapmācību tās funkcionēšanas laikā, analizējot mašīnista darbu ar bremžu sistēmu un vadības signālu ģenerēšanu ārējo izpildorgānu kontrolei.

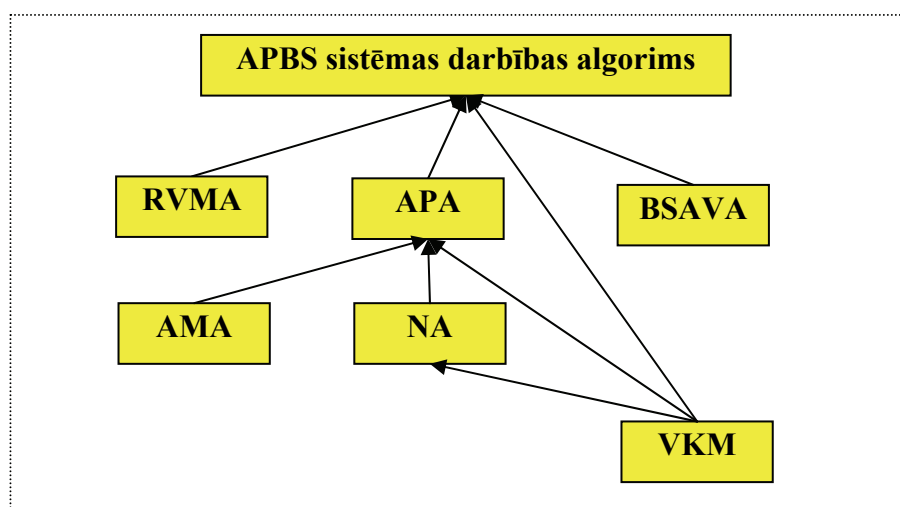
Dzelzceļa transporta adaptīvas, precīzas un laidenas bremzēšanas sistēmas kopējā darbības algoritma apraksts

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 procesa (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.



1.8. 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 (°);
 - $Y_{vilciena}(t)$ – vilciena atrašanās vietas ģeogrāfiskais garums (°);
 - *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_{vilc_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 (kuri 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 [182]);
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 bremsēšanas 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 bremsēšana.
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.

Izstrādātā mērķa funkcija un izvirzītā hipotēze

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

$$S_{obj} = GKM_1(DP_{in}, DR_{in}, DGKM_{out}) \xrightarrow{\Omega} \min. \quad (1.33)$$

Mērķa funkcijas ierobežojumu kopa ir

$$\Omega : \begin{cases} V_{beig} = V_{merk} \\ BM_{gs} \leq BM_{gs_max} \\ BM_{gs_izm_atr_min} < BM_{gs_izm_atr} < BM_{gs_izm_atr_max} \\ V_{vilc} \leq V_{vilc_max} \\ t_{adapt} \leq (t_4 - t_2) \end{cases} \quad (1.34)$$

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

$$Q = \begin{cases} M = |m_{vag} - m_{vag_f}| \longrightarrow \min \\ N = |n_{vag} - n_{vag_f}| \longrightarrow \min \\ K = |k_k - k_{k_f}| \longrightarrow \min \end{cases} \quad (1.35)$$

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

$$Q = \alpha_1 M' + \alpha_2 N' + \alpha_3 K' \longrightarrow \min, \quad (1.36)$$

kur α_1 – vilciena vagonu skaita noteikšanas kļūdas kritērija koeficients, α_2 – vilciena vidējās vagonu masas noteikšanas kļūdas kritērija koeficients, α_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

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1. \quad (1.37)$$

Adaptīvo meklēšanas algoritmu mērķa funkcijas aprēķina iterāciju un normālkļūdas 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 [207].

Izstrādātās mērķa funkcijas aprēķinam tiks izmantoti adaptīvie algoritmi, kuri sīkāk ir aprakstīti promocijas darba sadaļā 2.3.

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

- *APBS* sistēma spēj noteikt vilciena un tā bremžu sistēmas parametrus:

H01 hipotēze: $m_{\text{vag_teor}} = m_{\text{vag_fakt}}$, $n_{\text{vag_teor}} = n_{\text{vag_fakt}}$, $k_{k_teor} = k_{k_fakt}$;

H11 hipotēze: $m_{\text{vag_teor}} \neq m_{\text{vag_fakt}}$, $n_{\text{vag_teor}} \neq n_{\text{vag_fakt}}$, $k_{k_teor} \neq k_{k_fakt}$.

- *APBS* sistēma spēj automātiski to apturēt vilcienu maksimāli tuvu uzdotajam apstāšanās punktam:

H02 hipotēze: $X_{\text{apst_teor}} = X_{\text{apst_fakt}} \pm \text{kluda}$;

H12 hipotēze: $X_{\text{apst_teor}} \neq X_{\text{apst_fakt}} \pm \text{kluda}$.

- Izvēlētie adaptīviem meklēšanas algoritmi (skat 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 normālkļūda 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: $i_{sk}^{4.a\ lg\ oritms} \geq i_{sk}^{2.a\ lg\ oritms}$.

Secinājumi par pirmo nodaļu

- 1) Veiktais pastāvošo dzelzceļa transporta drošības un vadības sistēmu apskats ļauj secināt, ka visām minētajām sistēmām ir sava veida nepilnības, daļu no kurām ir iespējams izlabot ieviešot *APBS* sistēmu.
- 2) Izveidotā *APBS* sistēmas struktūrshēma un matemātiskais modelis, kā arī definētais sistēmas elementu funkciju saraksts, dod iespēju risināt dzelzceļa transporta drošības un automatizācijas līmeņa celšanas uzdevumus ar adaptīvo meklēšanas algoritmu palīdzību.
- 3) Izstrādātais *APBS* sistēmas kopējais darbības algoritms dod iespēju veikt turpmāku šīs sistēmas izstrādi, definējot katru no kopējā vadības algoritmā minētajiem apakšalgoritmiem atsevišķi.
- 4) Definētie mērķa funkcijas kritēriji dod iespēju skaitliski novērtēt piedāvājamās *APBS* sistēmas darbības efektivitāti un precizitāti.

2. IEBŪVĒJAMO INTELEKTUĀLO IEKĀRTU ADAPTĪVO VADĪBAS ALGORITMU IZSTRĀDE DZELZCEĻA PRETSADURSMJU SISTĒMĀM

Situācijas raksturojums

Otrajā promocijas darba nodaļā, pēc iepriekš veiktā *APBS* sistēmas pamatelementu un kopējā darbības algoritma apraksta, kā arī mērķa funkcijas izvirzīšanas, tiek veikta sistēmas elementu un atsevišķo darbības algoritmu izpētē un izstrāde. Līdz ar ko promocijas darba otrajā nodaļā ir aprakstīta piedāvājamā ritošā sastāva fizisko kustības parametru noteikšanas adaptīvā pašapmācības algoritma (*APA*) izstrāde, veikta adaptīvo meklēšanas algoritmu (*AMA*) izpēte un izstrāde, ar mērķi veikt to turpmāko salīdzinājumu un atbilstības izvērtēšanu *APBS* sistēmas *AMA* algoritmā lomai. Šajā nodaļā tiek veikta arī vilciena kustības matemātiskā modeļa (*VKM*) izstrāde un vilciena pneimatiskās bremžu sistēmas automātiskās vadības algoritma (*BSAVA*) izstrāde *APBS* sistēmai.

Ritošā sastāva fizisko kustības parametru noteikšanas adaptīvā pašapmācības algoritma izstrāde

Piedāvājamais *APBS* sistēmas adaptīvas pašapmācības algoritms *APA* paredz to, ka vilciena *V* automātiskā bremzēšana tiek realizēta pielietojot dienesta bremzēšanas pakāpes, ar pirmo pakāpi piebremzējot vilcienu *V* līdz noteiktam ātrumam (sistēmas pašapmācības posms), ar otro apstādinot vilcienu *V* pilnīgi. Šāda pieeja tiek piedāvāta, lai pēc iespējas vairāk samazinātu bremzēšanas pakāpju skaitu (kas manāmi uzlabo vilciena *V* gaitas laidenuma īpašības un tā bremžu sistēmas darbības apstākļus), kā arī tā rada iespēju ar pirmo pakāpi veikt vilciena *V* bremžu sistēmas darbības efektivitātes un *APBS* sistēmas darbībai nepieciešamo parametru noteikšanu.

APA var tikt realizēts divos veidos:

- 1) Pamat gadījums, kad vilciena mašīnists manuāli veic vilciena bremzēšanu, vadot vilcienu *V* pa maršrutu (šis process var notikt vairākkārtīgi, nosakot un precizējot vilciena *V* parametrus katrā tā bremzēšanā).

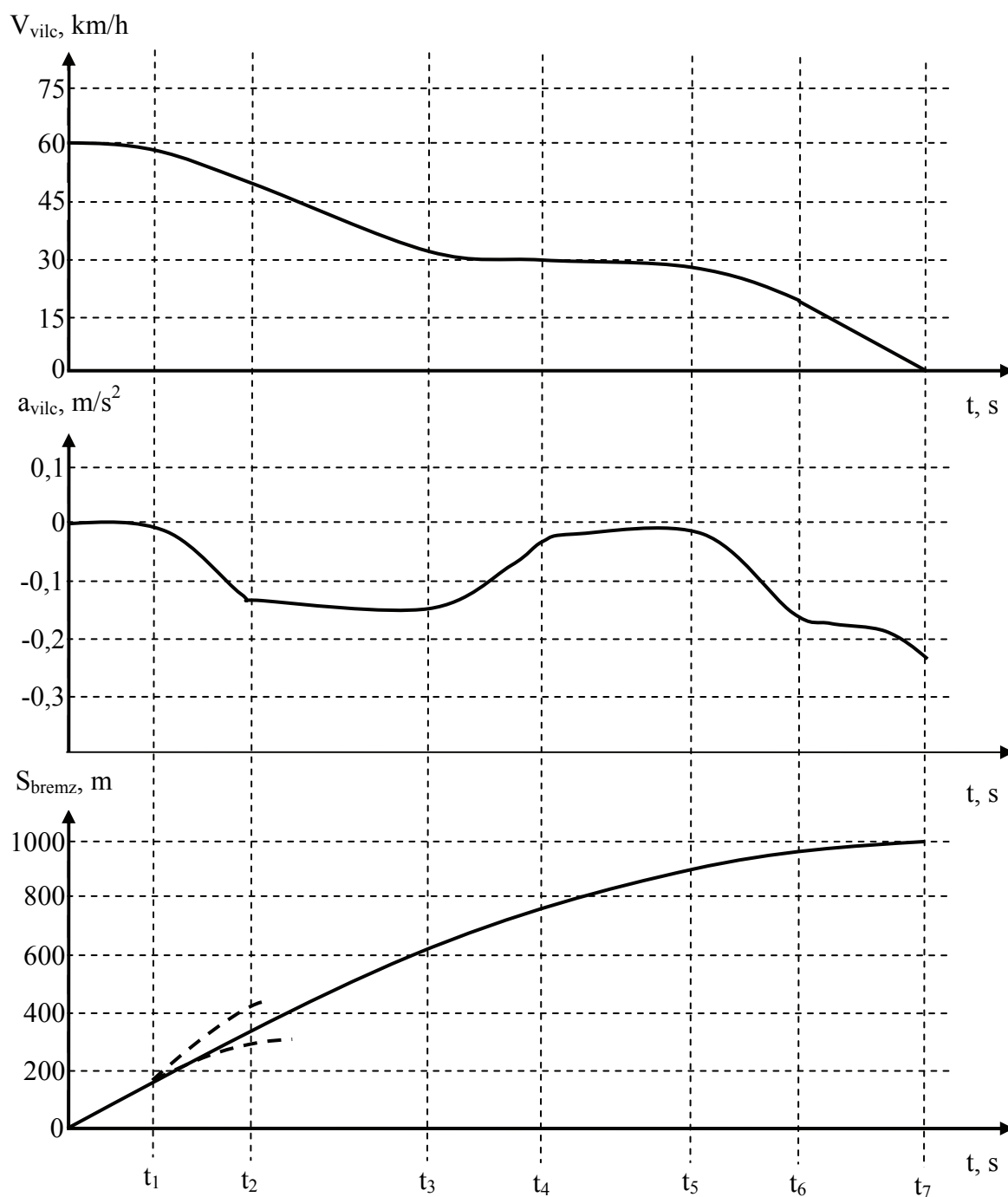
- 2) Rets gadījums, kad līdz šim (pēc kustības uzsākšanas) vilciena mašīnists ne reizi nav izpildījis vilciena V bremsēšanu, $APBS$ automātiski veic pirmo bremsēšanas pakāpi, tās laikā veic pašapmācību, nosakot vilciena V parametrus.

Turpinājumā seko šī algoritma pamat gadījuma sīkākā izklāsts pa soļiem, kur par pamat ilustrāciju kalpo 2.2. att.:

1. Solis – laika momentā t_1 , kad tiek aktivizēts APA , sistēmas GKM fiksē zemāk uzskaitītos parametrus un ar minimālo tehniski iespējamo konstanto diskretizācijas soli uzsāk šo parametru datu kopu ierakstīšanu DGM :

- $V_{vilciena}(t)$ – vilciena kustības ātrums (km/h);
- $a_{bremz_fakt}(t)$ – vilciena faktiskais bremsēšanas paātrinājums (m/s^2);
- $X_{vilciena}(t)$ – vilciena atrašanās vietas koordinātes platums ($^{\circ}$);
- $Y_{vilciena}(t)$ – vilciena atrašanās vietas koordinātes garums ($^{\circ}$);
- $S_{bremz_nosp}(t)$ – nobrauktais bremsēšanas ceļš, kamēr bremžu spiedspēks sasniedz maksimālo vērtību (m);
- $t_{bremz_nosp}(t)$ – laiks no bremsēšanas uzsākšanas kamēr bremžu spiedspēks sasniedz maksimālo vērtību (s);
- $S_{bremz_atl}(t)$ – nobrauktais bremsēšanas ceļš, kamēr bremzes tiek pilnīgi atlaistas (m);
- $t_{bremz_atl}(t)$ – laiks no bremžu atlaišanas uzsākšanas momentam, kad bremzes ir pilnībā atlaistas (s);
- VRN – vilces režīma numurs (n);
- BRN – bremsēšanas 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).

2. Solis – laika momentā t_2 , kad bremzēšanas paātrinājums a_{bremz} ir sasniedzis kādu praktiski konstantu vērtību (a_{bremz} tālāko izmaiņu nosaka tikai bremžu kļuču darba efektivitātes parametri pie mainīgiem vilciena V kustības ātrumiem $V_{vilciena}$) tiek konstatēts, ka bremžu sistēma ir sasniegusi savu maksimālo darbības efektivitāti. Tiek pabeigta iepriekšējā algoritma solī uzsāktā datu kopu fiksācija.
3. Solis – no laika momenta t_2 *APA* izsauc *AMA*. *GKM*, izmantojot *AMA* un *DGM* sniegtos datus par vilcienu, nosaka teorētiskās parametru n_{vag} , m_{vag} un k_k vērtības (process notiek līdz *APA* pabeigšana).
4. Solis – *GKM* izmantojot *VKM* veic bremzēšanas ceļa līknes modelēšanu ($S_{bremz_apr}(t)$), izmantojot iepriekšējā solī noteiktās parametru n_{vag} , m_{vag} un k_{br} vērtības.
5. Solis – sekojoši algoritmā aprēķinātie dati un datu kopas tiek saglabāti *DGM* – S_{bremz_nosp} , $t_{bremz_nosp}(t)$, $S_{bremz_atl}(t)$, $t_{bremz_atl}(t)$, $S_{bremz_apr}(t)$.
6. Solis – *APA* algoritms tiek pabeigts.



2.1

2.2. att. Vilciena kustības parametru izmaiņas līknes atkarībā no laika

Adaptīvo meklēšanas algoritmu izpēte un izstrāde

Šajā promocijas darba nodaļā, autors apraksta vairākus adaptīvus meklēšanas algoritmus, kurus iespējams pielietot *APBS* sistēmā *AMA* lomā. Meklēšanas algoritma funkcionēšanai nepieciešama sekojoša mērķa funkcija:

$$\Phi(X) = \sum_{t=t_1}^{t=t_2} (S_{t_1 t_2_{teor}} - S_{t_1 t_2_{fakt}})^2 \longrightarrow \min \quad (2.1)$$

kur t_1 – bremsēšanas uzsākšanas moments, t_2 – nominālā bremsēšanas spēka sasniegšanas moments, $S_{t_1 t_2_{teor}} = VKM(n_{vag}, m_{vag}, k_k)$ – nomodelētais teorētiskais bremsēšanas ceļš, $S_{t_1 t_2_{fakt}}$ – faktiskais bremsēšanas ceļš, $X = \{x_1 = n_{vag}; x_2 = m_{vag}; x_3 = k_k\}$ – mērķa funkcijas parametri.

Līdz ar ko tiek apskatīts sekojošs optimizācijas uzdevums: atrast optimalitātes kritērija $\Phi(X)$ minimumu

$$\min_{X \in R^3} \Phi(X) = \Phi(X^*) = \Phi^*, \quad (2.2)$$

kas noteikts 3-dimensiju telpā ar ierobežojumiem:

$$R^3 : \begin{cases} n_{vag_min} \leq x_1 \leq n_{vag_max}, \\ m_{vag_min} \leq x_2 \leq m_{vag_max}, \\ k_{k_min} \leq x_3 \leq k_{k_max} \end{cases} \quad (2.3)$$

Gausa-Zeideļa metode

Risinot uzdevumu (2.2) ar Gausa-Zeideļa metodes palīdzību tiek izmantotas sekojošas iterācijas formulas:

$$\begin{aligned} X_1^{r+1} &= X^r + \lambda_1^r L_1, \\ X_2^{r+1} &= X_1^{r+1} + \lambda_2^r L_2, \\ X_3^{r+1} &= X_2^{r+1} + \lambda_3^r L_3 = X^{r+1} \end{aligned} \quad (2.4)$$

kur vektors L_i nosaka virzienu gar i -to koordināšu asi un veido 3-dimensiju vektoru ar komponentēm

$$l_{ij} = \begin{cases} 1, ja \ j = i, \\ 0, ja \ j \neq i, j = 1, \dots, 3 \end{cases} \quad (2.5)$$

bet lielumi $\lambda_1^r, \lambda_2^r, \lambda_3^r$ tiek noteikti izmantojot nosacījumus

$$\begin{aligned}
\min_{\lambda \in (-\infty, \infty)} \Phi(X^r + \lambda L_1) &= \Phi(X^r + \lambda_1^r L_1) = \Phi(X_1^{r+1}), \\
\min_{\lambda \in (-\infty, \infty)} \Phi(X_1^{r+1} + \lambda L_2) &= \Phi(X_1^{r+1} + \lambda_2^r L_2) = \Phi(X_2^{r+1}), \\
\min_{\lambda \in (-\infty, \infty)} \Phi(X_2^{r+1} + \lambda L_n) &= \Phi(X_2^{r+1} + \lambda_3^r L_3) = \Phi(X_3^{r+1})
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Citiem vārdiem sakot, lielumi $\lambda_1^r, \lambda_2^r, \lambda_3^r$ veido soļa garumu, kas minimizē funkciju $\Phi(X)$ L_i virzienā katrā iterācijā, kuras kārtas skaitli nosaka r .

Ja pieņemts, ka $X_0^{r+1} = X^r, X_n^{r+1} = X^{r+1}$, tad formulas (2.4) un (2.6) var tikt pierakstītas sekojoši:

$$X^{r+1} = X_{i-1}^{r+1} + \lambda_i^r L_i, i = 1, \dots, 3, \tag{2.7}$$

$$\min_{\lambda \in (-\infty, \infty)} \Phi(X_{i-1}^{r+1} + \lambda L_i) = \Phi(X_{i-1}^{r+1} + \lambda_i^r L_i) = \Phi(X_i^{r+1}), i = 1, \dots, 3. \tag{2.8}$$

Meklēšanas process tiek pabeigts, ja izpildās viens no standartiem iterāciju pabeigšanas nosacījumiem:

$$\|X^{r+1} - X^r\| = \lambda^r \leq \varepsilon_X, \tag{2.9}$$

kur ε_X – konstante, kas nosaka nepieciešamo meklēšanas precizitāti pēc X ;

$$|\Phi(X^{r+1}) - \Phi(X^r)| \leq \varepsilon_\Phi, \tag{2.10}$$

kur ε_Φ – konstante, kas nosaka nepieciešamo meklēšanas precizitāti pēc Φ .

Jāpiezīmē, ka uzdevumi (2.8) viena ekstrēma funkcijas $\Phi(X)$ gadījumā var tikt risināti kā vairāku ekstrēmu optimizācijas uzdevumi un var tikt atrisināti ar viendimensijas optimizācijas metodēm.

Gausa-Zeidaļa metodes darbības algoritms.

1. Solis – tiek uzdotas vilciena meklējamo parametru sākuma vērtības X^0 un pieņemts, ka $r = 0, i = 1$.
2. Solis – secīgi priekš $i = 1, 2, 3$ tiek risināti uzdevumi (2.8), t.i. izmantojot iepriekšējo punktu, atrodam funkcijas $\Phi(X)$ minimumu gar i -to koordināšu virzienu.

3. Solis – ja parametru meklēšanas beigšanas nosacījums (2.9) vai (2.10) izpildās, tad tiek pieņemts, ka $X^* \approx X^{r+1}$ un meklēšana tiek pabeigta. Pretējā gadījumā – pieņemam $r = r + 1$ un algoritms pāriet solī nr. 2.

Metode ar atgriešanos neveiksmīga soļa gadījumā.

Risinot uzdevumu (2.2) ar apskatāmo metodi, tiek izmantota iterāciju formula:

$$X^{r+1} = X^r + \lambda^r \frac{\Psi^r}{\|\Psi^r\|}, \quad (2.11)$$

kur λ^r – soļa vērtība r -tajā iterācijā, $\Psi^r = (\psi_1^r, \psi_2^r, \psi_3^r)$ – 3 vilciena parametriem atbilstošo gadījuma vektoru realizācija, $\|\cdot\|$ – kāda vektoru norma. Vektora Ψ^r koordināšu lomā tiek izmantotas neatkarīgas gadījuma vērtības, kas viendabīgi sadalītas intervālā $[-1, 1]$.

Metodes ar atgriešanos neveiksmīga soļa gadījumā darbības algoritms.

1. Solis – tiek uzdotas vilciena meklējamo parametru sākuma vērtības X^0 , meklēšanas soļa λ^0 sākotnējais garums un iterāciju skaita skaitītājam piešķirta vērtība $r = 0$.
2. Solis – tiek uzdota neveiksmīgo mēģinājumu skaita skaitītāja sākotnējā vērtība $k = 1$.
3. Solis – tiek iegūta gadījuma skaitļu realizācija $\psi_1^r, \psi_2^r, \psi_3^r$ – vektora Ψ^r komponente un pēc formulas (2.11) tiek atrasts mēģinājuma punkts X^{r+1} .
4. Solis – tiek aprēķināta funkcijas $\Phi(X^{r+1})$ vērtība $\Phi(X)$ punktā X^{r+1} .
5. Solis – ja $\Phi(X^{r+1}) < \Phi(X^r)$, tad tiek pieņemts, ka $r = r + 1$ un algoritms pāriet solī nr. 3. Pretējā gadījumā algoritms pāriet solī nr. 6.
6. Solis – tiek pieņemts, ka $k = k + 1$. Ja $k < K$, tad algoritms pāriet solī nr. 3. Pretējā gadījumā algoritms pāriet solī nr. 7. Šeit K – neveiksmīgo mēģinājumu maksimālā robežvērtība (metodes brīvas izvēles parametrs). Tiek rekomendēts $K = 3 \cdot n$, kur $n = 3$.
7. Solis – tiek veikta meklēšanas apturēšanas nosacījuma pārbaude. Ja meklēšanas apturēšanas nosacījums tiek izpildīts, tiek pieņemts, ka vilciena parametri $X^* \approx X^{r+1}$ un iterācijas tiek pabeigtas. Pretējā gadījumā tiek pieņemts, ka

$r = r + 1$, $\lambda^r = \alpha \cdot \lambda^r$ un algoritms pāriet solī nr. 2. Šeit $\alpha \in (0, 1)$ – soļa samazināšanas koeficients (metodes brīvas izvēles parametrs).

Meklēšanas beigšanas nosacījuma lomu var spēlēt viens no standartiem iterāciju beigšanas nosacījumiem:

$$\|X^{r+1} - X^r\| = \lambda^r \leq \varepsilon_X \quad (2.12)$$

kur ε_X – konstante, kas nosaka nepieciešamo meklēšanas precizitāti pēc X .

$$|\Phi(X^{r+1}) - \Phi(X^r)| \leq \varepsilon_\Phi \quad (2.13)$$

kur ε_Φ – konstante, kas nosaka nepieciešamo meklēšanas precizitāti pēc Φ .

Labākā mēģinājuma metode.

Metodes ar atgriešanos neveiksmīga soļa gadījumā modifikācija ir *labākā mēģinājuma metode*.

Labākā mēģinājuma metodes darbības algoritms.

1. Solis – tiek uzdotas vilciena meklējamo parametru sākuma vērtības X^0 , meklēšanas soļa λ^0 sākotnējais garums un iterāciju skaita skaitītājam tiek piešķirta vērtība $r = 0$.
2. Solis – tiek ģenerēti M gadījuma vektori $\Psi_i^r, i \in [1, M]$ un pēc formulas (2.11) tiek atrasti mēģinājuma punkti $X_i^{r+1}, i \in [1, M]$.
3. Solis – tiek aprēķināta funkcijas $\Phi(X_i^{r+1})$ vērtība $\Phi(X)$ mēģinājuma punktos $(X_i^{r+1}), i \in [1, M]$ un tiek atrasta to minimālā vērtība $\Phi(X^{r+1}) = \Phi(X_k^{r+1}) = \min_{i \in [1, M]} \Phi(X_i^{r+1})$.
4. Solis – ja $\Phi(X^{r+1}) < \Phi(X^r)$, tiek pieņemts, ka $r = r + 1$ un algoritms pāriet solī nr. 2. Pretējā gadījumā algoritms pāriet solī nr. 5.
5. Solis – tiek pārbaudīta meklēšanas beigšanas nosacījuma izpilde (skat. (2.12) un (2.13)). Ja meklēšanas beigšanas nosacījums izpildās, tad tiek pieņemts, ka vilciena meklējamo parametri $X^* \approx X^{r+1}$ un tiek beigtas iterācijas. Pretējā gadījumā tiek pieņemts, ka $r = r + 1$, $\lambda^r = \alpha \cdot \lambda^r$ un algoritms pāriet solī nr. 2. Šeit $\alpha \in (0, 1)$ – soļa samazināšanas koeficients (metodes brīvas izvēles parametrs).

Kombinētā labākā mēģinājuma metode ar pārlasīšanu beigu posmā

1. Solis – tiek uzdotas vilciena meklējamo parametru sākuma vērtības X^0 , meklēšanas soļa λ^0 sākotnējais garums un iterāciju skaita skaitītājam tiek piešķirta vērtība $r = 0$.
2. Solis – tiek ģenerēti $M' = M^0 / \lambda'$ gadījuma vektori $\Psi_i^r, i \in [1, M']$ un pēc formulas (2.11) tiek atrasti mēģinājuma punkti $X_i^{r+1}, i \in [1, M']$.
3. Solis – tiek aprēķināta funkcijas $\Phi(X_i^{r+1})$ vērtība $\Phi(X)$ mēģinājuma punktos $(X_i^{r+1}), i \in [1, M']$ un tiek atrasta to minimālā vērtība $\Phi(X^{r+1}) = \Phi(X_k^{r+1}) = \min_{i \in [1, M']} \Phi(X_i^{r+1})$.
4. Solis – ja $\Phi(X^{r+1}) < \Phi(X^r)$, tiek pieņemts, ka $r = r + 1$ un algoritms pāriet solī nr. 2. Pretējā gadījumā algoritms pāriet solī nr. 5.
5. Solis – tiek pārbaudīta meklēšanas beigšanas nosacījuma izpilde (skat. (2.12) un (2.13)). Ja meklēšanas beigšanas nosacījums izpildās, tad tiek pieņemts, ka vilciena meklējamie parametri $X^* \approx X^{r+1}$ un tiek beigtas iterācijas. Pretējā gadījumā tiek pieņemts, ka $r = r + 1$, $\lambda^r = \alpha \cdot \lambda^r$ un algoritms pāriet solī nr. 6. Šeit $\alpha \in (0, 1)$ – soļa samazināšanas koeficients (metodes brīvas izvēles parametrs).
6. Solis. Ja $M' > (2\lambda)^3$, tad ģenerē visas kombinācijas X^{r+1} un meklē no tām $\Phi(X^{r+1}) = \Phi(X_k^{r+1}) = \min_{i \in [1, M']} \Phi(X_i^{r+1})$.

Atkārtotošās gadījuma meklēšanas metode

Risinot uzdevumu (2.2) ar apskatāmo metodi, tiek izmantota sekojoša iterāciju formula:

$$X^{r+1} = X^r + \lambda^r \Delta^r \quad (2.14)$$

kur λ^r – ir soļa lielums (skalārs lielums) r -tajā iterācijā, Δ^r – 3-dimensiju vektors, kurš nosaka soļa virzienu r -tajā iterācijā:

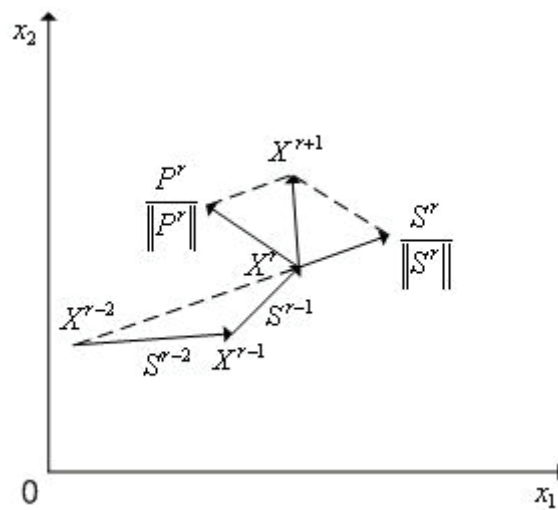
$$\Delta^r = \left[\beta \frac{S^r}{\|S^r\|} + (1 - \beta) \frac{P^r}{\|P^r\|} \right] \quad (2.15)$$

Šeit $S^r = \gamma S^{r-1} + (1 - \gamma) S^{r-2}$ – „priekšvēstures” vektors, kurš nosaka vidējo meklēšanas virzienu iepriekšējos divos soļos; $\|*\|$ – kāda vektora norma; P^r – n-dimensiju

pseudogadījuma skaitļu vektors, kas viendabīgi sadalīti intervālā $[0, 1]$; skalārs lielums $\beta \in [0, 1]$ – koeficients, kas nosaka vektora Δ^r determinētas un pseudogadījuma daļu svarus, (metodes brīvas izvēles parametrs); skalārs lielums $\gamma \in [0, 1]$ – koeficients, kas nosaka atbilstošus vektoru S^{r-1}, S^{r-2} svaru koeficientus vektorā S^r (metodes brīvas izvēles parametrs).

Jāatzīmē to, ka attiecība $\frac{S^r}{\|S^r\|}$ veido vienības virziena vektoru S^r , bet attiecība

$\frac{P^r}{\|P^r\|}$ – vienības virziena vektoru P^r .



2.3. att. Atkārtotošās gadījuma meklēšanas metodes iterāciju shēma

Pieņemts, ka $\gamma = 0.5$, $\beta = 0.5$, $\lambda^r = 2$, tā ka $S^r = 0.5(S^{r-1} + S^{r-2})$ un

$$X^{r+1} = X^r + \left[\frac{S^r}{\|S^r\|} + \frac{P^r}{\|P^r\|} \right].$$

Vienkāršots atkārtotošās gadījuma meklēšanas metodes darbības algoritms.

1. Solis – tiek uzdotas vilciena meklējamo parametru sākuma vērtības X^0 , sākotnējais solis λ^2 , koeficientu β , γ vērtības un iterāciju skaita skaitītājam piešķirta vērtība $r = 2$.
2. Solis – izmantojot, piemēram, viensoļa labākā mēģinājuma metodi tiek noteiktas vilciena meklējamo parametru vērtības X^1, X^2 – atkārtotošās gadījuma meklēšanas metodes „ieskrējiena” posms.

3. Solis – tiek ģenerēts 3-dimensiju gadījuma vektors P^r un pēc formulām (2.14) un (2.15) aprēķinātas vilciena meklējamo parametru vērtības X^{r+1} koordinātes un funkcijas $\Phi(X)$ vērtība $\Phi(X^{r+1})$ šajā punktā.
4. Solis – ja $\Phi(X^{r+1}) < \Phi(X^r)$, tad tiek pārbaudīts iterāciju pabeigšanas nosacījums (skat. zemāk). Ja nosacījums tiek izpildīts, tiek pieņemtas vilciena meklējamo parametru vērtības $X^* \approx X^{r+1}$ un iterācijas tiek pabeigtas. Ja iterāciju pabeigšanas nosacījums netiek izpildīts, tad pēc kāda no likumiem, piemēram, pieņemot, ka $\lambda^{r+1} = 2\lambda^r$, tiek palielināta soļa vērtība. Tiek pieņemts $r = r + 1$ un algoritms pāriet solī nr. 3. Ja $\Phi(X^{r+1}) \geq \Phi(X^r)$, tad algoritms pāriet solī nr. 5.
5. Solis – kādu fiksētu reižu skaitu tiek veikts mēģinājums, izmantojot vienas un tās pašas vilciena meklējamo parametru vērtības X^r , nemainot soļa garumu λ^r iegūt funkcijas $\Phi(X)$ vērtības samazinājumu, mainot tikai vektoru P^r , t.i. nemainot X^r un λ^r , algoritms pāriet solī nr. 3. Ja fiksētais mēģinājumu skaits nenoved pie veiksmīga rezultāta, tad, izmantojot tās pašas vilciena meklējamo parametru vērtības X^r , pēc noteikta likuma (piemēram, pieņemot, ka $\lambda^r = \frac{\lambda^r}{2}$) tiek samazināts soļa λ^r garums, un algoritms pāriet uz soli nr. 3.

Meklēšanas beigšanas nosacījuma lomu var spēlēt viens no standartiem iterāciju beigšanas nosacījumiem:

$$\|X^{r+1} - X^r\| = \lambda^r \leq \varepsilon_X \quad (2.16)$$

kur ε_X – konstante, kas nosaka nepieciešamo meklēšanas precizitāti pēc X .

$$|\Phi(X^{r+1}) - \Phi(X^r)| \leq \varepsilon_\Phi \quad (2.17)$$

kur ε_Φ – konstante, kas nosaka nepieciešamo meklēšanas precizitāti pēc Φ .

Ir zināmas vairākas apskatītās metodes modifikācijas. Piemēram, meklēšanas procesā, pēc noteikta likuma, var tika mainīti ne tikai soļa λ^r garums, bet arī koeficienti β , γ .

Gadījuma meklēšanas metode ar noteiktu meklēšanas rādiusu un gadījuma virzienu

Gadījuma meklēšanas metodē ar noteiktu meklēšanas rādiusu un gadījuma virzienu tiek izmantota gadījuma vilciena parametru ģenerēšanas procedūra, kur ģenerētās vērtības ir viendabīgi sadalītas pa hipersfēras virsmu telpā R^3 . Tiek pieņemts, ka $X^C = (x_1^C, x_2^C, \dots, x_n^C)$ – hipersfēras centra koordināšu vektors, ρ – hipersfēras rādiuss, R – vektors ar sākumu punktā X^C un beigām meklējamā hipersfēras virsmas punktā, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – leņķi starp vektoru R un koordināšu asu $0x_1, 0x_2, 0x_3$ ortām.

Ieviestajos apzīmējumos vilciena parametru vērtības, kas viendabīgi sadalītas pa hipersfēras virsmu, ģenerēšanas algoritma shēma, var izskatīties sekojoši:

- tiek ģenerēti n gadījuma skaitļi, kas tiek vienmērīgi sadalīti intervālā $(0, 2\pi)$;
- tiek aprēķināti vektora R virzošie kosinusi $\cos \alpha_1, \cos \alpha_2, \cos \alpha_3$;
- tiek atrastas, meklējamo parametru $x_1 = x_1^C + \rho \cos \alpha_1$;
 $x_2 = x_2^C + \rho \cos \alpha_2$; $x_3 = x_3^C + \rho \cos \alpha_3$ koordinātes.

Vienkāršots gadījuma meklēšanas metodes ar noteiktu meklēšanas rādiusu un gadījuma virzienu darbības algoritms.

1. Solis – tiek uzdotas vilciena parametru sākuma vērtības X^o , sākotnējais hipersfēras rādiuss ρ^0 un iterāciju skaita skaitītājam piešķirta vērtība $r = 0$.
2. Solis – tiek ģenerētas vilciena parametru sākuma vērtības $X_i^r, i \in [1, N]$, kas ir viendabīgi sadalītas pa hipersfēras virsmu ar rādiusu ρ^r ar centru punktā X^r . Šeit N – ģenerējamo punktu skaits.
3. Solis – tiek aprēķināta minimizējamās funkcijas $\Phi(X_i^r)$ vērtība ar iegūtajām vilciena parametru vērtībām un atrasts punkts, kurā tiek iegūta minimālā funkcijas $\Phi(X)$ vērtība:

$$\Phi(X_k^r) = \min_{i \in [1, N]} \Phi(X_i^r) \quad (2.18)$$

4. Solis – tiek atrasts funkcijas $\Phi(X)$ minimums virzienā $(X_k^r - X^r)$:

$$\Phi(X^{r+1}) = \min_{\lambda \in R^1} \Phi(X^r + \lambda(X_k^r - X^r)) \quad (2.19)$$

5. Solis – tiek pārbaudīts iterāciju beigšanas nosacījums (skat. zemāk). Ja šis nosacījums tiek izpildīts, tiek pieņemts, ka $X^* \approx X^{r+1}$ un beigtas iterācijas. Pretējā gadījumā tiek pieņemts, ka $r = r + 1$ un algoritms pāriet uz soli nr. 2.

Meklēšanas beigšanas nosacījuma lomu var spēlēt viens no standartiem iterāciju beigšanas nosacījumiem:

$$\|X^{r+1} - X^r\| \leq \varepsilon_X \quad (2.20)$$

kur ε_X – konstante, kas nosaka nepieciešamo meklēšanas precizitāti pēc X ;

$$|\Phi(X^{r+1}) - \Phi(X^r)| \leq \varepsilon_\Phi \quad (2.21)$$

kur ε_Φ – konstante, kas nosaka nepieciešamo meklēšanas precizitāti pēc Φ .

Var tikt izmantoti arī citi meklēšanas pabeigšanas kritēriji, piemēram, nosacījums, kad hipersfēras rādiuss nedrīkst pārsniegt vērtību ε_X :

$$\rho^r \leq \varepsilon_X. \quad (2.22)$$

Meklēšanas procesā hipersfēras rādiuss var tikt mainīts – tikt palielināts veiksmīgu soļu gadījumā (lielā attālumā no punkta X^*) un samazināts neveiksmīgu soļu gadījumā (punkta X^* tuvumā).

Meklēšanas process var tikt paātrināts, ja punkts uz hipersfēras virsmas, attiecībā pret iepriekšējo soli, tiek izvēlēts (gadījuma veidā) kādā sektorā. Sektora atvērums leņķis var tikt mainīts meklēšanas procesa gaitā.

Monte-Karlo metode

Tiek apskatīts daudzdimensiju globālās noteiktas optimizācijas uzdevums (2.2).

Monte-Karlo metodes darbības algoritms šajā situācijā ir sekojošs:

1. Solis – tiek uzdots izmēģinājumu skaits N un uzdots iterāciju skaitītāja vērtība $r = 1$;
2. Solis – izmantojot kāda veida gadījuma skaitļu programmgeneratoru tiek ģenerētas 3 vektora $X^1 \in R^3$ komponentes.
3. Solis – tiek aprēķināts $\Phi(X^1)$ un pieņemts, ka $X^* = X^1, \Phi^* = \Phi(X^1), r = r + 1$.

4. Solis – analogiski solim nr. 2. tiek ģenerētas vilciena parametru sākuma vērtības $X^r \in D$. Tiek uzstādīta atbilstoša optimalitātes kritērija vērtība $\Phi(X^r) = \Phi^*$.
5. Solis – tiek izpildītas sekojošas piesavināšanas:

$$X^* = \begin{cases} X^r, & \text{ja } \Phi^r < \Phi^*, \\ X^*, & \Phi^r \geq \Phi^* \end{cases}$$

6. Solis – ar $r < N$, tiek pieņemts, ka $r = r + 1$ un algoritms pāriet uz soli nr. 4., pretējā gadījumā X^*, Φ^* tiek pieņemti tuvākā risinājuma lomā, un aprēķini tiek pabeigti.

Jāatzīmē tas, ka vienkāršākajā gadījumā $X^r \in R^3$ vērtības viendabīgi sadalītas apgabālā R^3 . Ar mērķi samazināt skaitļošanas resursus un zinot aprioro informāciju par globālā minimuma punktu, ir autors piedāvā izmantot sadalījuma likumu, kurā punkta ģenerēšanas varbūtība globālā minimuma apkārtnē ir augstāka, nekā ārpus tās.

Precīzai globālā minimuma lokalizācijai ar *Monte-Karlo* metodes palīdzību, ir nepieciešams ļoti liels izmēģinājumu skaits N , tāpēc Monte-Karlo metode tiek kombinēta ar lokālās optimizācijas metodi

Monte-Karlo metodes kombinācijas ar determinētu lokālās optimizācijas metodi.

1. Solis – tiek uzdots kopējais gadījuma punktu skaits N .
2. Solis – izmantojot kāda veida gadījuma skaitļu programmģeneratoru tiek ģenerēti N gadījuma punkti X^1, X^2, \dots, X^N , kas pieder kopai D .
3. Solis – tiek piešķirts $r = 1$
4. Solis – izejot no punkta X^r ar kādu no daudzdimensiju noteiktas optimizācijas metodēm tiek atrasts funkcijas $\Phi(X)$ lokālais minimums $(X^*)^r$ un šīs vērtības apkārtnē tiek atrasts $\Phi((X^*)^r) = (\Phi^*)^r$.
5. Solis – ja $r < N$, tad tiek pieņemts $r = r + 1$ un algoritms pāriet uz soli nr. 4., pretējā gadījumā algoritms pāriet nākamo soli.
6. Solis – tiek atrasts minimālais no skaitļiem $(\Phi^*)^r, r \in [1, N]$. Tiek pieņemts, ka $\min_{r \in [1, N]} (\Phi^*)^r = (\Phi^*)^k$ un uzdevuma aptuvenais atrisinājums ir $(X^*), (\Phi^*)^r$.

Ģenētiskais algoritms

Ģenētiskā algoritma darbība ir sekojoša.

1. Solis – nejaušā veidā tiek izveidota sākuma sistēmas Φ risinājumu kopa B_0 no k atsevišķiem sistēmas risinājumiem $A_1 \dots A_k$:

$$B_0 = (A_1, A_2, \dots, A_k) \quad (2.23)$$

2. Solis – tiek aprēķināta katra risinājuma piemērotība $F(A_i) = \Phi(A_i), i = 1 \dots k$.
3. Solis – ar noteiktu varbūtību Pc izvēlas risinājumus Ac_1 un Ac_2 no risinājumu kopas B_t ar selekcijas operatoru $(Ac_1, Ac_2) = Select(B_t)$.
4. Solis – tiek veikta krustošanās $Ac = Crossing(Ac_1, Ac_2)$.
5. Solis – ar noteiktu mutācijas varbūtību Pm tiek izpildīta mutācija $Ac = Mutation(Ac)$.
6. Solis – ar noteiktu inversijas varbūtību P_i tiek izpildīta inversija $Ac = Inversion(Ac)$.
7. Solis – iegūtais jaunais risinājums Ac tiek ievietots jaunajā risinājumu kopā $B_{t+1} : Insert(B_{t+1}, Ac)$.
8. Solis – tiek izpildītas operācijas no 3. punkta k reizes.
9. Solis – tiek palielināts esošās risinājumu kopas numurs $t = t + 1$.
10. Solis – ja izpildās algoritma apstādināšanas nosacījums, algoritms pabeidz savu darbību, pretējā gadījumā, pāriet solī nr. 2.

Aprakstīto algoritmu darbības efektivitāte un atbilstība piedāvājama *APBS* sistēmai tiks pārbaudīta promocijas darba praktiskajā nodaļā.

Dzelzceļa transporta ritošā sastāva kustības matemātiskā modeļa izstrāde

Vilciena kustības matemātiskā modeļa *VKM* aprakstam (modelējot vilciena bremsēšanas procesu), tiek piedāvāts izmantot sekojošas matemātiskās sakarības. Pieņemot, ka vilciens atrodas kustībā, tā bremsēšanas paātrinājumu a_{br} var aprēķināt pēc sekojošas formulas:

$$a_{br} = \frac{F_{bremz} + F_{berz}}{m_{kop}}, \quad (2.24)$$

kur, F_{bremz} – vilciena pneimatiskās bremžu sistēmas bremzēšanas spēks (N), F_{berz} – vilciena rites berzes spēks (N), m_{kop} – vilciena kopēja masa, kg.

No literatūras [190, 189 u. c.] ir zināms, ka pastāv arī virkne citu spēku, kas darbojas uz kustībā esošu vilcienu, bet sakarā ar to, ka tie pārsvarā ir mainīgi un nokontrolējami lielumi, kā arī nav salīdzinoši lieli, pirmā tuvinājuma matemātiskajā modelī tiek piedāvāts ievērot tikai svarīgākos no tiem.

Vilciena rites berzes spēks F_{berz} tiek aprēķināts, izmantojot vilciena kustības īpatnējo pamata pretestību ω_0 :

$$F_{berz} = \omega_0 \cdot m_{kop} . \quad (2.25)$$

Vilciena kustības īpatnējo pamata pretestību ω_0 aprēķina sekojoši:

$$\omega_0 = \omega_x + \omega_0'' , \quad (2.26)$$

kur ω_x – lokomotīves kustības īpatnējā pamata pretestība un ω_0 – vagonu kustības īpatnējā pamata pretestība.

Lokomotīves kustības īpatnējo pamata pretestību ω_x atrod pēc formulas:

$$\omega_x = 2,4 + 0,009 \cdot V_{vilciena} + 0,00035 \cdot V_{vilciena}^2 . \quad (2.27)$$

Savukārt vagonu kustības īpatnējo pamata pretestību ω_0'' atrod pēc formulas:

$$\omega_0'' = 0,7 + \frac{8 + 0,1 \cdot V_{vilciena} + 0,0025 \cdot V_{vilciena}^2}{q_0} , \quad (2.28)$$

kur q_0 – vagona svars uz vienu vagona asi (t).

Formulas (2.27) un (2.28) tiek izvēlētas bezsavienojumu ceļa posmam un pieņemot, ka vilciens sastāv no četrus asu kravas vagoniem ar spiedienu uz vienu asi lielāku par 6 t (vilciena kustības matemātiskajā modelī ir iespējams pielietot arī citas formulas, kas ir aprakstītas literatūrā [181, 192] un raksturo cita veida sliežu ceļa posmu vai vilciena vagonu tipu).

Par ritošā sastāva bremžu sistēmas bremzēšanas spēku F_{bremz} var aprēķināt sekojoši:

$$F_{bremz} = 1000 \cdot \sum K \cdot \varphi_k , \quad (2.29)$$

kur $\sum k$ – summārais vagonu bremžu kļu spiedspēks un φ_k – bremžu kļu berzes koeficients.

Summārais vagonu bremžu kļu spiedspēks tiek aprēķināts pēc formulas

$$\sum K = k_a \cdot a_{sk} \cdot n_{vag}, \quad (2.30)$$

kur k_a – spiedspēks uz vienu vagona asi (N), ko aprēķina pēc formulas $k_a = k_k \cdot 2$, kur k_k – spiedspēks uz vienu vagona bremžu kluci, a_{sk} – vagona asu skaits (n) un n_{vag} – vilciena vagonu skaits (n).

Standarta bremžu kļu berzes koeficientu φ_k aprēķina pēc formulas

$$\varphi_k = 0,6 \cdot \frac{16 \cdot k_k + 100}{80 \cdot k_k + 100} \cdot \frac{V_{vilciena} + 100}{5 \cdot V_{vilciena} + 100}. \quad (2.31)$$

Bremžu kļūiem ar paaugstinātu berzes koeficientu (tiek izmantoti speciāli uzliktņi) berzes koeficientu φ_k aprēķina pēc formulas

$$\varphi_k = 0,5 \cdot \frac{16 \cdot k_k + 100}{52 \cdot k_k + 100} \cdot \frac{V_{vilciena} + 100}{5 \cdot V_{vilciena} + 100}. \quad (2.32)$$

Kompozīta bremžu kļūiem berzes koeficientu φ_k aprēķina pēc formulas

$$\varphi_k = 0,44 \cdot \frac{k_k + 20}{4 \cdot k_k + 20} \cdot \frac{V_{vilciena} + 150}{2 \cdot V_{vilciena} + 150}. \quad (2.33)$$

Formulas (2.31), (2.32) un (2.33) var tikt izmantotas adaptācijas algoritma aprēķinos kombinētu ritošo sastāvu gadījumā.

No iepriekšējām formulām izriet, ka spiedspēks uz vienu vagona bremžu kluci k_k ir pamata mainīgais lielums, kurš iespaido vilciena bremzēšanu. k_k ir raksturojams ar tā maksimālo sasniedzamo vērtību, kas ir atkarīga no:

- Realizējamā bremzēšanas režīma, kas kopumā iespaido saspīestā gaisa spiediena krituma bremžu maģistrālē *BrM* ;
- Izvēlētajā vagona gaisdaļa darba režīma (tukšs, vidēji piekrauts, pilns, kalnu vai līdzenumu darba režīms);
- Vagona vai lokomotīves tipa;
- Bremžu kļu tipa;

- Konkrētā vagona (lokomotīves) bremžu sistēmas stāvokļa u. c.

Kā dinamisks lielums $k_k(t)$ bremzēšanas sākuma momentā (kamēr nav sasniedzis savu nominālo vērtību) ir atkarīgs arī no:

- Realizējamā bremzēšanas režīma;
- Vagona vai lokomotīves tipa;
- Konkrētā vagona (lokomotīves) bremžu sistēmas stāvokļa u. c. parametriem.

Līdz ar ko, ir nepieciešams noteikt likni, kas atbilst $k_{k_teor}(t) = \{k_k^1, k_k^2, \dots, k_k^n\}$ izmaiņai laika momentā no t_1 līdz t_2 . Šim nolūkam tiek piedāvāts izmantot *AMA* algoritma 2. darbības solī uzņemto faktisko likni $a_{br_fakt}(t) = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, kas apraksta vidējās $k_{k_fakt}(t)$ vērtības izmaiņu ritošajā sastāvā, ar nosacījumu, ka tiek izslēgta berzes spēku ietekme ritošā sastāva kustībā.

Tādējādi bremžu kļu bremzēšanas momentāno spēku k_k^i var aprēķināt pēc formulas:

$$k_k^i = k_k^{nom} \cdot \frac{a_i}{\sum_{j=1}^n a_j} + k_k^{i-1} \quad (2.34)$$

Promocijas darba autors piedāvā funkciju $k_k(t)$ izmantot arī prognozējamā ritošā sastāva vagonu skaita un tā izmaiņas noteikšanai, pēc 11. tabulas no literatūras [192], kas, kā prognozējas, var paātrināt adaptīvā meklēšanas algoritma *AMA* funkcionēšanu.

Vilciena bremžu sistēmas automātiskās vadības algoritma izstrāde

Turpmākam *BSAVA* algoritma aprakstam, autors piedāvā izmantot tos pašus darba režīmus, kas raksturojami reālajiem mašīnista un palīgbremzes krāniem, kas ir ekspluatācijā, norādot kādā veidā katrā no tiem mainās gaisa spiediens bremžu maģistrālē BrM_{gs} un bremžu spiediens palīgbremzes maģistrālē PBM_{gs} .

Mašīnista krāna darbības režīmi ir sekojoši:

I – vilciena bremžu atlaišana un bremžu maģistrāles BrM uzlāde ar iespējamo bremžu maģistrāles spiediena BrM_{gs} virsuzlādi (BrM_{gs} tiek palielināts līdz 5,5 bar);

II – braukšanas stāvoklis ar automātisku BrM_{gs} virsuzlādes likvidēšanu (BrM_{gs} no virsuzlādes līmeņa tiek samazināts ar tempu 0,0016-0,0025 bar/s līdz nominālajam līmenim 4,7-5,1 bar);

III – pārsedze bez bremžu maģistrāles BrM barošanas (BrM_{gs} tiek uzturēts līmenī, kas tika sasniegts pēc V vai VA režīma veikšanas, bez BrM_{gs} noplūžu likvidēšanas);

IV – pārsedze ar bremžu maģistrāles BrM barošanu (BrM_{gs} tiek uzturēts līmenī, kas tika sasniegts pēc V vai VA režīma veikšanas, ar BrM_{gs} noplūžu likvidēšanu);

V – dienesta bremzēšana (BrM_{gs} tiek samazināts ar tempu 0,2 bar/s);

VA – dienesta bremzēšana garsastāva vilcieniem (BrM_{gs} tiek samazināts ar tempu 0,02 – 0,03 bar/s);

VI – avārijas bremzēšana (BrM_{gs} tiek samazināts ar tempu kas ir lielāks par 0,8 bar/s).

Savukārt palīgbremzes krāns ir raksturojams ar sekojošiem darbības režīmiem:

I – lokomotīves bremžu atlaišana (PBM_{gs} tiek samazināts līdz nulles vērtībai);

II – lokomotīves bremžu atlaišana, bet tiek nodrošināta to automātiska vadība ar mašīnista krāna palīdzību;

III – IV – bremzēšanas pozīcijas.

Sīkāk mašīnista un palīgbremzes krānu uzbūve un funkcionēšanas īpašības aprakstīti literatūrā [186, 187, 188, 190].

Līdz ar ko vilciena dienesta bremzēšanas režīmu izpildei, bremžu sistēmas automātiskās vadības algoritmam *BSAVA* ir jānodrošina 3 galvenās pamatfunkcijas, kuras, izmantojot mašīnista un palīgbremzes krānu, parasti izpilda mašīnists:

- 1) Gaisa spiediena samazināšana bremžu maģistrālē BrM (un/vai palielināšana PBM) – bremzēšana;
- 2) Gaisa spiediena nemainīgas vērtības uzturēšana bremžu maģistrālē BrM (un/vai PBM) – pārsedzes režīms;
- 3) Gaisa spiediena palielināšana bremžu maģistrālē BrM (un/vai samazināšana PBM) – bremžu atlaišana.

Ievērojot augstākminēto, vilciena bremžu automātiskās vadības algoritms (*BSAVA*) satur sekojošus soļus:

1. Solis – *APBS* sistēmas galvenais darbības algoritms ģenerē signālu vilciena bremzēšanai.
2. Solis – *GKM* ar *MKTVM* atslēdz vilces režīmu, *VRN* atbilst nulles pozīcijai.
3. Solis – *GKM* ar *EPVM* (kas no gaidīšanas režīma tiek pārslēgts uz darba režīmu) uzsāk gaisa spiediena samazināšanu bremžu maģistrālē *BrM*.
4. Solis – ja *GKM* no AMN saņem signālu, ka

$$BrM_{gs_start} - BrM_{gs_mom} \geq BrM_{gs_1pak}, \quad (2.35)$$

BSAVA algoritms pāriet nākamajā solī, pretējā gadījumā solis nr. 4. tiek atkārtots.

5. Solis – *GKM* ar *EPVM* uztur bremžu maģistrāles gaisā spiedienu BrM_{gs} vērtībā, kas tika sasniegta iepriekšējā algoritma solī.
6. Solis – *APBS* sistēmas galvenais darbības algoritms ģenerē signālu vilciena bremžu atlaišanai.
7. Solis – *GKM* ar *EPVM* uzsāk gaisa spiediena palielināšanu bremžu maģistrālē *BrM*.
8. Solis – ja *GKM* no AMN saņem signālu, ka

$$BrM_{gs_mom} \geq BrM_{nom}, \quad (2.36)$$

9. Solis – *BSAVA* algoritms pāriet nākamajā solī, pretējā gadījumā solis nr. 8. tiek atkārtots.
10. Solis – *EPVM* tiek pārslēgts gaidīšanas režīmā. Sistēma ir gatava jaunas bremzēšanas pakāpes izpildei.

Neskatoties uz *BSAVA* algoritma salīdzinošo vienkāršību, tam savas funkcionēšanas laikā ir jāievēro zināmi ierobežojumi, kas saistīti ar vilcienu pneimatisko bremžu ekspluatācijas nosacījumiem.

Turpinājumā promocijas darba autors uzskaita svarīgākos no tiem, kurus ir jāievēro *APBS* sistēmas izstrādē:

- *APBS* sistēmas darbības algoritma izstrādē jāparedz četri galvenie ritošā sastāva bremzēšanas veidi – dienesta bremzēšana ātruma samazināšanai, dienesta bremzēšana bremžu sistēmas diagnostikas nolūkos, dienesta

bremzēšana pilnīgai vilciena apturēšanai un avārijas bremzēšana (katram bremzēšanas veidam tiek izvirzīti savi atbilstošie normatīvi);

- *EPVM* elektropneimatiskajiem vārstiem ir jānodrošina gan mašīnista krāna, gan palīgbremžu krāna funkcijas, jo abi šie krāni tiek izmantoti ritošā sastāva dienesta bremzēšanas procesā;
- *EPVM* elektropneimatiskie vārsti gaidīšanas režīmā nedrīkst traucēt mašīnista un palīgbremžu krāna normālai darbībai;
- Izpildot dienesta bremzēšanu, *EPVM* gaisa spiedienam bremžu maģistrālē BrM_{gs} jāsamazinās ar tempu 0,1 – 0,4 (bar/s), kas nodrošina bremzēšanas viļņa izplatīšanu ritošajā sastāvā ar ātrumu 100 līdz 160 m/s;
- Izpildot avārijas bremzēšanu, *EPVM* gaisa spiedienu bremžu maģistrālē BrM_{gs} jāsamazinās ar tempu lielāku par 0,8 (bar/s), kas nodrošina bremzēšanas viļņa izplatīšanu ritošajā sastāvā ar ātrumu līdz 300 m/s;
- Nominālais gaisa spiediena bremžu maģistrālē BrM_{gs} līmenis 5,3 – 5,5 (bar),
- Izpildot vienu dienesta bremzēšanas pakāpi, gaisa spiediens bremžu maģistrālē BrM_{gs} tiek samazināts par 0,6 – 0,7 (bar);
- Izpildot bremzēšanu ar gaisa spiediena bremžu maģistrālē BrM_{gs} samazināšanu vairāk par 1 (bar), tiek ieslēgta smilšu padeve;
- Bremzēšanas laikā izpildot pirmo pakāpi, vilciena kustības ātrumam ir jāsamazinās par 25–50 %. Tupinājumā bremzēs tiek vai nu atlaistas, vai nu realizēta papildus bremžu maģistrāles BrM izlāde.
- Veicot avārijas bremzēšanu, *EPVM* jānodrošina mašīnista krāna VI pozīcijas imitēšanu, palīgbremžu krāna malējās pozīcijas imitēšanu, smilšu padevi un *MKTVM* ir jāatslēdz vilce.
- Veicot bremzēšanu ar vairākām bremzēšanas pakāpju izpildēm, mašīnista krāna pozīciju imitēšanu ir sekojoša: pirmā pakāpe – II, V (laika aizture, kamēr notiek gaisa spiediena samazināšana par 0,6–0,7 (bar)), VA (uz 5 (s)), IV; otrā pakāpe – IV, V (laika aizture, kamēr notiek gaisa spiediena samazināšana par 0,3–1 (bar)), IV.
- Veicot automātisku pneimatiskās bremžu sistēmas pārbaudi, ir jābalstās uz nolikumu: pēc pārsedzes režīma iestatīšanas, vilciena kustības ātrums (kas aprakstīts bremžu testēšanas nolikumā) ir jāsamazinās par 10 km/h nobraucot

attālumu kas aprakstīts testēšanas laika momentā no 20–30 s. (ja minētais nosacījums neizpildās, tiek realizēt avārijas bremzēšana);

- Bremzēšanas maģistrāles veseluma pārbaude tiek realizēta, izmantojot pārsedzes režīma ieslēgšanu uz laiku 1–3 (s), kurā nedrīkst būt novērojama BrM_{gs} samazināšanās;
- Izpildot bremžu atlaišanu realizē pirmo pozīciju 1 līdz sasniegts spiediens 5,6 – 6 (bar), pēc kam realizē braukšanas režīmu;
- Ja sastāvs garāks par 200 asīm, atlaižot bremzes ritošajā sastāvā, vienlaicīgi lokomotīves bremžu cilindros tiek noregulēts spiediens 1,5–2 (bar), un pēc 30–40 (s) to atlaiž.

Secinājumi par otro nodaļu

- 1) Var secināt, ka dotās promocijas darba nodaļas sākumā sastādītais *APA* algoritms atbilst un var tikt izmantots kopējā *APBS* sistēmas darbības algoritmā.
- 2) Veiktā adaptīvo meklēšanas algoritmu (kuri, pēc izvirzītās pirmajā promocijas daba nodaļā hipotēzes, tiek plānoti izmantošanai *APBS* sistēmas *AMA* lomā) izpēte un sastādītie darbības algoritmi ļauj pielietot tos laboratorijas eksperimentos, kas tiek aprakstīti promocijas darba 4. nodaļā.
- 3) Matemātiskā vilciena kustības modeļa *VKM* izstrāde ļauj promocijas darba praktiskajā daļā izveidot šo modeli *MATLAB Simulink* modelēšanas vidē, kā arī realizēt to *GKM* vadības programmas kodā, lai *APBS* spētu veikt nepieciešamos aprēķinus sakarā ar vilciena fiziskajiem kustības un bremžu sistēmas darbības parametriem.
- 4) *BSAVA* izstrāde un funkcionēšanas ierobežojumu kopas sastādīšana ļauj pareizi izveidot *APBS* sistēmas iekārtu prototipus, kas pēc saviem funkcionēšanas parametriem atbilstu izvirzītajām drošības prasībām un normām, un varētu tikt instalēti kopējā vilciena bremžu sistēmā eksperimentālu testu veikšanas nolūkos.

3. *APBS* SISTĒMAS ELEMENTU DARBĪBAS UN MIJIEDARBĪBAS SHĒMU UN DATORMODEĻU IZSTRĀDE

Situācijas raksturojums

Pēc iepriekšējā promocijas darba nodaļā veiktās *APBS* sistēmas darbības algoritmu un kopējās tās struktūras izstrādes, ir jāveic šīs sistēmas elementu elektrisko, pneimatisko un mehānisko slēguma shēmu un datormodeļu izstrāde. Pirms to izstrādes, promocijas darba autors pievērš uzmanību drošības prasībām, kas tiek izvirzītas mikroprocesoru tehnikas un iebūvējamo intelektuālo iekārtu iekšējo interfeisu izmantošanai dzelzceļa transporta vadības sistēmās. Tiek izcelta vesela prasību kopa, kuras neizpildīšanas gadījumā piedāvājamās sistēmas ieviešana ekspluatācijā (vai pat eksperimentālā testēšanās) nav iespējama. Šajā promocijas darba nodaļā tiek aprakstīta arī paša *APBS* sistēmas elementu elektrisko shēmu izstrāde un šīs sistēmas elementu un to mijiedarbību datormodeļu izstrāde un apraksts.

Drošības prasības mikroprocesoru tehnikas izmantošanai

Tā kā viena no svarīgākajām *APBS* sistēmas pamatdaļām ir *GKM*, tad pirmām kārtām *GKM* izstrādes procesā ir jāapskata jautājumi, kas ir saistīti ar mikroprocesoru iekārtu drošas funkcionēšanas principiem dzelzceļa drošības un vadības sistēmās.

Autors secina, ka izmantojot mikroprocesoru tehniku, augsta *APBS* sistēmas darba drošuma līmeņa nodrošināšanai ir jāparedz ne tikai drošu sistēmas elementu izmantošana, bet arī dažādu rezervēšanas un kontroles metožu pielietošanu. Šim nolūkam parasti tiek izmantotas 3 sekojošas galvenās stratēģijas:

- a) Bezatteiču (*reliability*) stratēģija, ko raksturo:
 - Minimāls shēmu skaits;
 - Elementu drošības līmeņa paaugstināšana.
- b) Noturība pret atteicēm (*fault-tolerance*), ko raksturo:
 - Rezervēšana;
 - Diagnostika;
 - Rekonfigurācija;
 - Atjaunošana.

c) Droša darbība atteižu gadījumos (*fail-safe*), ko raksturo:

- Pašpārbaudošo shēmu pielietošana;
- Elementu izmantošana ar nesimetriskām atteicēm.

Ir zināms, ka izmantojot augstu integrālo mikroshēmu integrācijas pakāpi, uzstādīto augsto drošības rādītāju sasniegšanai, jāizmanto dažādus rezervēšanas veidus, kas paredz atteižu kontroli un diagnostiku, kā arī mehānisko elementu atteices [205].

Ir jāsecina, ka kopumā mūsdienu mikroprocesortehnika ir raksturojama ar mazu izeju skaitu un lielu integrācijas pakāpi, tāpēc to pilnīga pārbaude prasa ievērojamu laiku un bieži vien nevar tikt realizēta reālā laika režīmā.

Nepieciešamie *APBS* sistēmas bezatteices rādītāji ir jānodrošina, izmantojot strukturālo rezervēšanu, kura var tikt iedalīta iekārtu un programmu tipā. Tāpēc izstrādājot *GKM*, ir paredzēt izmantot paralēlu informācijas apstrādi vienlaicīgi vairākās mikroprocesoru iekārtās vai arī vairākās programmās vienā mikroprocesoru iekārtā.

Atbilstoši zināmiem standartiem [*EN 50126*, *EN 50128*, *EN 50129* u. c.] rezervēšanas metodēm, kuras atbilst noteiktām drošības prasībām, ir jānodrošina:

- a) *APBS* sistēmas *GKM* atteižu neatkarību viena tipa elementos;
- b) *APBS* sistēmas *GKM* aizsardzību no atteicēm un to uzkrāšanu;
- c) *APBS* sistēmas *GKM* programmnodrošinājuma pareizas izpildes kontroli.

Strukturālās rezervēšanas gadījumā par kritiskiem mezgliem tiek uzskatīta ieejas un izejas informācija, barošana, kontroles iekārtas pareizas darbības ticamība un programmnodrošinājuma viena tipa kļūdas.

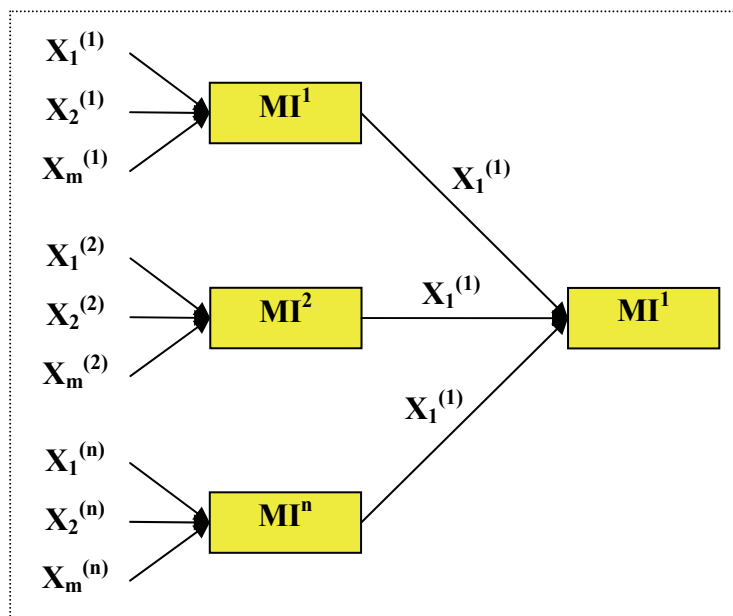
Aizsardzībai pret traucējumiem ieejas informācijā, *GKM* tiek pielietotas viena vai vairākas paralēlas ieejas ar galvaniski atsaitētām ķēdēm.

APBS elektrisko elementu barošanai ir jābūt autonomai, savukārt vadības procedūru realizēšanai izpildorgānos ir jābūt organizētai izejas signālu uzkrāšanas metodei, t. i. veicot integrāl papildus informācijas novērtēšanu, kas ļauj nodrošināt nepieciešamo traucējumizturības līmeni.

Tā kā programmu tipa rezervēšanas un kontroles metodes prasa lielāku atteižu atklāšanas laiku, nekā aparātu tipa un, pielietojot tās, ir grūti nodrošināt atteižu neatkarības principus dažādās informācijas apstrādes programmās, kā arī minēto metožu pielietošana vidēji par 70 % var sadārdzināt *GKM* un tā perifēro iekārtu un to slēguma shēmu izstrādi,

līdz ar ko uz doto momentu var secināt, ka *APBS* sistēmas izstrādei ir nepieciešams vienlaicīgi pielietot gan programmu, gan aparātu tipa rezervēšanas un kontroles metodes.

Vispārīgā veidā šāda struktūra ir attēlota 3.1. att. Pēc šāda shēmas var tikt rezervēta gan visa iekārta, gan tās atsevišķie mezgli.



3.1. att. Dzelzeļa sistēmu rezervēšanas struktūras vispārīgā shēma

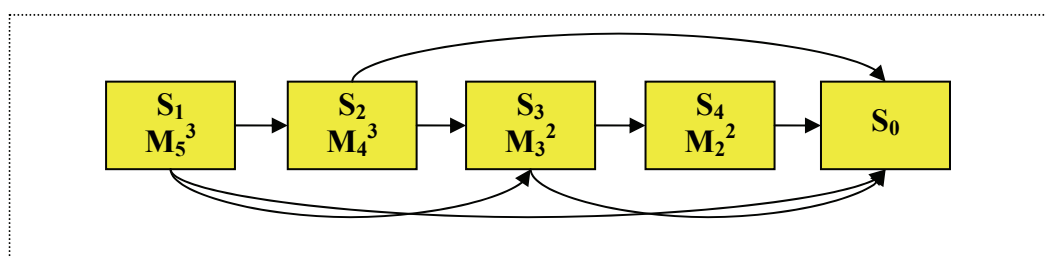
Lielums n , ko parasti sauc par rezervēšanas kārtu, apraksta identisku kanālu vai elementu skaitu, kas nodrošina atbilstoši informācijas iegūšanu un apstrādi. Neatņemama papildus drošības iekārta daļa ir to atjaunošanas orgāni, kas realizē kļūdu korekciju, kuras rodas iekāru atteices situācijās. Gadījumā, ja kāds no informācijas apstrādes kanāliem strādā nekorekti, tā izejā var parādīties nepatiesa loģiskā 0 vai 1. Pareizais signāls papildus elementu struktūras izejā parādīsies tikai pie noteikta nepatiesu 0 vai 1 signālu skaita Y_i izejās. Tādā veidā zinot nepatiesu signālu parādīšanās iespējamības pakāpi, izvēlas atjaunošanas orgāna tipu.

Izpētot zināmus rezervēšanas veidos [194], *APBS* sistēmas izstrādē promocijas darba autors piedāvā pielietot mažoritārās rezervēšanas veidu, kas paredz to, ka *GKM* tiek radīts nepāra informācijas apstrādes kanālu skaits, kuru izejas signāli tiek apvienoti ar atjaunošanas orgāna (*GKM* mažoritārā elementa) palīdzību. Signāls *GKM* izejā tiek noteikts ar izejas signālu $\left(\rho > \frac{m+1}{2}\right)$ vairākumu. Kanālu $\frac{n-1}{2}$ atteice vai kļūme nenoved pie *GKM* atteices kopumā. Tādējādi atsevišķu kanālu darba spēju var atjaunot nepārtraucot *GKM* darbību, kas

attiecīgi manāmi paaugstina visas *APBS* sistēmas darba gatavības pakāpi visdažādākajos darba režīmos.

Palielinot mažoritārās rezervēšanas pakāpi rezervējamo bloku skaits Y_i pieaug ātrāk, nekā lielums $k+1$, kas apzīmē bloku skaitu, kuriem izejot no ierindas visa rezervējamā grupa pārstāj darboties, kas nozīmē to, ka pieaug darbaspējīgo bloku skaits, kuri netiek izmantoti pēc mažoritāri-rezervētās grupas atteices.

Veicot mažoritārā elementa struktūras izmaiņu ir iespējams izmantot atlikušos darbaspējīgos blokus, t. i. var palielināt visas rezerves grupas darba laiku līdz pilnīgai tās atteicei. Piemēram, mikroprocesoru iekārtai strādājot pēc principa $3v5$ atteice rodas strādājot nekorekti jebkuram no trim no trim blokiem, diviem no tiem paliekot darbaspējīgiem. Savukārt, ja visu trīs elementu darbības momentā pārveidot shēmu $3v5$ shēmā $2v3$, sistēmas darbība tiks saglabāta līdz tam brīdim, kamēr sistēmā būs divi darbaspējīgi bloki. Ir iespējama struktūras pārveidošana pārejot uz citu rezervēšanas veidu, ko sauc par dublēšanu. Šis paņēmiens ir konkrēts adaptīvo mikroprocesoru gadījums ar ciklisko adaptāciju. Gadījumā, ja ilgāku laiku (vairākus ciklus) kādā no izejām ir pastāvējis kļūdainais signāls, tad šīs izejas svāra koeficients laideni samazinās līdz nullei un dotais bloks tiek atslēgts no mikroprocesoru iekārtas, bet atlikušie divi pāriet uz „un” tipa darba režīmu. Šādā gadījumā kopējā mikroprocesoru iekārtas drošība un tās aizsardzības pakāpe, parādoties kļūdainam izejas signālam, paaugstinās, saglabājot kopējos darba veikspējas parametrus.

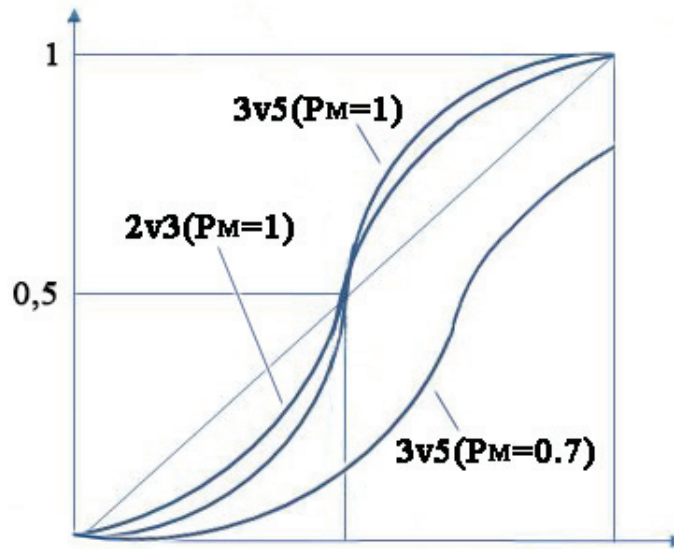


3.2. att. Adaptīvās mažoritāri rezervētās sistēmas struktūra

Adaptīvās mažoritāri rezervējamās sistēmas (*AMRS*) $3v5$ grafiskais attēlojums ir redzams attēlā 5. Vidējā šādas adaptīvas sistēmas nostrāde līdz atteicei ir $T_{darba} - 1,28 T_{atteices}$.

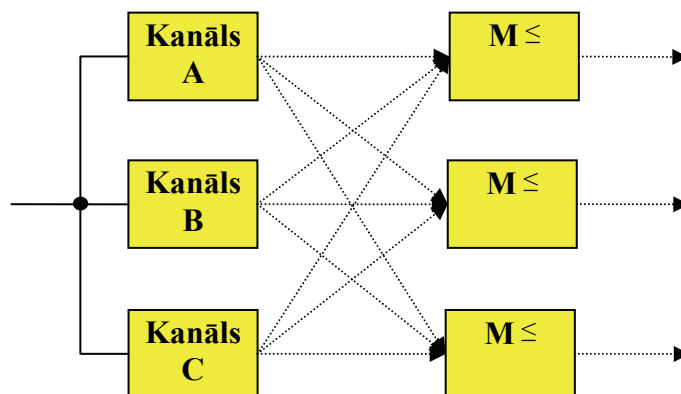
Tādā veidā, adaptīvās mažoritārās sistēmas var ievērojami paaugstināt iekārtu bezatteices parametrus, neveicot nestrādājošo informācijas apstrādes kanālu labošanu. Praktiski adaptīvu mikroprocesoru lietderīgi realizēt programmu tipā, jo aparātu tipā šādu elementu izstrāde ir salīdzinoši sarežģīta un neefektīva. 3.3. att. ir attēlotas mikroprocesoru iekārtas bezatteices darbības atkarības $2v3$ un $3v5$ no rezervējamā kanāla bezatteices darbības

varbūtības pie $P_m = const$. Tām piemīt S-veida raksturs, kas liek izdarīt secinājumus par to, ka papildus struktūrās $2v5$ un $3v5$ ar vienkārtīgo saiti iespējams ieguvums darba drošībā izmantojot ļoti drošu mikroprocesoru iekārtu ($P_{me} \rightarrow 1$), ja papildus kanāla bezatteices darbības varbūtība ir $P_{atteices} > 0,5$. Šādu struktūru trūkums ir tas, ka to darba drošuma līmenis nepārsniedz mikroprocesora darba drošuma līmeni.



3.3. att. Mikroprocesoru iekārtas bezatteices darbības atkarības

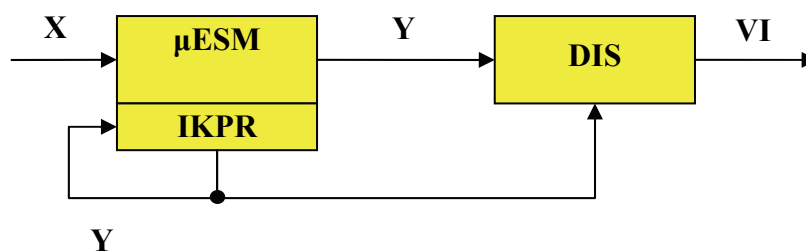
Lielu ieguvumu no papildus struktūras drošības līmeņa paaugstināšanas var iegūt izmantojot mažoritāro rezervēšanu ar vairākkārtīgām saitēm.



3.4. att. Mažoritārās rezervēšanas ar vairākkārtīgām saitēm principiālās shēma

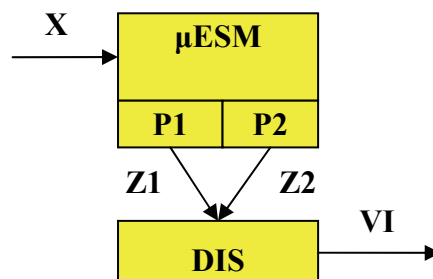
Drošu mikroprocesoru sistēmu funkcionēšanas drošība pārsvarā ir atkarīga no iebūvējamo intelektuālo iekārtu atteicu intensitātes, mikroprocesora kontroles perioda (ϵ_d) ilguma, izejas signālu formēšanas likuma un kontroles dziļuma (diskretizācijas). Apskatīsim biežāk izmantojamās drošu mikroprocesoru sistēmu struktūras.

Vienkanāla sistēma ar vienu programmu (3.5. att.) var tikt pielietota veidojot mikroprocesora pārbaudi pietiekoši augstā līmenī, pielietojot iekšējās kontroles pašpārbaudes rīkus (*IKPR*) un drošas izeju shēmas (*DIS*), vadāmo objektu pieslēgšanai. Rodoties atteicei *IKPR* formē signālu *Y*, ar kura palīdzību sistēma var tikt novesta aizsardzības stāvoklī (piemēram atslēgta barošana) un (vai) mikroprocesora iekārtas izejas no vadāmajiem objektiem. Šādu sistēmu efektivitāte atkarīga no izvēlētās pašpārbaudes metodes efektivitātes. Testa programmām ir jābūt izpildītām pietiekoši bieži, jābūt apgādātām ar pašpārbaudes funkciju un brīvām no kļūdām to ielādes brīdī. Šāda veida arhitektūra tiek pielietota Francijas dzelzceļa sistēmās, realizējot staciju vadības sistēmas.



3.5. att. Vienkanāla sistēma ar vienu programmu

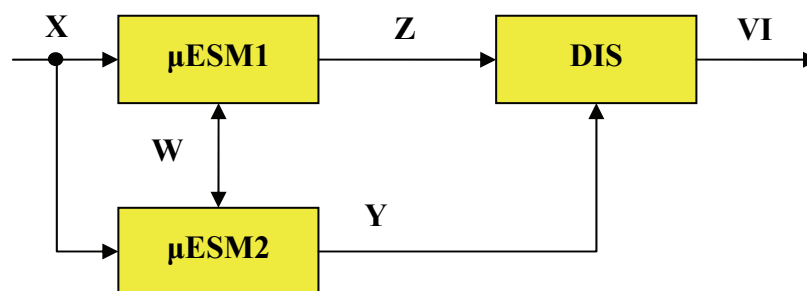
Vienkanāla sistēma ar dublējošo programmu (3.6. att.) izmanto divas atšķirīgas un neatkarīgas programmas vienu un to pašu funkciju realizēšanai. Programmu Z_1 un Z_2 izpildes rezultāti tiek salīdzināti ar ārējas drošas salīdzināšanas shēmu. Drošības līmenis ir atkarīgs no šo abu programmu atšķirības pakāpes un no laika intervāla garuma, kurā tiek veikta šo programmu izvadāmo datu izmantošana. Lietderīgi izmantot to, lai abas no šīm programmām tiktu veidotas ar dažādu programmētāju brigāžu palīdzību, pielietojot dažādus aprēķinu algoritmus. Diversīvais programmu aprīkojums tiek izmantots objektu kontrolleru sistēmas *Ebilock – 850 (950)*.



3.6. att. Vienkanāla sistēma ar dublējošo programmu

Dublējama sistēma ar vājām saitēm (3.7. att.) sastāv no divām mikroprocesoru iekārtām, kurās procesori un to vadības programmas var būt nevienādas. Mikroprocesoru

iekārtas nr. 1. procesors realizē galvenos aprēķinus, mikroprocesoru iekārtas nr. 2. procesors tos pārbauda. Šim nolūkam tiek nodrošināta informācijas apmaiņa starp minētajiem procesoriem, pielietojot vienotu datu kopni. Kanālu sinhronizācijas izpilde šajā situācijā nav obligāta. Mikroprocesoru iekārtas darbības kontrole tiek realizēta izmantojot vai nu ar testa programmu palīdzību, vai nu izmantojot paralēlus aprēķinus ar to rezultātu salīdzināšanu. Atklājot kļūdu, mikroprocesoru iekārta nr. 2. formē signālu *Y* un mikroprocesoru iekārtas nr. 1. Izejas tiek atslēgtas no vadības iekārtas. Šādās struktūrās rodas problēmas ar kontroles nepieciešamā ticamības līmeņa nodrošināšanai. Šāda veida arhitektūra tika izmantota *SIEMENS* firmā, izstrādājot pirmās mikroprocesoru centralizācijas iekārtas.



3.7. att. Dublējama sistēma ar vājām saitēm

Tieši pēc šādas struktūras autors piedāvā veidot *GKM* struktūru. Jāpiezīmē, ka izstrādājot un ieviešot ekspluatācijā jaunas dzelzceļa drošības mikroprocesoru sistēmas, kā arī veicot esošo dzelzceļa drošības sistēmu modernizāciju, pret šo sistēmu iekšējiem interfeisiem tiek izvirzītas sekojošas galvenās prasības:

- Unifikācijas iespējas;
- Aizvietošanas iespējas;
- Laika un rīku patēriņa minimizācija bojāto elementu nomaiņai;
- Izmantojamā detaļu skaita un izmēru samazināšana;
- Tālvadības un diagnostikas iekārtu pielietošana u. c.

Mikroprocesoru sistēmām, kuras tiek izmantotas tieši ritošā sastāva vadībā, ir jābūt izgatavotām ar to ražotāju palīdzību, kuri ir ieguvuši starptautisko sertifikātu, atbilstoši standartam *ISO 9000* un ražotajām iekārtām ir jāatbilst ceturtajam augstākajam drošības līmenim pēc *CENELEC* (Eiropas komiteja elektrotehnikas standartizācijas jomā) klasifikācijas. Tajā pat laikā jebkura sistēmas elementa vienreizēja atteice nedrīkst novest pie bīstamas atteices visā sistēmā, un tai ir jābūt identificētai līdz tam momentam, kad sistēmā

var notikt cita elementa neatkarīga atteice. Kopēja mikroprocesoru iekārtu principiālās shēmas struktūra dzelzceļa drošības sistēmās parasti tiek veidota no sekojošiem galvenajiem mezgliem:

- Centrālais kontrolleris (uz mikroprocesora bāzes);
- Perifērās ierīces atklūdošanas rīku (klaviatūras, informācijas attēlošanas iekārtas, programmatoru u. c.) pieslēgšanai;
- Perifērās ierīces informācijas apmaiņai starp procesoriem;
- Perifērās ierīces informācijas apmaiņai ar ārējām iekārtām paralēlā un virknes formātā;
- Perifērās ierīces vājas un stipras strāvas izpildorgānu vadībai;
- Perifērās ierīces analogās informācijas ievadei;
- Perifērās ierīces informācijas nolasīšanai no esošām dzelzceļa automātikas sistēmu releju shēmām;
- Perifērās ierīces informācijas formēšanai par sliežu ķēžu stāvokļiem, tai skaita automātiskās lokomotīvu signalizācijas signāliem.

Iekšējo sistēmas interfeisu galvenie izmantošanas veidi tiek iedalīti sekojoši. Interfeisu lomu, kuri tiek pielietoti informācijas apmaiņas organizēšanai starp centrālo kontrolleru un perifērām ierīcēm, var pildīt dažādi zināmi informācijas apmaiņas organizācijas veidi. Par vieniem no izplatītākajiem to skaitā tiek uzskatīti:

- *ISA* – ar astoņu kanālu datu kopni (*MicroPC* kopne);
- *PCI* – ar multipleksētu datu/adrešu kopni;
- *NLX* – tiek izmantota dažādu ražotāju perifēro iekārtu atbalstam, atbalstot vienlaicīgi abus iepriekšējos standartus.

Interfeisi, kuri tiek izmantoti informācijas apmaiņai starp perifērām ierīcēm un vadības un kontroles ierīcēm, iedalās sekojošos tipos:

- Perifērās ierīces, kas tiek izmantotas atklūdošanas iekārtu pieslēgšanai:
 - Informācijas ievades/izvades ports, kurš strādā pēc paralēlā informācijas nodošanas tipa, piemēram, ports uz mikroshēmas *K580BB55* bāzes (*55 Port*);
 - Testēšanas interfeiss *JTAG*, kas ir *PCI* kopnes daļa;
 - Ievades/izvades ports ar virknes informācijas nodošanas tipu, piemēram, *RS232C* vai *USB*.

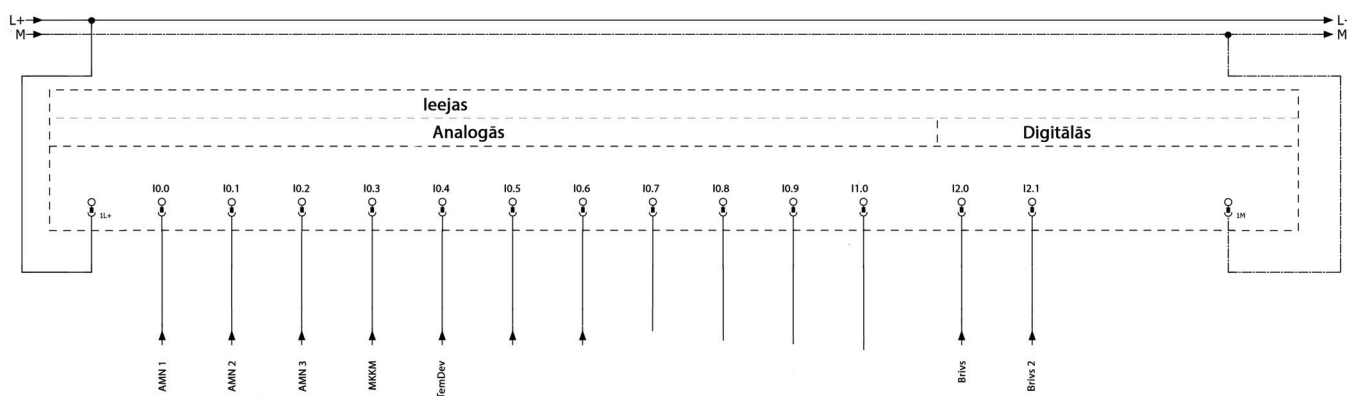
- Perifēro iekārtu bojājumu kontroles un indikācijas shēmu pieslēgšanai, izmanto praktiski visus to pašus elementus, kas tiek izmantotas atklūdošanas iekārtu pieslēgšanai;
- Perifērās iekārtas datu apmaiņai starp procesoriem (drošības līmeņa nodrošināšanas papildus struktūra) vājas sinhronizācijas gadījumā izmanto arī tos pašus elementus, kas tika minēti iepriekšējos punktos;
- Perifērās iekārtas informācijas apmaiņai ar ārējām iekārtām paralēlā un virknes informācijas apmaiņas tipos:
 - Informācijas ievades/izvades ports *RS485* vai *RS422* (informācijas nodošanas ātrums 115 kb/s);
 - Informācijas ievades/izvades ports *Ethernet* (informācijas nodošanas ātrums līdz 1 Mbit/s);
 - Informācijas ievades/izvades ports *CAN* (informācijas nodošanas ātrums līdz 10 Mbit/s).
- Perifērās iekārtas stipras strāvas dzelzceļa automātikas objektu vadībai tiek rekomendēts izmantot vadāmos signālu komutatorus izpildreleju pieslēgšanai ar komutācijas spriegumu līdz 220V;
- Perifērās iekārtas vājas strāvas dzelzceļa automātikas objektu vadībai tiek rekomendēts izmantot vadāmos signālu komutatorus izpildreleju pieslēgšanai ar komutācijas spriegumu 220 V vai 24 V;
- Perifērās iekārtas analogās informācijas ievadei izmantot 8–12 bitu analog-ciparu pārveidotājus ar pieļaujamo ieejas spriegumu diapazonu no – 15 V līdz + 15 V;
- Perifērās iekārtas informācijas ievadei no releju shēmām ir jāizmanto iekārta ar galvanisko atsaiti un pieļaujamo spriegumu ieejā 31 V, pie tam ir jābūt izmantotiem galvenā releja normāli saslēgtiem kontaktiem un pēdējā atkārtotāja normāli atslēgtie kontakti. Galvanisko atsaiti nodrošinošās iekārtas parametriem ir jāatbilst sekojošām prasībām:
 - Informācijas ievadei ir jābūt izmantotiem relejiem, kas netiek izmantoti citās shēmās;
 - Galvaniskās atsaites iekārtai ir jāatbilst pieļaujamajam caursites spriegumam 2000 V;

- Informācijas ievades ķēžu barošanai ir jāpielieto barošanas bloks ar spriegumu ne mazāku par 12V un strāvu ne mazāku par 3mA pie katras ķēdes maksimālā garuma līdz 250 m;
- Objekta darba stāvokļa novērtēšanai ir jāveic tā pārbaudi uz spēju pretoties kontaktu „drebēšanai” un elektromagnētiskajiem traucējumiem;
- Signāla apstrādes laiks no kontaktu nostrādes brīža līdz datu formēšanai galvenajā kontrolerī nedrīkst pārsniegt 0,7 s.

APBS sistēmas elementu elektrisko shēmu izstrāde

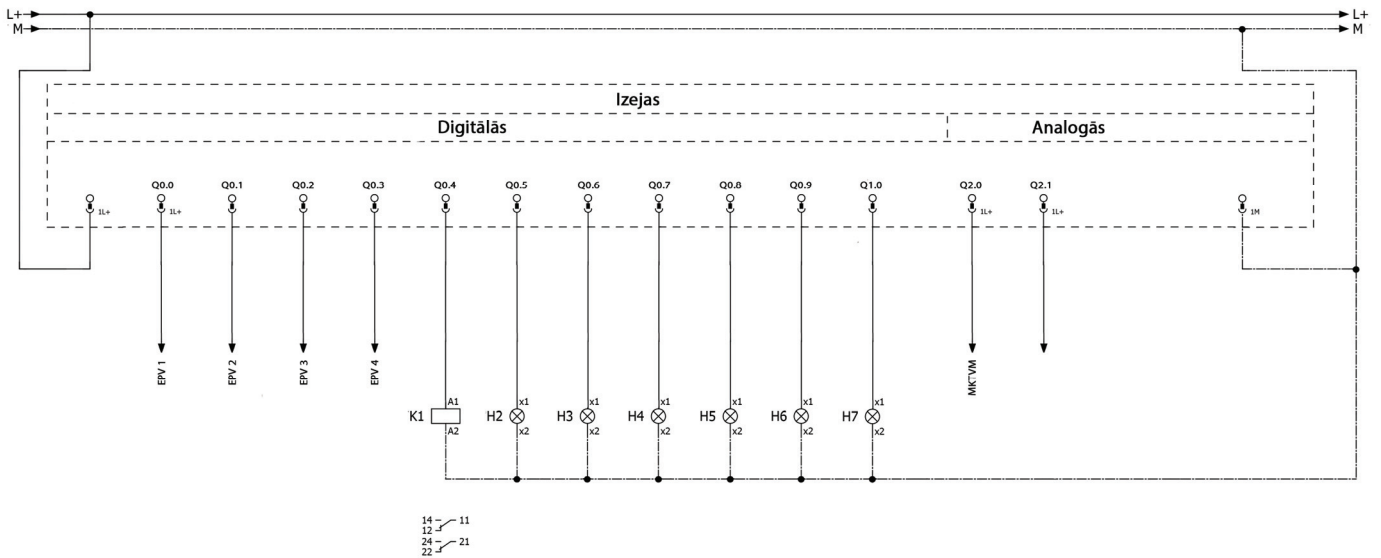
Šajā promocijas darba nodaļā autors apraksta *APBS* sistēmas elementu galvenās slēgumu shēmas, kas tika izmantotas *APBS* sistēmas iekārtu prototipu izstrādē.

Darba turpinājumā (3.8. att.) ir atspoguļota *ADIIM* ieeju pieslēguma shēma, kas attēlo *ADIIM* analogo un digitālo ieeju konfigurāciju un tām pieslēgto elementu sarakstu.



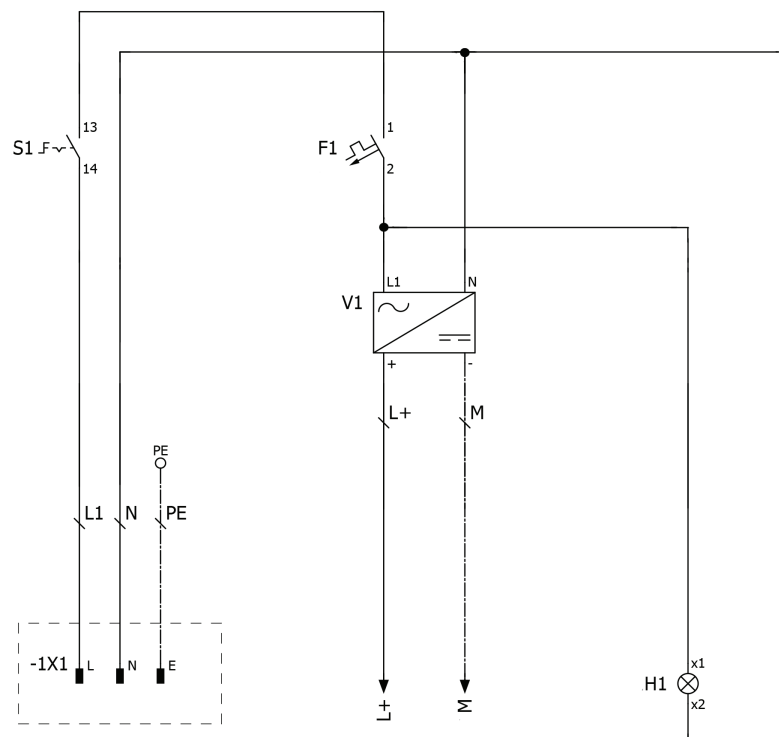
3.8. att. *ADIIM* moduļa ieeju pieslēguma shēma

Savukārt *ADIIM* izeju pieslēguma shēma ir attēlota 3.9. att. Shēma paredz vairāku elektropneimatisko vārstu, kā arī vadības releju un *APBS* sistēmas darbības indikācijas lampu pieslēgšanu.



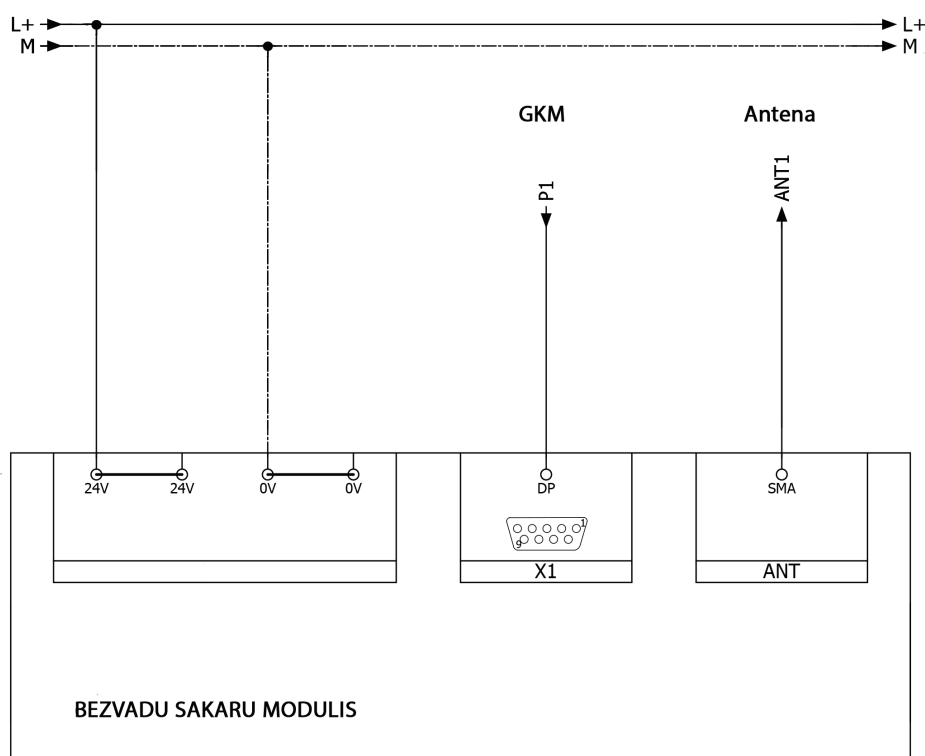
3.9. att. ADIIM moduļa izeju pieslēguma shēma

Promocijas darba turpinājumā, 3.10. att. atspoguļo *APBS* sistēmas galvenā barošanas bloka *BB* ar tā darbības indikācijas lampas pieslēguma shēmu. Laboratorijas apstākļos tiek paredzēta *BB* pieslēgšana 220 V maiņsprieguma tīklam, savukārt veicot *APBS* sistēmas prototipu testēšanu reālajos darba apstākļos iekārtu *BB* tiek pieslēgts lokomotīves akumulatoru bateriju blokam, kas nodrošina augstu enerģijas nepārtrauktības līmeni.



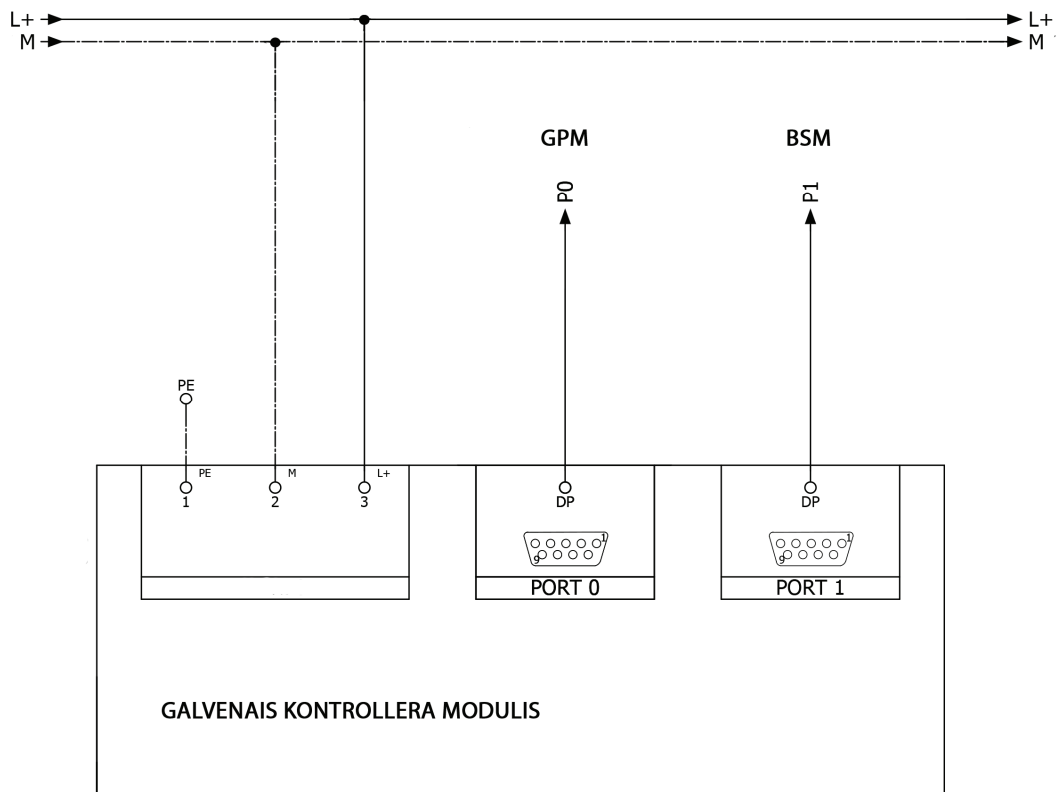
3.10. att. Barošanas bloka *BB* pieslēguma shēma

BSM pieslēgšana ir attēlota 3.11. att. Šī shēma paredz dotā moduļa pieslēgšanu *GKM*, ārējās antenas un barošanas sprieguma pieslēgšanu.



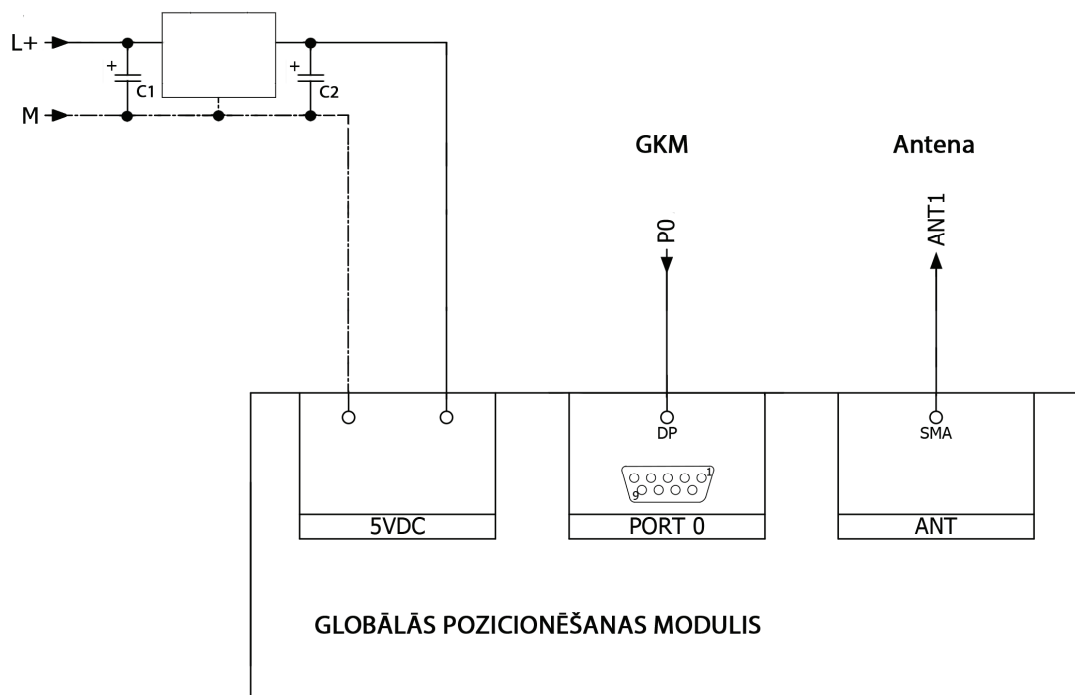
3.11. att. *BSM* moduļa pieslēguma shēma

GKM pieslēgšana ir attēlota 3.12. att. Shēma paredz dotā moduļa savienošānu ar *BSM* un *GPM* moduļiem, kā arī *GKM* darbībai nepieciešamā darba sprieguma pieslēgšanu.



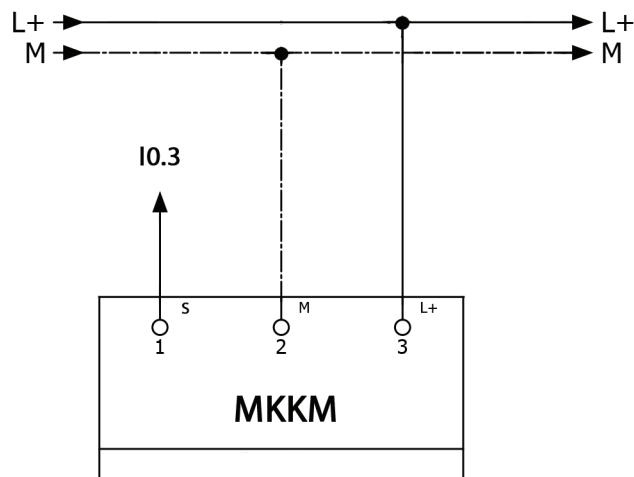
3.12. att. *GKM* moduļa pieslēguma shēma

GPM moduļa pieslēgšanas shēma (3.13. att.) līdzīgi kā *BSM* moduļa pieslēguma shēma paredz dotā moduļa savienošanu ar *GKM* un ārējo uztvērēj antenu. Savukārt barošanas ķēdē tiek paredzēta papildus sprieguma stabilizatora pieslēgšana, nepieciešamā *GPM* darba sprieguma nodrošināšanai.



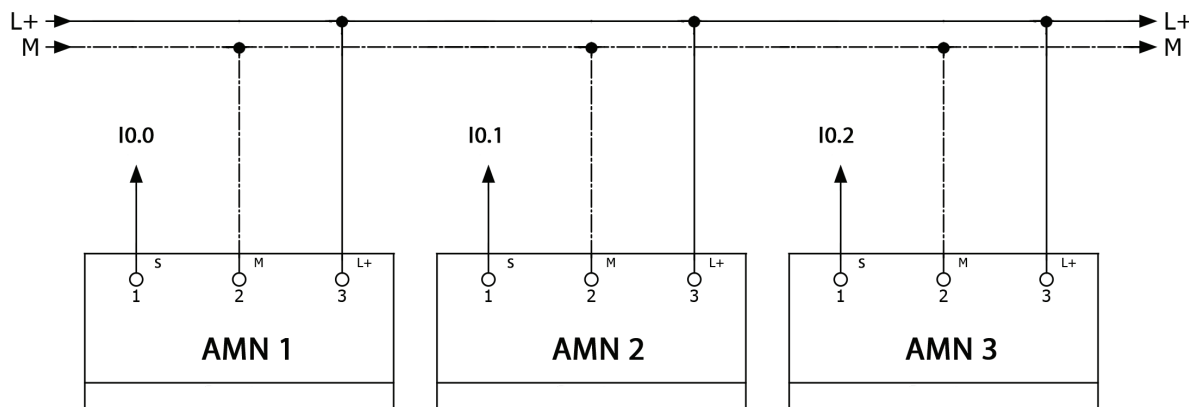
3.13. att. *GPM* moduļa pieslēguma shēma

MKKM pieslēguma shēma (3.14. att.) no vienas puses paredz barošanas ķēdes un analogās izejas pieslēgšanu, bet no otrās puses *MKKM* darba kontaktu pieslēgšanu mašīnista kontrollera elektriskai shēmai.



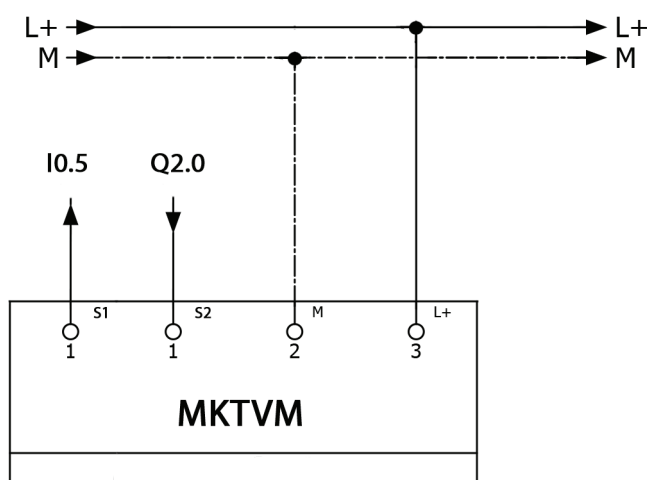
3.14. att. *MKKM* moduļa pieslēguma shēma

AMN pieslēgšanas shēma (3.15. att.) attēlo visu *APBS* sistēmas analogo manometru pieslēgšanu barošanai ķēdei un to analogo izeju savienošānu ar *IIM* analogajām ieejām. Atzīmētie analogie manometri tiek izvēlēti atbilstošajam spiedienu darba diapazonam un ar tādu izejas signāla konfigurāciju, kas atbilst *IIM* ieeju darba diapazonam.



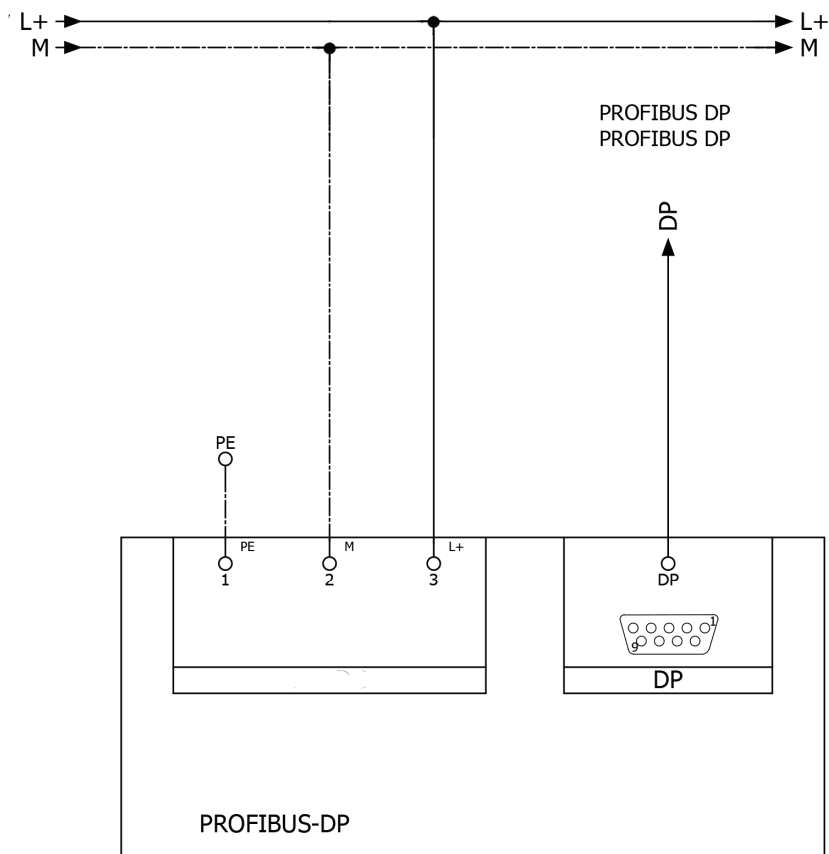
3.15. att. *AMN* pieslēgšanas shēma

Mašīnista kontrollera vadības moduļa *MKTVM* pieslēguma shēma ir attēlota 3.16. att. *MKTVM* paredz pieslēgumu pie *IIM* analogās izejas un analogās ieejas, ar mērķi nodrošināt mašīnista kontrollera darba režīmu automātisku vadību un kontroli. *MKTVM* darba kontaktu pieslēgšana notiek konkrētā mašīnista kontrollera shēmai, ar mērķi nolasīt tekoši mašīnista kontrollera darba pozīciju un pēc nepieciešamības iestatīt to 0 pozīcijā, kad ir nepieciešama vilces pārtraukšana.



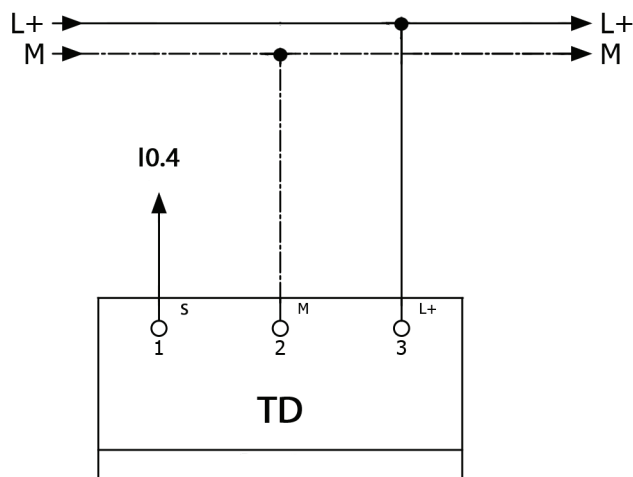
3.16. att. *MKTVM* moduļa pieslēgšanas shēma

PROFIBUS moduļa pieslēgšanas shēma ir attēlota 3.17. att. Šis modulis kalpo *GKM* savienošanai ar programmēšanas ierīci (datoru).



3.17. att. *PROFIBUS* moduļa pieslēgšanas shēma

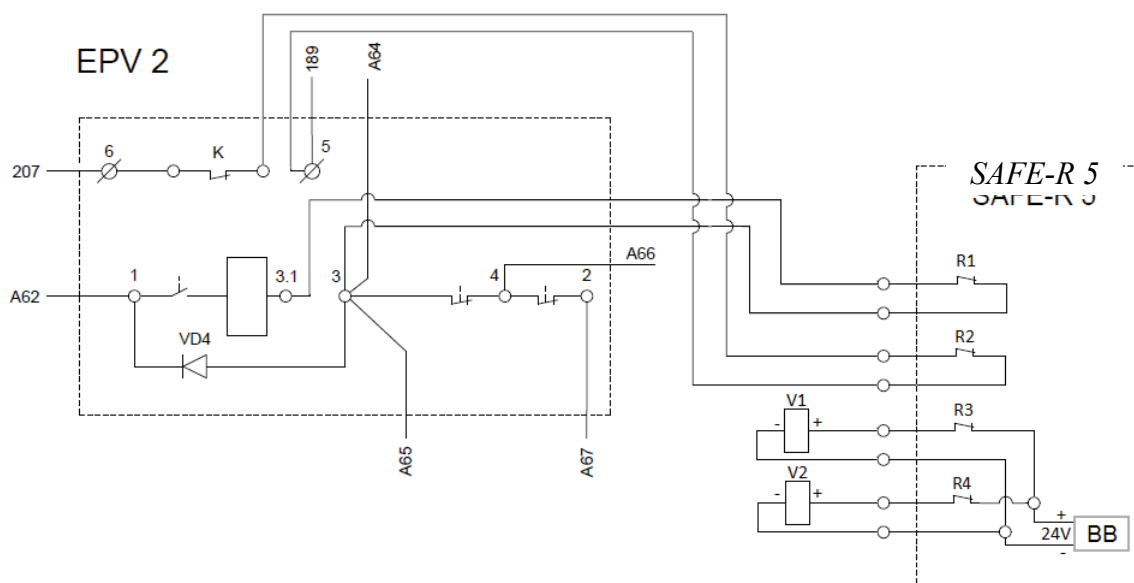
Temperatūras devēja *TD* pieslēguma shēma ir redzama 3.18. att. Temperatūras devēja sniegtā informācija paredzēta iespējamā sliežu virsmas stāvokļa izmaiņu kontrolei.



3.18. att. *TD* pieslēguma shēma

Savukārt 3.19. 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 bremsēšanas režīms, savukārt ar releja *R2* darba kontaktiem tiek pārtraukta vilces režīma barošanas ķēde.

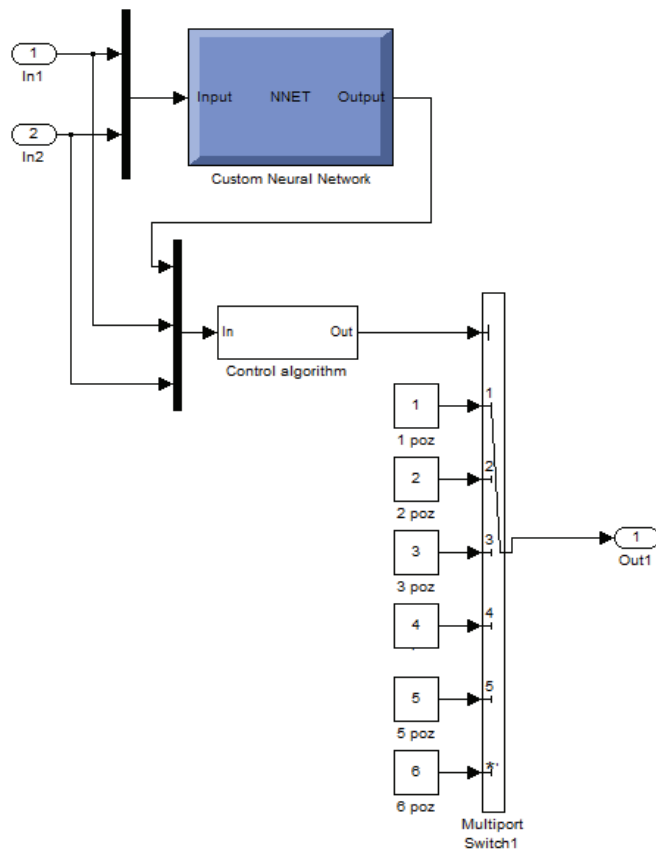


3.19. att. Lokomotīves *EPV* pieslēgšanas shēma

Tupinājumā 3.20. 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 bremsžu vadības shēmai, ar sekojošiem papildus elementiem:

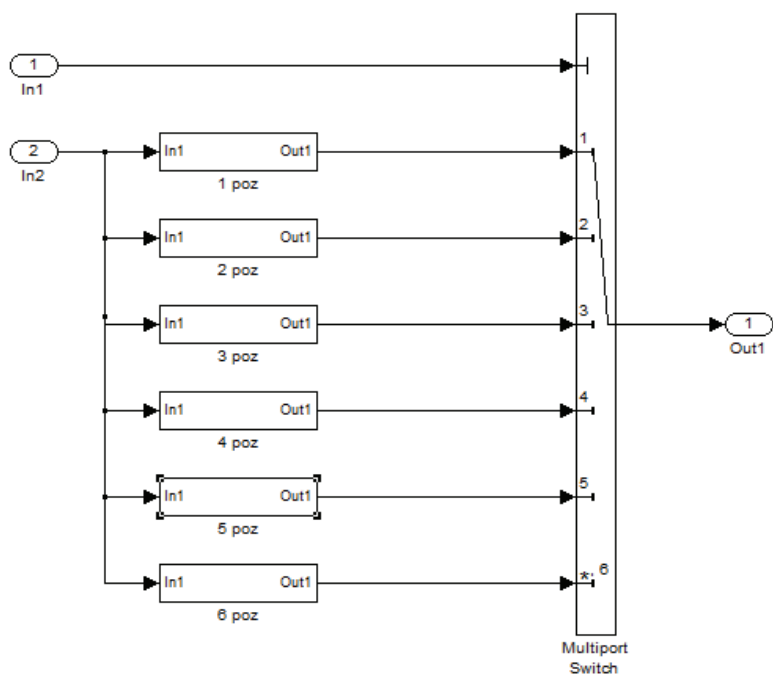
- *V1, V2* – elektropneimatiskie vārsti;
- *I8, I9* – drošības ventiļi;
- *DRV* – drošības vārsts;
- *AMN* – analogais manometrs.

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 bremsžu vadību, jo sistēmas pieslēgums tiek veikts paralēli palīgbremžu krānam *PBK*, nevis mašīnista krānam *MK*.



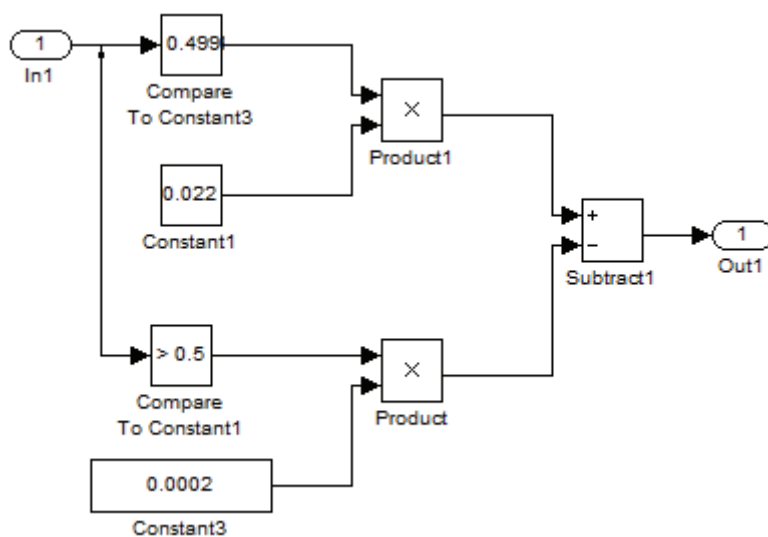
3.21. att. *APBS* sistēmas kopējais datormodelis

Kā redzams, *APBS* sistēmas kopējais datormodelis satur pašu *APBS* sistēmas darbības algoritma modeli, izvēlēto adaptīvās meklēšanas algoritmu *AMN* un mašīnista krāna *MK* datormodeli (3.26. att.), kurš ietver sevī vairākus apakšmodeļus, kas kalpo dažādu *MK* darba režīmu modelēšanai.



3.22. att. Mašīnista krāna *MK* datormodelis

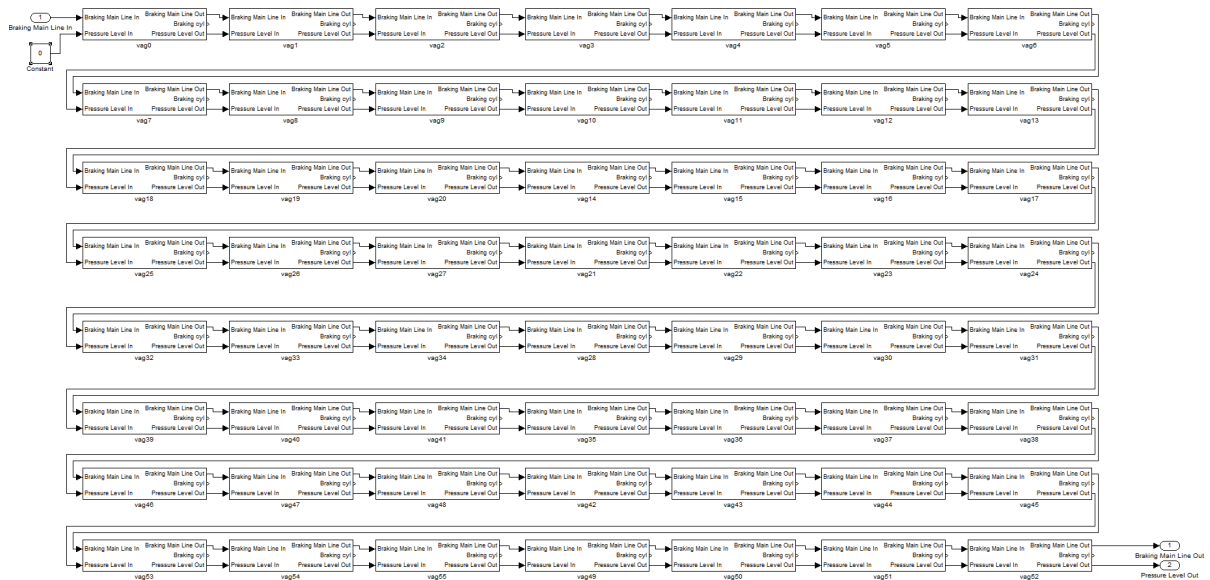
Bremžu maģistrāles *BrM* datormodelis ir attēlots 3.23. att. Modelī tiek realizēta bremžu maģistrāles *BrM* gaisa spiediena BrM_{gs} regulēšana, atbilstoši esošajai *MK* roktura pozīcijai un saspīestā gaisa noplūdes imitāciju no *BrM*.



3.23. att. Bremžu maģistrāles *BrM* datormodelis

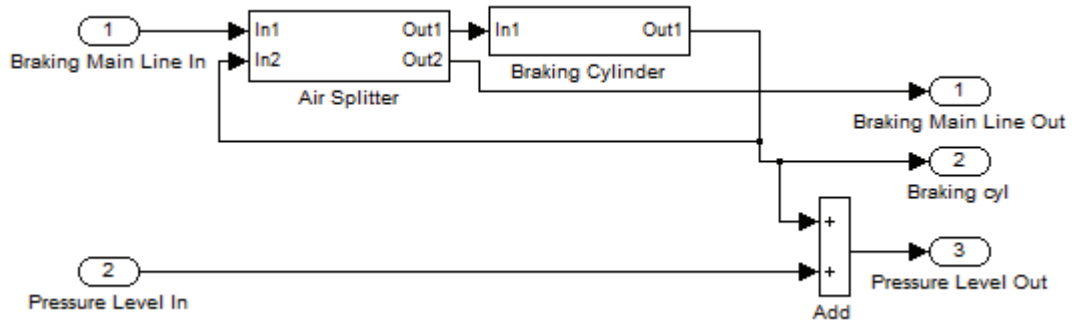
Vilciena *V* vagonu kopējais datormodelis ir attēlots 3.24. att. Konkrētajā gadījumā vilciena *V* modelis sastāv no 54 vagoniem. Esošie savienojumi starp vagoniem veido

bremžu maģistrāles savienojumus starp vagoniem un bremzēšanas spēka nodošanu no viena vagona iepriekšējam, ar mērķi iegūt kopējas bremzēšanas spēka vērtību vilcienā V .



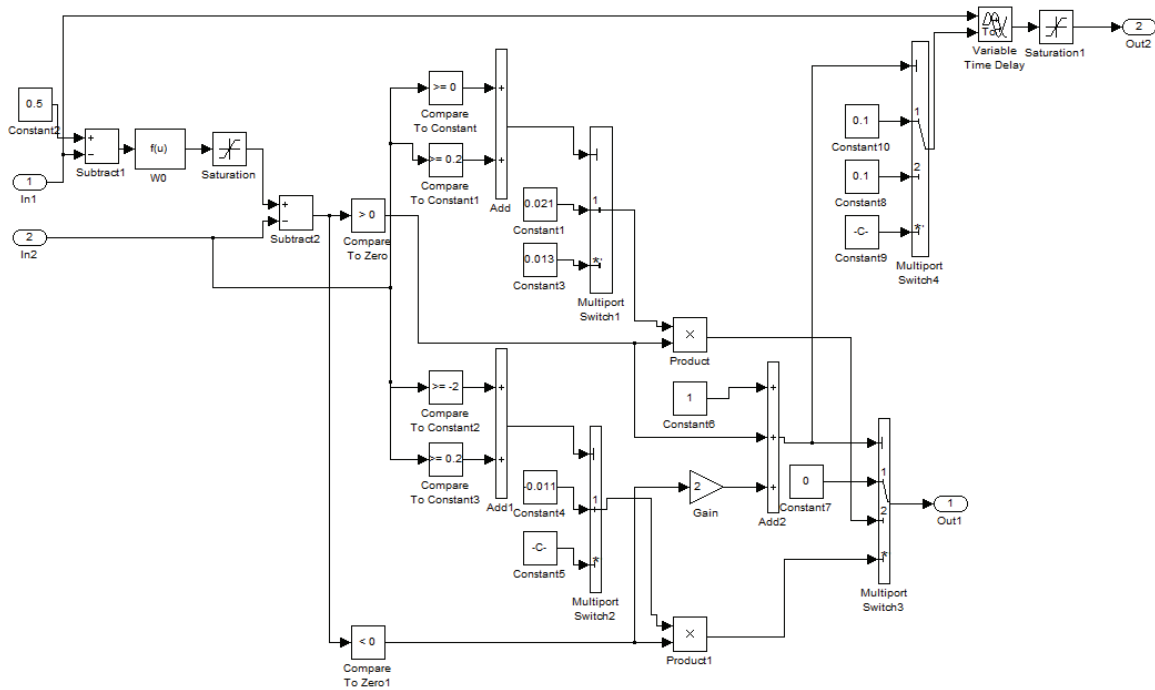
3.24. att. Vilciena V vagonu kopējais datormodelis

Vagona pneimatiskās bremžu sistēmas kopējais datormodelis ir attēlots 3.25. att. Kā redzams dotais modelis satur tādus galvenos elementus kā gaisdaļis GS un bremžu cilindru BC modeļi.



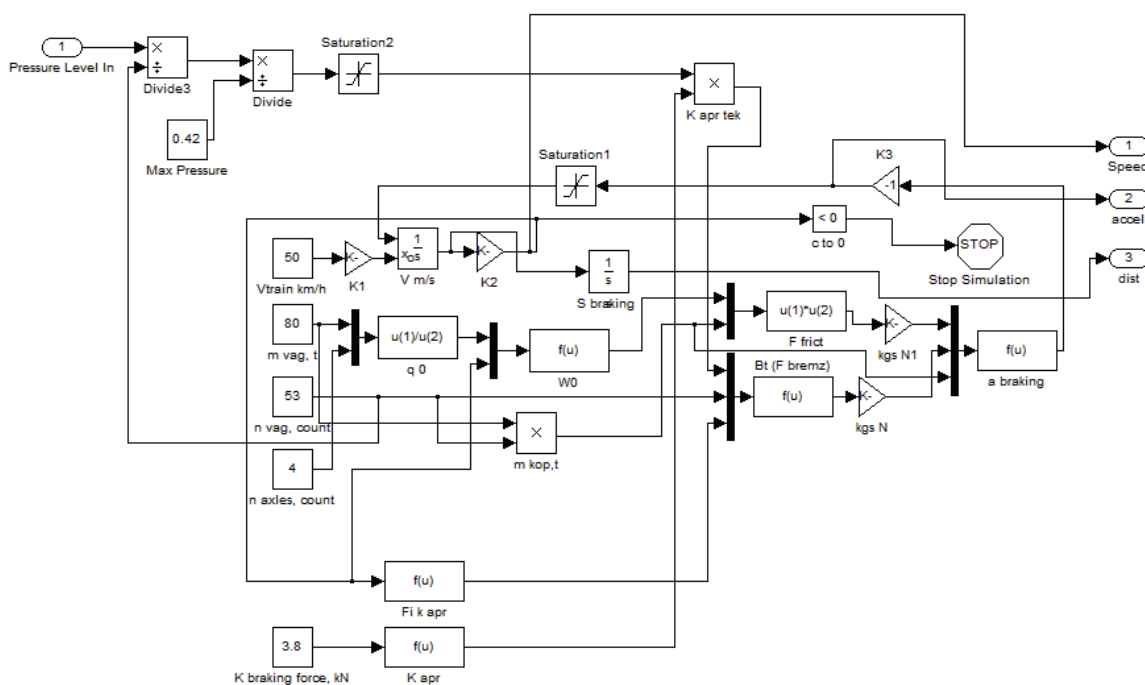
3.25. att. Vagona pneimatiskās bremžu sistēmas kopējais datormodelis

Vagona gaisdaļa datormodelis ir attēlots 3.26. att. Atbilstoši BM_{gs} vērtībai un izmaiņas ātrumam tiek regulēts gaisa spiediens bremžu cilindros BC .



3.26. att. Vagona gaisdaļa datormodelis

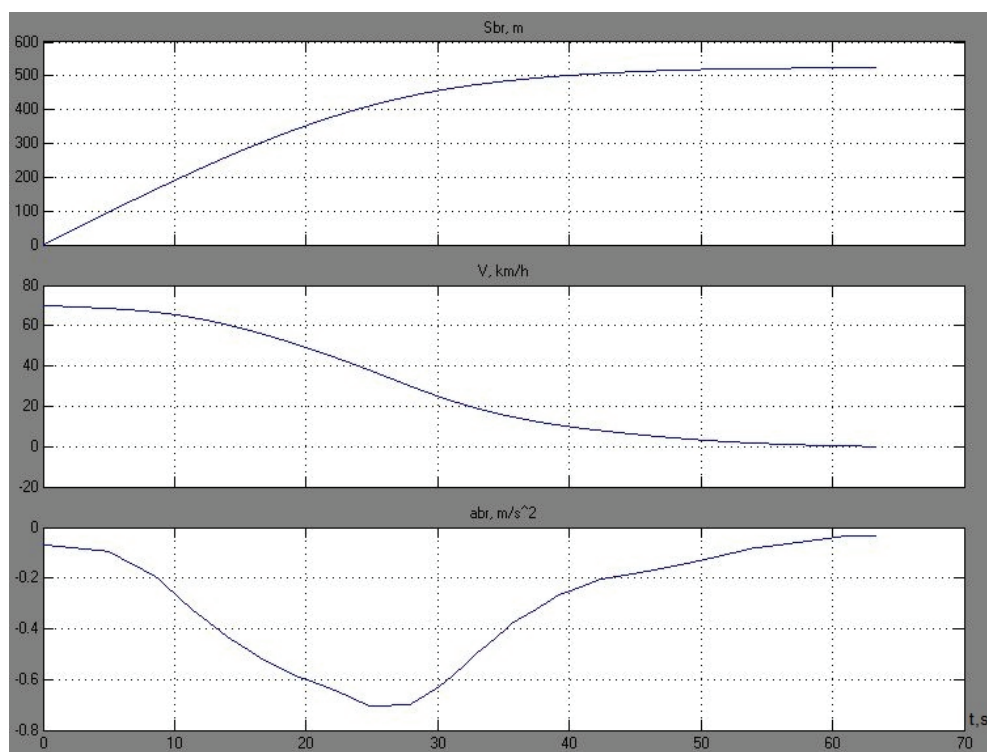
Vilciena kustības datormodelis *VKM* ir attēlots 3.27. att. Šeit atbilstoši aprēķinātajām kopējam ritošā sastāva bremsēšanas spēkam, rītes berzes spēkiem un vilciena fiziskajiem parametriem tiek modelēta vilciena kustība.



3.27. att. Vilciena kustības datormodelis

Modelis paredz divu dienesta bremsēšanas režīmu realizēšanu: bremsēšanas režīms un bremžu atlaišanas režīms. Par šiem režīmiem atbild funkcijas „Bremz funk” un „Atlaisan funk”.

Redzami grafiskie modelēšanas rezultāti atspoguļo gadījumu, kad vilciens ar 25 80 t smagiem vagoniem bremzē no ātruma 70 km/h, un 25. sekundē atlaž bremzes. Kopējais bremsēšanas ceļš šajā gadījumā ir 523 m, bet bremsēšanas laiks 63 s.



3.28. att. Modelēšanas grafiskie rezultāti

Secinājumi par trešo nodaļu

- 1) Veiktā mikroprocesoru tehnikas izmantošanas prasību analīze ļauj izveidot *APBS* sistēmas iekārtu prototipus, kas atbilst dzelzceļa normām, kas tiek izvirzītas mikroprocesoru tehnikas izmantošanai.
- 2) Ir izstrādātas principiālās elektriskās un mehānisko *APBS* sistēmas elementu pieslēguma shēmas, kuras tiek izmantotas praktiskajos eksperimentos.
- 3) Aprakstīts izstrādātais vilciena kustības datormodelis, kurš tiek izmantots *APBS* sistēmas *VKM* lomā.

4. PIEDĀVĀJAMĀS *APBS* SISTĒMAS IEKĀRTU PROTOTIPU UN TĀS VADĪBAS ALGORITMU EKSPERIMENTĀLĀ TESTĒŠANA

Situācijas raksturojums

Pēc kopējā *APBS* sistēmas darbības algoritma sastādīšanas, atsevišķo meklēšanas algoritmu izvēles un *APBS* sistēmas iekārtu prototipu shēmu izstrādes tiek veikta to testēšana. Piedāvājamās sistēmas atsevišķo elementu un funkciju testēšanas notiek gan laboratorijas apstākļos praktisko un datoreksperimentu veidā, gan arī vairākos eksperimentos reālajos darba apstākļos.

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 kļuču vidējais faktiskais spiedspēks, kN;
- V_{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_{vilciena}	20	40	60	80	100				

Ar dzelteni 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.

Pārslasīšanai izvēlētā 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 $m_{\text{vag_fakt}}, n_{\text{vag_fakt}}, k_{k_fakt}, V_{\text{vilciena}}$ – dotās vilcienu fizisko parametru vērtības;
- S_{br_fakt} – aprēķinātais faktiskais vilcienu bremzēšanas ceļš atbilstoši izvēlētajiem vilcienu fiziskajiem parametriem.

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

- Lielumi $m_{\text{vag_mod}}, n_{\text{vag_mod}}, k_{k_mod}, V_{\text{vilciena}}$ – vilcienu fizisko parametru modelētās vērtības;
- S_{br_mod} – modelētais vilcienu bremzēšanas ceļš atbilstoši modelētajiem vilcienu fiziskajiem parametriem;
- Iterāciju skaits – mērķa funkcijas aprēķinu skaits, testējamā algoritma ātrdarbības novērtēšanai;
- Kļūda – vidējā kvadrātiskā kļūda starp praktisko un noteikto vilcienu 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 (4.1. 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;
- n_{vag} – praktiskais vagonu skaits, kas tiek pieņemts konkrētajā eksperimentā;
- m_{vag} – praktiskā vagonu masa, kas tiek pieņemta konkrētajā eksperimentā;
- k_{br} – praktiskais bremžu kluču spiedspēks;
- v_{kmh} – 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

4.1. 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

4.2. att. Eksperimentu datu tabulas fagments

Otrā tabula (4.3. att.) satur katra konkrētā eksperimenta modelēšanas rezultātus, kas attēlo sekojošus vilciena bremzēšanas parametrus:

- exp – eksperimenta kārtas skaitļa numurs;
- s_{br} – aprēķinātais praktiskais bremzēšanas ceļš;
- t_{sag} – 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

4.3. 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

4.4. att. Modelēšanas datu tabulas fragments

Trešā tabula (4.5. 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;
- v_{kmh} – 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

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

exp	dt	acc	vkmh	sp
176	0	0	20	0
176	1	0.00924	19.966736	5.54631555555556
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

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

Ceturtnā tabula (4.7. 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;
- *s_{teor}* – noteiktais bremzēšanas ceļš;
- *n_{vag}* – noteiktais vagonu skaits;
- *m_{vag}* – noteiktā vagona masa;
- *k_{br}* – noteiktais bremžu kļuču 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 bremzēšanas 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

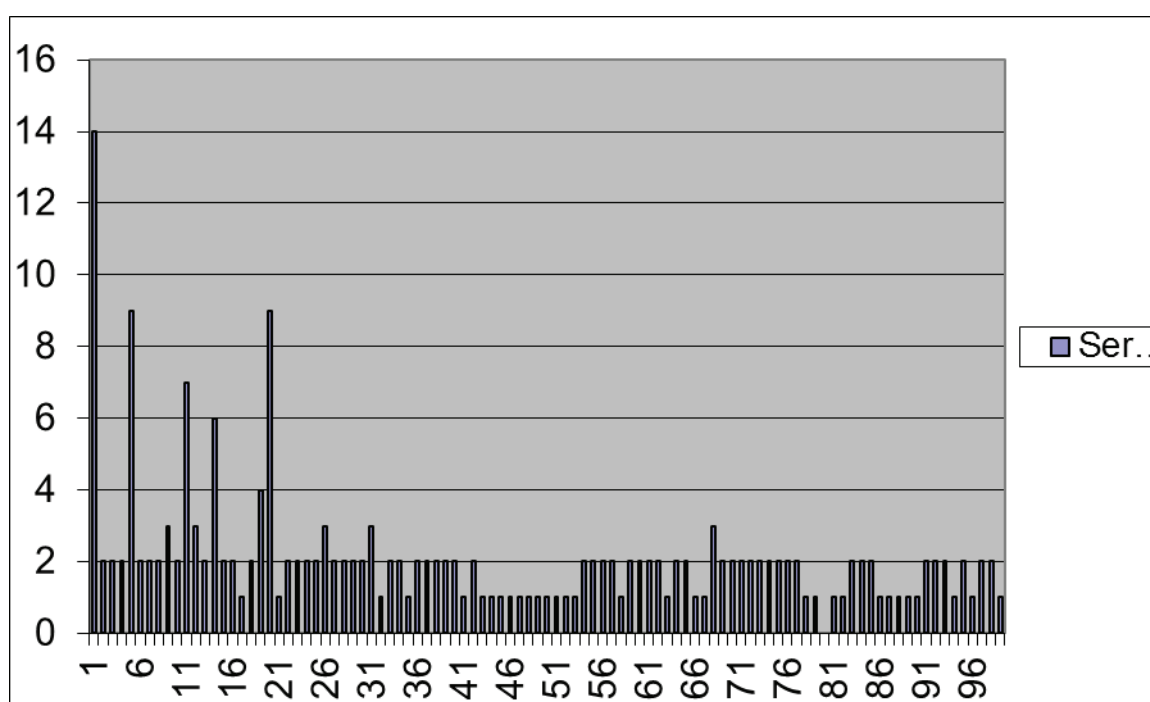
4.7. att. Rezultātu datu tabulas struktūra

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

4.8. att. Rezultātu datu tabulas fragments

Veicot *APBS* sistēmas testēšanu laboratorijas apstākļos, papildus tika veikta arī *GSM* sakaru kanāla darba stabilitātes testēšana, ar mērķi novērtēt tā atbilstību izmantošanai *APBS* sistēmā.

Šim nolūkam divos iekārtu prototipos (*SAFE-R 5* un *SAFE-R 6*) *GKM* modulī tika ielādētas vadības programmas, kas paredz datu kopu sūtīšanu no viena iekārtas prototipa uz otru. Viena vadības programma paredz datu bāzes izveidošanu, kurā tiek fiksēts konkrētās datu paketes nosūtīšanas laiks, savukārt otrā vadības programma paredz šo datu pakešu saņemšanas laika fiksēšanu. Abu iegūto datu bāzu apstrāde ļauj grafiski atspoguļot vidējo vienas datu paketes sūtīšanas laiku (4.9. att.).



4.9. att. *GPRS* signāla kvalitātes testēšana laboratorijas apstākļos

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 *ADMI*.

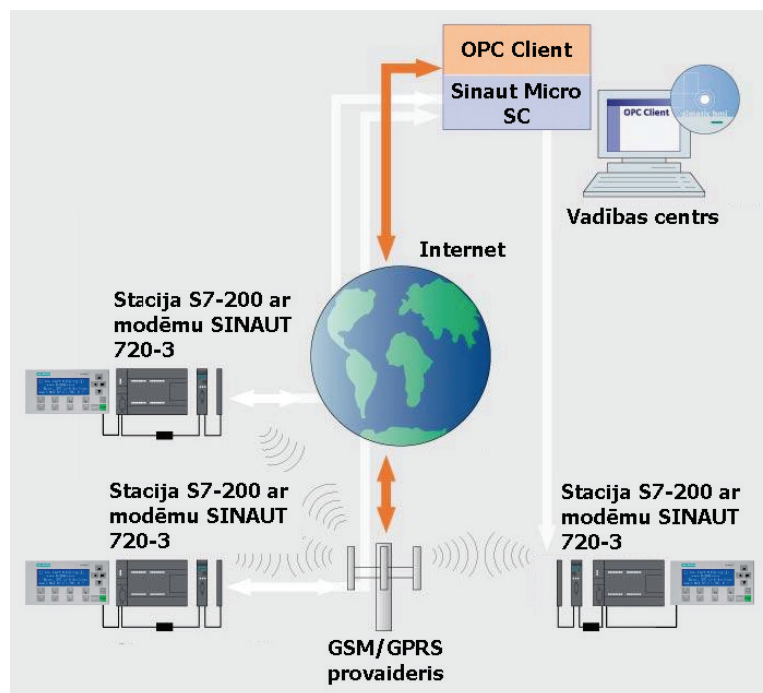
Šajos eksperimentos tiek izmantoti iekārtu *SAFE – R5*, *SAFE – R6* un *SAFE – R7* prototipi, kuru nosaukumi ir radušies vēsturiski no iepriekšējiem *RTU* zinātnieku pētījumiem, taču funkcijas katrā no iekārtu sērijām (ko apzīmē cipars iekārtas prototipa nosaukumā) tiek ievērojami mainītas un papildinātas (iekārtu prototipu agrāko versiju izstrādes un funkcionēšanas nosacījumi plaši aprakstīti literatūrā [122, 114, 177, 178, 181]).

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

Bezvadu sakari starp iekārtām tika nodrošināti, izmantojot *GSM (Global System for Mobile Communication – globālā telefonu sakaru sistēma)* tīklu. Visi kontrolleri šajā gadījumā izpilda vienotā tīkla iekārtu lomu.

Programma *Sinaut Micro SC* satur objektu procesu vadības *OPC* serveri ar speciālām komunikācijas funkcijām, kuras ļauj uzturēt bezvadu sakarus ar attālinātiem kontrolleriem *S7-200* (4.10. att.). Katrs no šiem kontrolleriem tiek komplektēts ar modemu *MD720-3*. Šo savienojumu apkalpošanai tiek izmantots *GPRS* serviss (*General Packet Radio Service – radio servisa pamat pakete*) *GSM* tīklā.

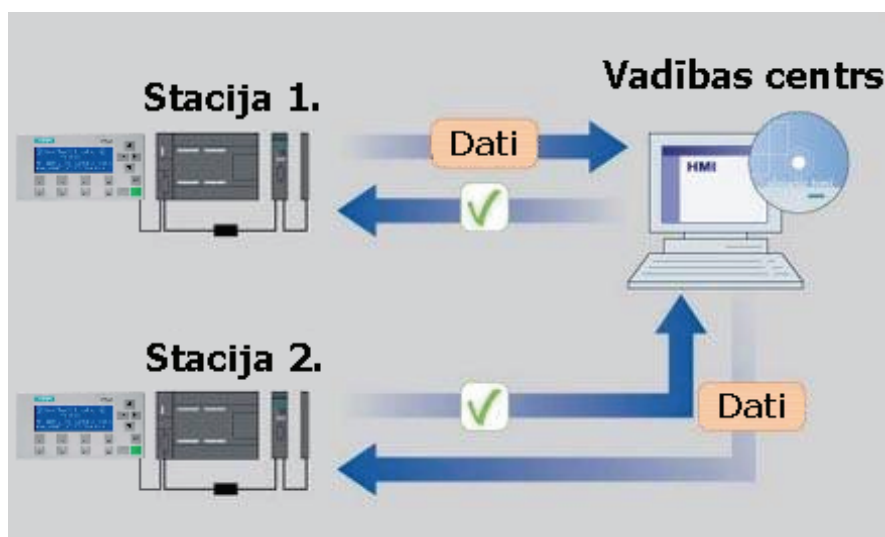
OPC (burts *O* prezentē terminu *OLE – Object Linking and Embedding – standarts procesu vadībai*) ir rūpniecisks standarts, kas nosaka komunikāciju starp dažādiem automatizācijas iekārtas komplektiem, piemēram, starp *HMI/SCADA* (*HMI* nozīmē *Human machine interface – interfeiss cilvēks-mašīna*, *SCADA* nozīmē *Supervisory Control And Data Acquisition – dispečer vadība un datu vākšana*) sistēmu un *PLC* (programmējamā loģiskā kontrolera) sistēmu. Šis standarts balstīts uz klienta/servera koncepciju, tas nozīmē, ka klients pieprasa datus no servera, kas tos uztur.



4.10. att. Datu apmaiņas struktūra izmantojot *Sinaut Micro SC*

Datoram, kurā tiek uzstādīta *Sinaut Micro SC* programma, ir jābūt pastāvīgi pieejama *GPRS* tīklam. Šim nolūkam dators tiek pieslēgts *GPRS* tīklam caur speciāli izdalītu sakaru līniju vai arī tas ir pastāvīgi pieslēgts pie interneta, izmantojot *DSL (Digital Subscriber Line – ciparu abonenta līnija)*.

Divvirziena bezvadu sakaru nodrošināšana starp kustīgiem un nekustīgiem dzelzceļa transporta objektiem kalpo datu masīvu pārsūtīšanas nodrošināšanai starp diviem attālinātiem objektiem. Šajā gadījumā, piemēram, stacija 1 ir lokomotīve, bet stacija 2 ir luksofors (4.11. att.).



4.11. att. Datu apmaiņas piemēra struktūra starp divām stacijām

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.



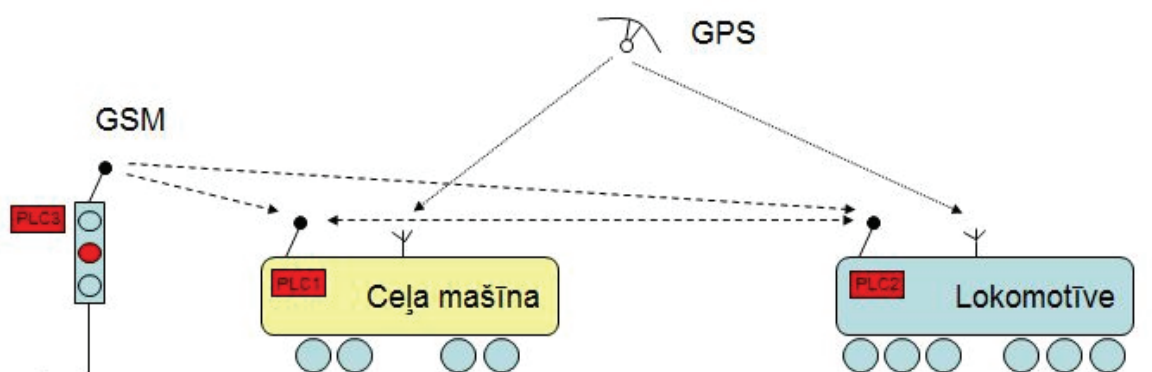
4.12. att. *SAFE-R 5* iekārtas prototipa pneimatiskās daļas pieslēgums lokomotīvē *M62*

Eksperiments reālajos darba apstākļos nr. 1.

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

Atbilstoši demonstratoru testēšanas programmai [206], eksperimentā nr. 1 tiek izmantoti iekāru *SAFE – R5*, *SAFE – R6* un *SAFE – R7* prototipi. Tie attiecīgi pilda 4.13. 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 izliedošā 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” izliedošā 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 atrašanas vietu telpā, izmantojot *GPS* u. c. funkcijas.



4.13. 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 [206]), bet darba gatavība pēc pieslēgšanas procesa pabeigšanas tiek pārbaudīta pēc testēšanas programmas instrukcijas punkta 4.1.

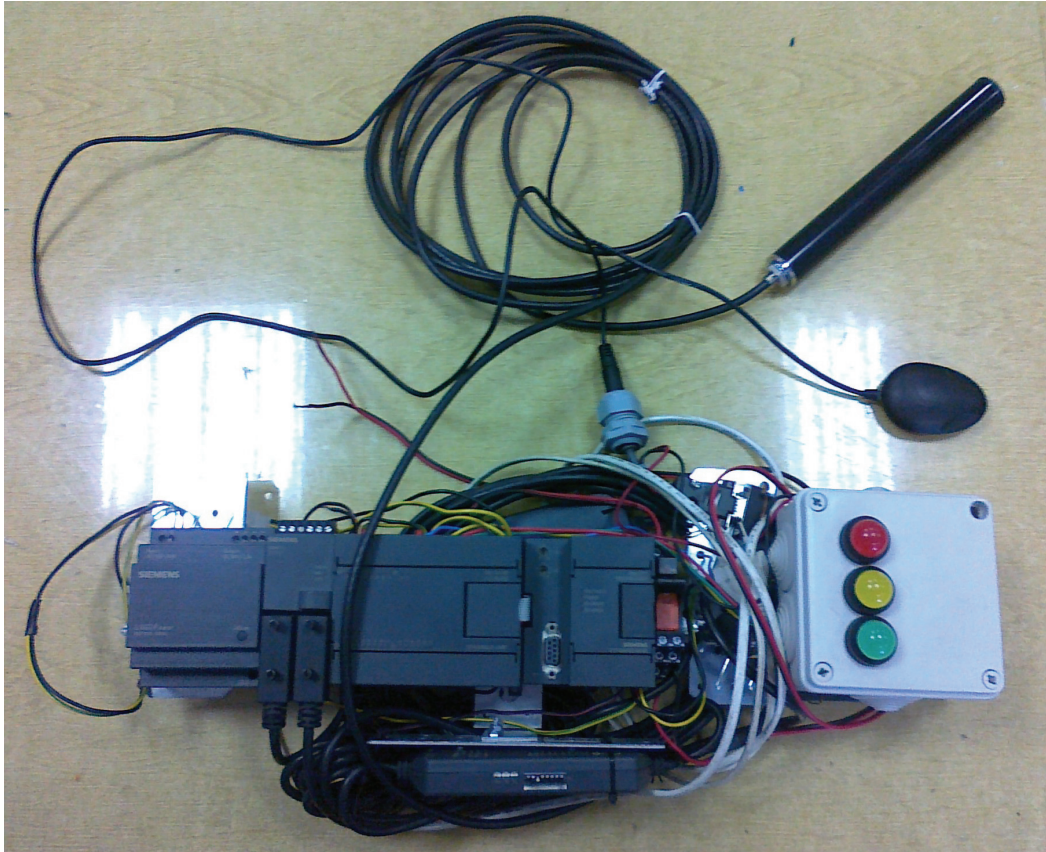
Iekārtas *SAFE – R6* prototipa elektrobarošanas pieslēgums ceļa mašīnā notiek izmantojot shēmu (skat. pielikumu nr. 4.). Šajā gadījumā netiek izmantoti jeb kāda veida pārveidotāji, jo ir iespējams veikt pieslēgumu ceļa mašīnas borta spriegumam, kura vērtība ir 24V DC. Iekārtas *SAFE – R6* prototipa vadības 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 *II.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.

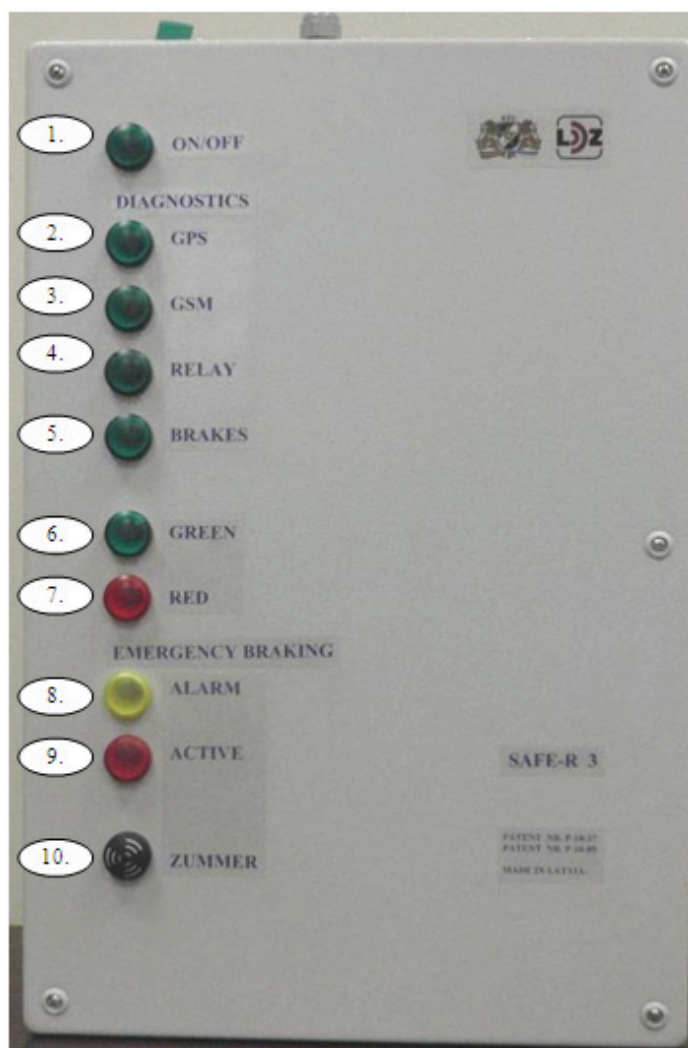
Pēc iekārtu prototipu uzstādīšanas un to pareizas funkcionēšanas pārbaudes, lokomotīve izbrauc no stacijas „*Bolderāja*” un attālinās no tās ieejas luksofora uz uzdoto attālumu (skat. rezultātu tab. nr. 1.). To pašu veic arī ceļa mašīna. Kad abas kustīgās vienības atrodas eksperimenta uzsākšanas sākumpozīcijā, 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. 4.15. 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 lampa nr. 3.), kura gaitā ceļa mašīna tiek apstādināta uzdotajā punktā.



4.14. 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. 4.15. 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 bremsēšanas process (iedegas lampa nr. 9.), kura gaitā lokomotīve tiek apstādināta uzdotajā punktā.



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

Testēšanas rezultāti un piezīmes ir redzami tabulā nr. 3.

Eksperimenta nr. 1. rezultāti

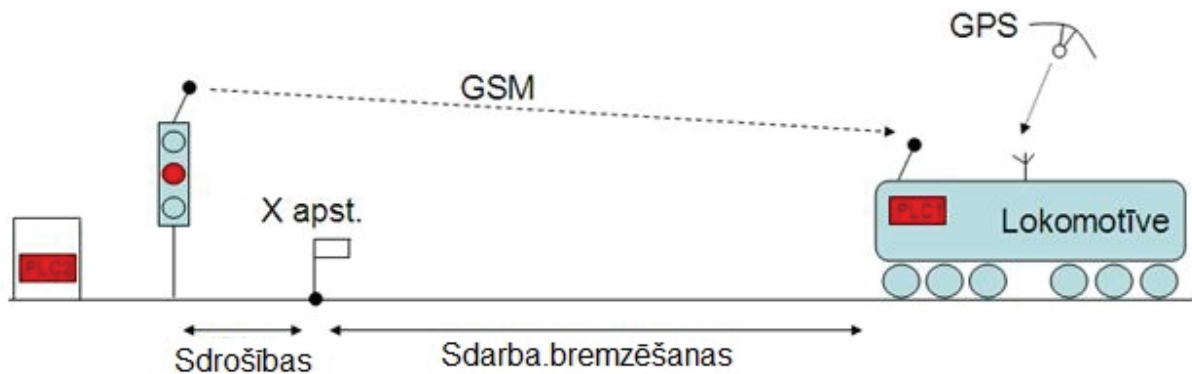
Lokomotīves sākotnējais attālums no luksofora, m	Ceļa mašīnas sākotnējais attālums no luksofora, m	Ceļa mašīnas kustības ātrums, km/h	Lokomotīves kustības ātrums, km/h	Attālums starp stacijas ieejas luksoforu un ceļa mašīnu pēc tās pilnīgas apstāšanās, m	Attālums starp ceļa mašīnu un lokomotīvi pēc tās pilnīgas apstāšanās, 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 (samazināts līdz 23)		89	uzbraukšana uz lokomotīvi
			28		103	uzbraukšana uz lokomotīvi
			26		96	uzbraukšana uz lokomotīvi

Siemens firmas divsimtās sērijas *PLC* vadības programmas izstrādes, ielādes un vadības procesu autors sīki apraksta literatūrā [154].

Eksperiments reālajos darba apstākļos nr. 2.

Atbilstoši demonstratoru testēšanas programmai, otrajā eksperimentā arī tiek izmantoti iekārtu *SAFE – R5* un *SAFE – R7* prototipi. Tie attiecīgi pilda 4.16. att. redzamo bloku *PLC1* un *PLC2* lomu. Eksperimenta norises laikā tiek pārbaudīts, vai minētie iekārtu prototipi, mijiedarbojoties savā starpā, spēj izpildīt sekojošas galvenās funkcijas:

- Iekārtas *SAFE – R5* prototips, izmantojot *APBS* sistēmu un tās galveno darbības algoritmu, spēj laideni un precīzi apstādināt lokomotīvi uzdotajā punktā, kas tiek uzdots nepieciešamajā attālumā no stacijas „*Bolderāja*” ieejas luksofora;
- Iekārtas *SAFE – R7* prototips spēj nosūtīt informāciju par ieejas luksofora degošo gaismas signālu iekārtai *SAFE – R5*;
- Iekārtas *SAFE – R5* prototipā ir iespējama *APBS* sistēmas darbības parametru ievade un izvade, izmantojot teksta displeju *TD400C*.



4.16. att. Eksperimenta nr. 2. principiālā norises shēma

Iekārtas *SAFE – R5* prototipa barošanas pieslēgums lokomotīvē notiek līdzīgi kā eksperimentā nr. 1. Arī iekārtas *SAFE – R5* prototipa vadības releja pieslēgums lokomotīves *EPV* vadības shēmai notiek, izmantojot eksperimenta nr. 1. aprakstā izmantoto shēmu. Savukārt lokomotīves pneimatisko bremžu vadības sistēma tiek pieslēgta izmantojot shēmu, kas ir redzama 3.20. att. Iekārtas *SAFE – R5* prototipa pieslēgšana lokomotīvē notiek pēc testēšanas programmas instrukcijas punkta 3.1., bet darba gatavība pēc pieslēgšanas procesa pabeigšanas tiek pārbaudīta pēc testēšanas programmas instrukcijas punkta 4.1.

Iekārtas *SAFE – R7* prototipa pieslēgšana releju skapī *ESD* nr. 2. notiek līdzīgi kā eksperimentā nr. 1. 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

Lokomotīve izbrauc no stacijas „*Bolderāja*” un attālinās no tās ieejas luksofora uz uzdoto attālumu (skat. rezultātu tab. nr. 2.). Kad uzdotais punkts ir sasniegts sākas iekārtu *SAFE – R5* un *SAFE – R7* prototipu eksperimentālā testēšana. Lokomotīvei tuvojoties

stacijas ieejas luksoforam ar degošo aizliedzošo gaismas signālu tiek sasniegts kritiskais punkts, kad būtu jāuzsāk laidena lokomotīves bremsēšana. Šajā momenta iekārtas *SAFE – R5* prototips, izmantojot *PLC* izeju *Q1.0* un tai pieslēgto releju *R1* (skat. pielikumu nr. 11.), pārtrauc lokomotīves elektrodzinēju vilces režīmu. Izmantojot *PLC* izejas *Q0.6* un *Q0.7* (un tiem atbilstoši pieslēgtos relejus *R3* un *R4*), iekārta *SAFE – R5* sāk vadīt elektropneimatiskos vārstus *EPV1* un *EPV2*, regulējot gaisa spiedienu bremsu sistēmas maģistrālē tādā veidā, lai atbilstoši lokomotīves bremsu sistēmas ekspluatācijas noteikumiem tiktu izpildīta viena bremsēšanas pakāpe (spiediens lokomotīves bremsu cilindros ir vienāds ar 1 MPa) vai nu notiktu bremsu atlaišana (saspiestā gaisa izlaišana no bremsu cilindriem atmosfērā). Gaisa spiediena vērtības kontrole bremsu cilindros notiek, izmantojot analogo manometru *AMN*.

Izmantojot iekārtas *SAFE – R5* prototipa teksta displeju *TD400C*, ir iespējams ievadīt sekojošus laidenas un precīzas (pēc apstāšanās punkta) lokomotīves pneimatisko bremsu vadības sistēmas funkcionēšanas parametrus:

- Teorētiskais lokomotīves bremsēšanas paātrinājums bremsējot, $a_{\text{bremzēšanas}}$ (m/s^2);
- Maksimālais gaisa spiediens bremsu cilindros, izpildot vienu bremsēšanas pakāpi, P_{max} (MPa);
- Maksimālais lokomotīves kustības ātrums, pārsniedzot kuru tiek izpildīta viena bremsēšanas pakāpe neatslēdzot vilci, $V_{\text{vilciena_max}}$ (km/h);
- Speciāls *APBS* sistēmas inerces koeficients, Δt (m/s);
- Iecerētā apstāšanās punkta koordinātes ievade (ir realizēta gan manuālā ievade, gan esošās lokomotīves koordinātas atcerēšanās funkcija nospiežot teksta displeja *TD400C* pogu *F7*);
- Manuālā *APBS* sistēmas kontrole, izmantojot teksta displeja *TD400C* pogu *F8* (nospiežot pogu tiek izpildīta viena bremsēšanas pakāpe, nospiežot pogu *F8* atkārtoti, notiek saspiestā gaisa izlaišana no bremsu cilindriem atmosfērā).

Gadījumā, ja šāda lokomotīves bremsēšana nav pietiekami efektīva, tiek iedarbināta lokomotīves avārijas bremsēšana (tiek padots vadības signāls no *PLC* izejas *Q0.0* uz releju *R2*), un tā apstājas uzdotajā punktā pēc pirmā eksperimenta scenārija.

Testēšanas rezultāti ir redzami tabulā nr. 2.

Eksperimenta nr. 2. rezultāti

Lokomotīves sākotnējais attālums no luksofora, m	Lokomotīves kustības ātrums, km/h	Attālums starp uzdoto apstāšanās punktu un lokomotīvi pēc tās apstāšanās, m	Piezīmes
300	15	26	Līdz stacijas "Bolderāja" ieejas luksoforam $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
300	10	45	Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
300	10	43	Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
500	20	3	Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
500	20	14	Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
600	30	Nenostrādāja	Netika ievadīta apstāšanās punkta koordināte Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
600	30	16	Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
800	40	480	Nenotika bremžu atlaišana Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
400	20	3	Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
400	20	160	Bremžu atlaišana notika lēni Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
300	15	3	Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$
400	20	9	Līdz koordinātei 57,01222 24,04922 $a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$

Eksperiments reālajos darba apstākļos nr. 3.

Pēc dažu iekārtas *SAFE – R5* prototipa vadības programmas labojumu veikšanas, 28.02.2013. tika atkārtots 27.02.2013 datuma eksperiments nr. 2. Atkārtotā eksperimenta norises laikā tiek izmatoti tie paši iekārtu *SAFE – R5* un *SAFE – R7* prototipu pieslēgumi, kas tika izmantoti iepriekšējās dienas eksperimentā nr. 2. Arī pats eksperiments notika tieši pēc tāda pašā plāna, kā eksperiments nr. 2. 27.02.2013.

Eksperimenta rezultāti ir atspoguļoti tabulā nr. 3.

5. tabula

28.02.2013. eksperimenta nr. 1. rezultāti

Lokomotīves sākotnējais attālums no luksofora, m	Lokomotīves kustības ātrums, km/h	Attālums starp uzdoto apstāšanās punktu un lokomotīvi pēc tās apstāšanās, m	Piezīmes
160	10	12	$a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$, $\text{delta} l = 0,2 \text{ m/s}$
155	10	22	$a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$, $\text{delta} l = 0,2 \text{ m/s}$
560	40	2	$a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$, $\text{delta} l = 0,2 \text{ m/s}$
953	25	5	$a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$, $\text{delta} l = 0,2 \text{ m/s}$
945	54	2,5	$a = -0,08 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$, $\text{delta} l = 0,2 \text{ m/s}$
1800	55	-10	$a = -0,21 \text{ m/s}^2$, $P = 0,9 \text{ kg/cm}^3$, $\text{delta} l = 0,2 \text{ m/s}$
440	35	4	$a = -0,23 \text{ m/s}^2$, $P = 1,5 \text{ kg/cm}^3$, $\text{delta} l = 0,3 \text{ m/s}$

Secinājumi par ceturto nodaļu

- 1) Izejot no pastāvošajiem datortehnikas veiktspējas ierobežojumiem, ir iegūti testēšanas rezultāti par 2., 3. un 4. adaptīvo meklēšanas algoritmu.
- 2) Pēc vairākiem mēģinājumiem, ģenētiskais algoritms nepierādīja savu efektivitāti, salīdzinot iepriekšējā punktā minētajiem algoritmiem un metodēm.

- 3) Veikto datoreksperimentu laikā iegūtās tabulas ļaus veikt to statistisko analīzi un pārbaudīt izteiktās hipotēzes.
- 4) *APBS* sistēmas iekārtas *SAFE – R5* prototips var strādāt lokomotīvē un nekādā veidā neiespaido eksistējošo lokomotīves pneimatiskās bremžu vadības sistēmas normālu darbību jebkurā tās darba režīmā.
- 5) *APBS* sistēma spēj nodrošināt automātisku lokomotīves apturēšanu, izmantojot dienesta bremzēšanas darba režīmu.
- 6) *APBS* sistēma spēj noteikt lokomotīves kustības virzienu (kustība notiek uz iecerēto apstāšanās punktu vai no tā).
- 7) Testa braucienos 27.02.2013, kad lokomotīve apstājās pirms stacijas ieejas luksofora attālumā, kas ir lielāks par 30 m, ir izskaidrojams ar to, ka vadības programmas darbības algoritmā netika veikta pilnīga aprēķina koeficientu piedzīšana, kā arī posmam, kurā notika testa braucieni, ir raksturīgs nelīdzens reljefs.
- 8) Testa braucienā nr. 6. 28.02.2013 lokomotīves apstāšanās 30 m aiz iecerētā apstāšanās punkta ir izskaidrojama ar to, ka uzdotais teorētiskais bremzēšanas paātrinājums, nevarēja tikt izpildīts ar uzdoto bremzēšanas pakāpi (sistēmas darbības parametri ievadīti nekorekti).
- 9) *APBS* sistēma neparedz jebkādu datu ievadi no lokomotīves mašīnista puses un strādā automātiski. Lokomotīves mašīnistam ir iespēja pārslēgt datu attēlošanas veidu un ieslēgt vai izslēgt dienesta bremzēšanas režīmu pēc nepieciešamības.

5. TESTĒŠANAS REZULTĀTU STATISTISKĀ ANALĪZE

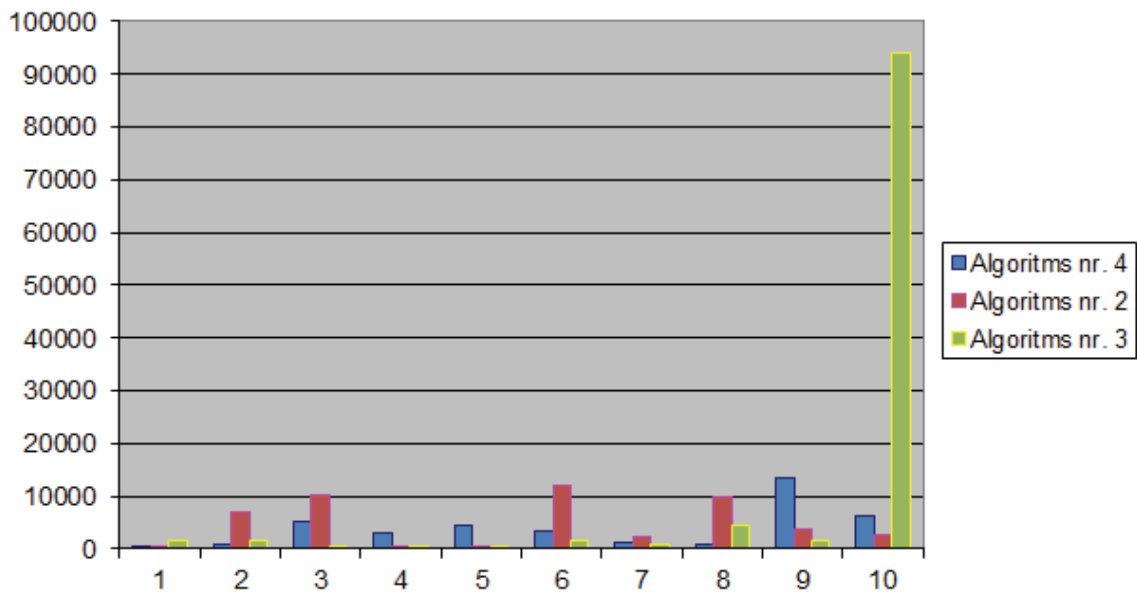
Situācijas raksturojums

Šajā nodaļā tiek veikta iegūto testēšanas un modelēšanas rezultātu statistiskā analīze. Izmantojot statistiskās novērtēšanas metodes pēc z-kritērija, hī-kvadrāta kritērija un Kolmogorova-Smirnova kritērija, tiek izvērtēta meklēšanas algoritmu testēšanas rezultātu savstarpējā sakritība vai atšķirība un iegūti apliecinājumi vai noraidījumi iepriekš izteiktajām hipotēzēm.

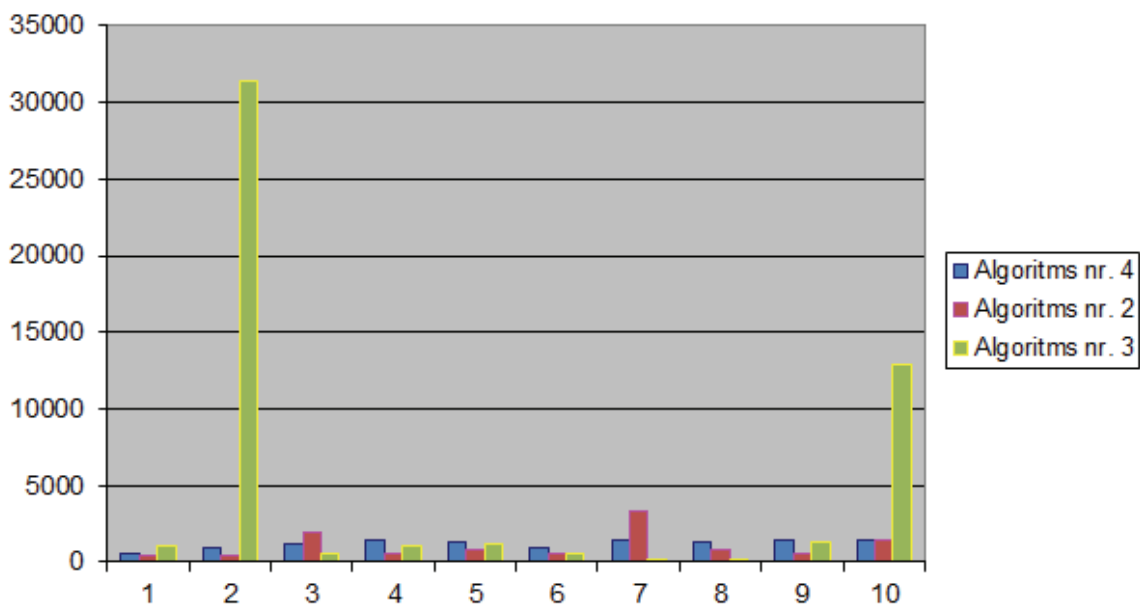
Iegūto eksperimentu datu statistiskā analīze

Promocijas darba pirmajā daļā viena no izvirzītām hipotēzēm ir, ka izvēlētie adaptīvie meklēšanas algoritmi var palielināt *APBS* sistēmas *AMA* algoritma ātrdarbību, salīdzinot ar gadījumu, kad tiktu 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* veiktspēja un ierobežotais laiks, kurā *APBS* sistēmai būtu jāveic pilnīga apmācība pēc ieejas datu saņemšanas.

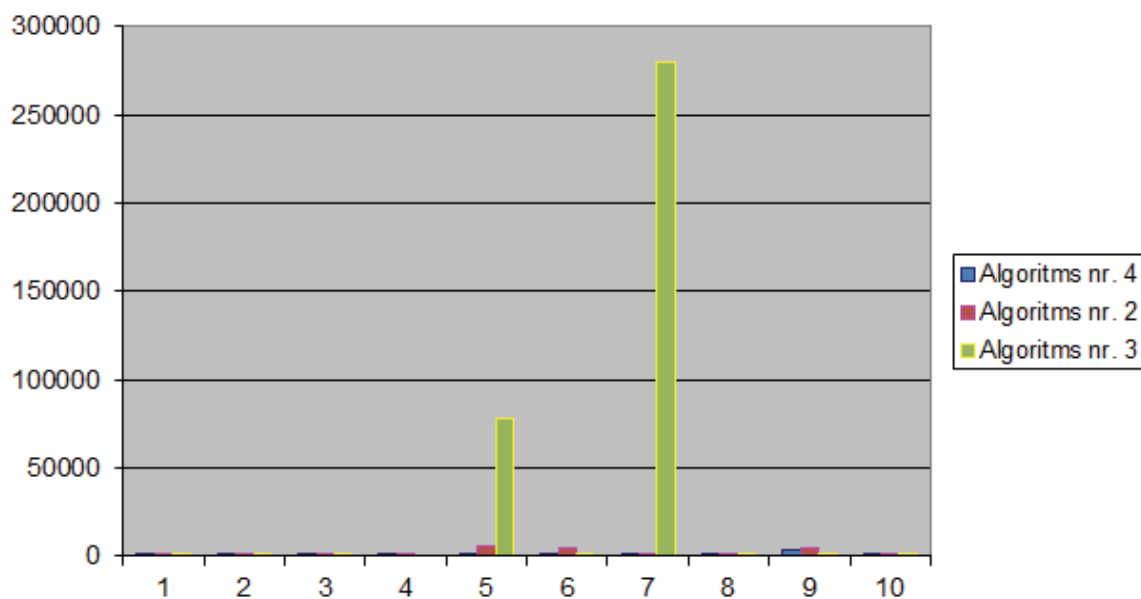
Meklēšanas algoritmu darbības gadījuma rakstura apstiprināšanai, no kopējā eksperimentu skaita tiek izvēlēti 3 dažādi gadījuma datoreksperimenti (eksperiments nr. 5, 260. un 495.). Šo eksperimentu 10 mēģinājumu rezultāti attēloti grafiskā veidā 5.1. att., 5.2. att. un 5.3. att.



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



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



5.3. att. Eksperimenta nr. 495. katra algoritma veiktās meklēšanas iterāciju skaits atkarībā no mēģinājuma kārtas skaitļa

Turpinājumā seko visu veikto datoreksperimentu rezultātu izejas parametru vidējo vērtību salīdzinājums visiem algoritmiem pēc dažādām ieejas parametru grupām (redzamās grupas tiek sastādītas atbilstoši 1. tabulā piedāvātajam ieejas parametru grupu iedalījumam). Turpinājumā sekojošās tabulās izejas parametriem tiek norādītas vidējās visu grupas eksperimentu vērtības un to atbilstošā standarta novirze. Tabulā nr. 6. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti īsu sastāvu vilcieniem.

6. 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. 7. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vidēji garu sastāvu vilcieniem.

7. 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. 8. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti garu sastāvu vilcienu gadījumā.

8. 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. 9. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vieglu vagonu sastāvu vilcienu gadījumā.

9. 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. 10. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vidēji smagu vagonu sastāvu vilcienu gadījumā.

10. 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. 11. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti smagu vagonu sastāvu vilcienu gadījumā.

11. 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. 12. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti maza bremžu kļuču spiedspēka sastāvu vilcienu gadījumā.

12. 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. 13. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vidēji liela bremžu kļuču spiedspēka sastāvu vilcienu gadījumā.

13. 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. 14. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti liela bremžu kļuču spiedspēka sastāvu vilcienu gadījumā.

14. 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. 15. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vilcieniem ar mazu kustības ātrumu.

15. 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. 16. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vilcieniem ar vidēju kustības ātrumu.

16. 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

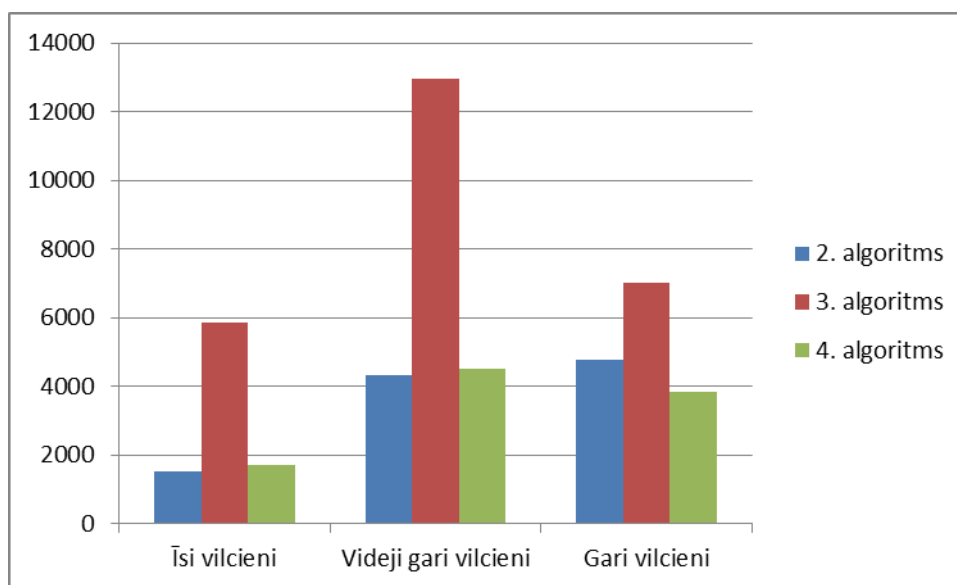
Tabulā nr. 17. redzami meklēšanas algoritmu darbības modelēšanas rezultāti vilcieniem ar lielu kustības ātrumu.

17. tabula

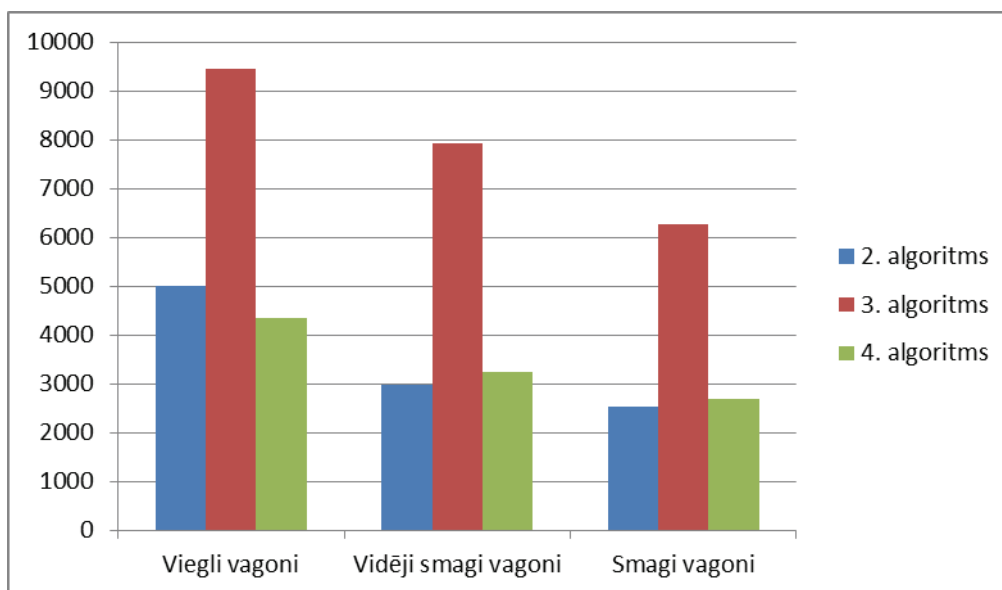
Vidējo eksperimentu rezultātu tabula vilcieniem ar lielu kustības ātrumu

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

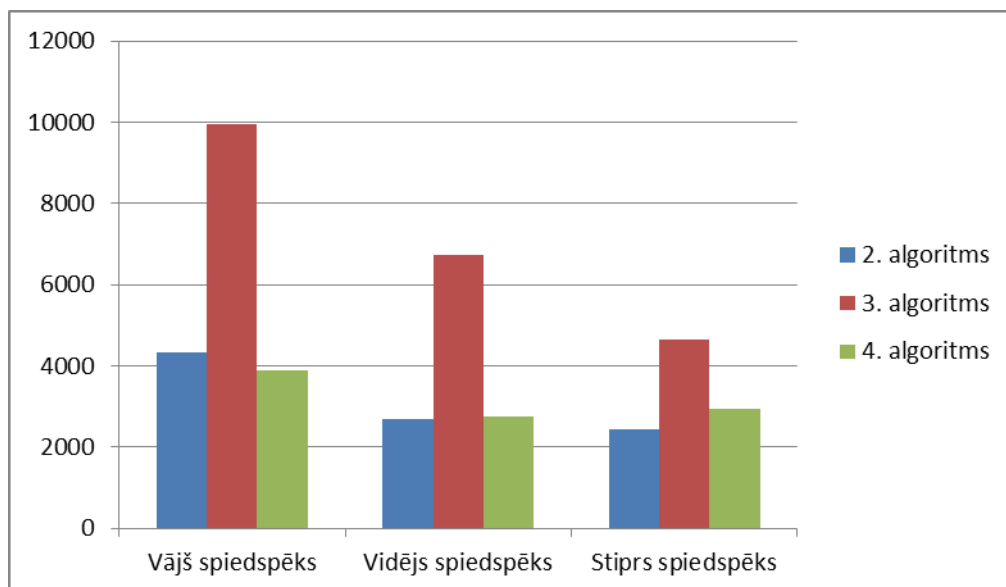
Turpinājumā seko iepriekš minēto tabulu grafisks apkopojums.



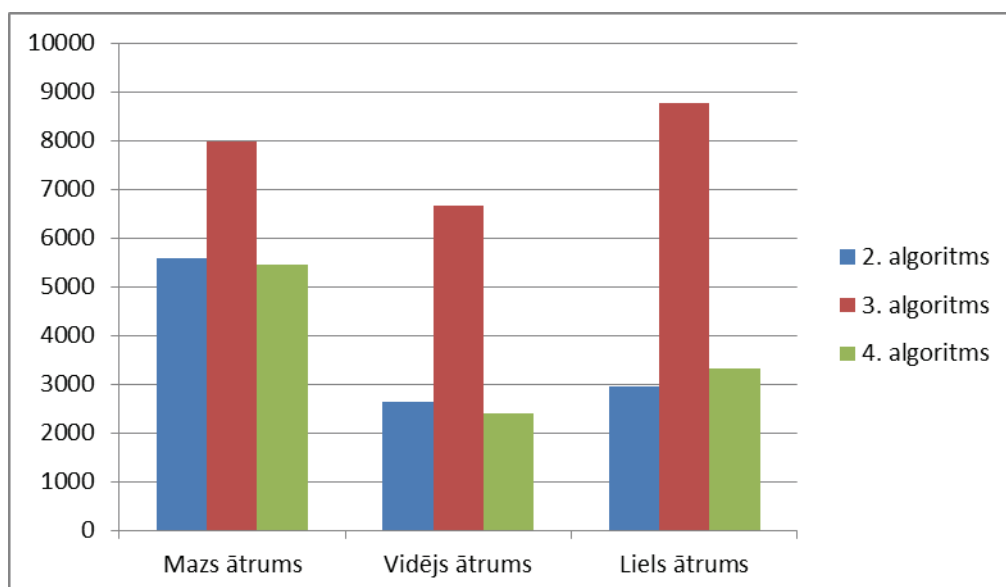
5.4. att. Meklēšanas algoritmu iterāciju skaita sadalījums pēc vilciena garuma



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



5.6. att. Meklēšanas algoritmu iterāciju skaita sadalījums pēc bremžu kļuču spiedspēka



5.7. 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 H01 hipotēzes pārbaudi katram no adaptīvajiem meklēšanas algoritmiem, meklējot vilciena vagonu skaitu (18. tabula).

H01 hipotēzes pārbaudes rezultātu tabula meklējot vilciena vagonu skaitu

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Vag. skaits nvag=2 alg=2	99.90 %	(8.619 ; 8.6707)	2	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=2 alg=3	99.90 %	(9.4086 ; 9.4282)	2	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=2 alg=4	99.90 %	(8.3681 ; 8.4146)	2	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=10 alg=2	99.90 %	(8.5863 ; 8.6353)	10	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=10 alg=3	99.90 %	(9.3447 ; 9.3688)	10	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=10 alg=4	99.90 %	(8.3535 ; 8.3968)	10	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=20 alg=2	99.90 %	(20 ; 20)	20	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=20 alg=3	99.90 %	(14.6608 ; 14.8268)	20	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=20 alg=4	99.90 %	(20 ; 20)	20	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=40 alg=2	99.90 %	(40 ; 40)	40	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=40 alg=3	Nav datu	Nav datu	Nav datu	Nav datu
Vag. skaits nvag=40 alg=4	99.90 %	(40 ; 40)	40	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=60 alg=2	99.90 %	(60 ; 60)	60	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. skaits nvag=60 alg=3	Nav datu	Nav datu	Nav datu	Nav datu
Vag. skaits nvag=60 alg=4	99.90 %	(60 ; 60)	60	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %

Otrā grupa satur H01 hipotēzes pārbaudi katram no adaptīvajiem meklēšanas algoritmiem, meklējot vilciena vagonu vidējo masu (19. tabula).

19. tabula

H01 hipotēzes pārbaudes rezultātu tabula meklējot vilciena vagonu vidējo masu

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Vag. masa mvag=20 alg=2	99.90 %	(20 ; 20)	20	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=20 alg=3	99.90 %	(11.9828 ; 12.318)	20	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=20 alg=4	99.90 %	(20 ; 20)	20	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=40 alg=2	99.90 %	(40 ; 40)	40	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=40 alg=3	99.90 %	(23.7641 ; 24.4247)	40	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=40 alg=4	99.90 %	(40 ; 40)	40	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=60 alg=2	99.90 %	(60 ; 60)	60	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=60 alg=3	99.90 %	(35.7318 ; 36.278)	60	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=60 alg=4	99.90 %	(60 ; 60)	60	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=80 alg=2	99.90 %	(80 ; 80)	80	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=80 alg=3	99.90 %	(46.1899 ; 46.939)	80	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=80 alg=4	99.90 %	(80 ; 80)	80	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=100 alg=2	99.90 %	(100 ; 100)	100	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %

Vag. masa mvag=100 alg=3	99.90 %	(39.4426 ; 40.5574)	100	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Vag. masa mvag=100 alg=4	99.90 %	(100 ; 100)	100	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %

Trešā grupa satur H01 hipotēzes pārbaudi katram no adaptīvajiem meklēšanas algoritmiem, meklējot vidējo bremžu kļu spiedspēku (20. tabula).

20. tabula

H01 hipotēzes pārbaudes rezultātu tabula meklējot vidējo bremžu kļu spiedspēku

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Bremz. koef. kbr=1 alg=2	99.90 %	(1 ; 1)	1	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=1 alg=3	99.90 %	(0.5678 ; 0.5861)	1	H013 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=1 alg=4	99.90 %	(1 ; 1)	1	H013 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=1.4 alg=2	99.90 %	(1.4 ; 1.4)	1.4	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=1.4 alg=3	99.90 %	(0.7733 ; 0.7979)	1.4	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=1.4 alg=4	99.90 %	(1.4 ; 1.4)	1.4	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=1.8 alg=2	99.90 %	(1.8 ; 1.8)	1.8	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=1.8 alg=3	99.90 %	(0.9943 ; 1.0258)	1.8	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=1.8 alg=4	99.90 %	(1.8 ; 1.8)	1.8	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=2.2 alg=2	99.90 %	(2.2 ; 2.2)	2.2	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=2.2 alg=3	99.90 %	(1.2154 ; 1.2539)	2.2	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %

Bremz. koef. kbr=2.2 alg=4	99.90 %	(2.2 ; 2.2)	2.2	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=2.6 alg=2	99.90 %	(2.6 ; 2.6)	2.6	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=2.6 alg=3	99.90 %	(1.4356 ; 1.4811)	2.6	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=2.6 alg=4	99.90 %	(2.6 ; 2.6)	2.6	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=3 alg=2	99.90 %	(3 ; 3)	3	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=3 alg=3	99.90 %	(1.5534 ; 1.6442)	3	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=3 alg=4	99.90 %	(3 ; 3)	3	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=3.4 alg=2	99.90 %	(3.4 ; 3.4)	3.4	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=3.4 alg=3	99.90 %	(1.7595 ; 1.8624)	3.4	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=3.4 alg=4	99.90 %	(3.4 ; 3.4)	3.4	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=3.8 alg=2	99.90 %	(3.8 ; 3.8)	3.8	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=3.8 alg=3	99.90 %	(1.9667 ; 2.0818)	3.8	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=3.8 alg=4	99.90 %	(3.8 ; 3.8)	3.8	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=4.2 alg=2	99.90 %	(4.2 ; 4.2)	4.2	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=4.2 alg=3	99.90 %	(1.9434 ; 2.0777)	4.2	H01 var būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %
Bremz. koef. kbr=4.2 alg=4	99.90 %	(4.2 ; 4.2)	4.2	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90 %

Turpinājumā seko datu tabula, kurā ir redzams cik reizes labāks ir katrs no testējamajiem adaptīvie algoritmiem salīdzinājumā ar vienkāršu pārļāšanās metodi.

21. tabula

Adaptīvo meklēšanas algoritmu salīdzinājums ar pārļāšanās metodi

Raksturlielums	Algoritms nr.	Labāks par pārļ. met. reizes
Īsi vilcieni	2	182.946
Īsi vilcieni	3	47.766
Īsi vilcieni	4	162.592
Vidēji gari vilcieni	2	64.726
Vidēji gari vilcieni	3	21.625
Vidēji gari vilcieni	4	62.091
Gari vilcieni	2	58.522
Gari vilcieni	3	40
Gari vilcieni	4	72.540
Viegli vagoni	2	55.988
Viegli vagoni	3	29.613
Viegli vagoni	4	64.615
Vidēji smagi vagoni	2	94.342
Vidēji smagi vagoni	3	35.374
Vidēji smagi vagoni	4	86.331
Smagi vagoni	2	111.115
Smagi vagoni	3	44.766
Smagi vagoni	4	104.419
Vājš spiedspēks	2	64.492
Vājš spiedspēks	3	28.166
Vājš spiedspēks	4	71.756
Vidējs spiedspēks	2	103.965
Vidējs spiedspēks	3	41.674
Vidējs spiedspēks	4	101.685
Stiprs spiedspēks	2	114.834
Stiprs spiedspēks	3	60.115
Stiprs spiedspēks	4	95.231
Mazs ātrums	2	50.090
Mazs ātrums	3	35.103
Mazs ātrums	4	51.410
Vidēji liels ātrums	2	106.553
Vidēji liels ātrums	3	42.064
Vidēji liels ātrums	4	116.841
Liels ātrums	2	95.166
Liels ātrums	3	31.906
Liels ātrums	4	84.154

Nobeigumā tiek salīdzināti divi labākie adaptīvie meklēšanas algoritmi, starp kuriem ir algoritms nr. 2. un algoritms nr. 4.

Adaptīvo meklēšanas algoritmu nr. 2 un nr. 4. Savstarpējais salīdzinājums

Raksturlielums	Labāks algoritms nr.	Reizes labāks
Īsi vilcieni	2	1.125
Vidēji gari vilcieni	2	1.042
Gari vilcieni	4	1.239
Viegli vagoni	4	1.154
Vidēji smagi vagoni	2	1.092
Smagi vagoni	2	1.064
Vājš spiedspēks	4	1.112
Vidējs spiedspēks	2	1.022
Stiprs spiedspēks	2	1.205
Mazs ātrums	4	1.026
Vidēji liels ātrums	4	1.096
Liels ātrums	2	1.130

Secinājumi par piekto nodaļu

Veiktā izstrādāto datormodeļu un *APBS* iekārtu prototipu testēšana reālajos darba apstākļos ļauj apstiprināt hipotēzes H_{01} un H_{02} , par to ka izstrādātie dzelzceļa transporta bremžu sistēmas vadības algoritmi un izstrādātie iekārtu prototipi ir darbotiespējīgi un spēj apturēt dzelzceļa transportu, pielietojot dienesta bremzēšanas režīmus. Sīkāku statistisko analīzi par veikto praktisko eksperimentu rezultātu datiem nav iespējams veikt, izejot no tā, ka veiktais testēšanas eksperimentu skaits (ko ierobežo ekonomiskie faktori) nav pietiekoši liels.

Var secināt, ka *APBS* darbības precizitāti iespaido *GPS* signāla precizitāte, *GSM* bezvadu sakaru kanāla darbības aiztures, ritošā sastāva gaisdaļu nostrāde un citi nekontrolējamie faktori, kas pēdējā bremzēšanas posmā spēj iespaidot *APBS* lokomotīves apstāšanās punkta precizitāti.

Laboratorijas apstākļos veikto datoreksperimentu datu statistiskā analīze ar varbūtību 99,9 % apstiprināt izteikto hipotēzi par to, ka adaptīvie meklēšanas algoritmi ir ātrdarbīgāki par vienkāršu pārlasīšanas metodi, izņemot gadījumus, kad vilciena sastāvā ir mazs vagonu skaits.

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 pārslasīšanu 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 pārslasīšanu 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 ± 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. Хлебцевич Ю. С. „Электрический регулятор экономичности” авт. заявка № 231496 от 4.04.1940. авт. св. СССР № 170566 // Бюлл. изобретений. – 1965. – № 9.
2. Казакевич В. В. „Способ автоматического регулирования различных процессов по максимуму или по минимуму” авт. св. № 66335 от 25.11.1943 // Бюлл. изобретений. 1946. г.– № 10.
3. Дрейпер Ч. С., Ли И. Т. „Автоматическая оптимизация управляемых систем” // Под ред. Б. Н. Петрова, М.: Изд-во иностр. лит., 1960. г. – 240 с.
4. Ивахненко А. Г. „Задачи экстремального регулирования” // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1956. г. – с. 41–56.
5. Казакевич В. В. „Системы экстремального регулирования и некоторые способы улучшения их качества и устойчивости” // Автоматическое управление и вычислительная техника. – М.: Машгиз, 1958. – с. 66–96.
6. Фельдбаум А. А. „Вычислительные устройства в автоматических системах” // М.: Физматгиз, 1959. г. – 800 с.
7. Morosanov I. S. “Method of extremum seeking control” // Automation and Remote Control, 1957. y. – Vol. 18. – pp. 1077–1092.
8. Ostrovskii I. I. “Extremum regulation” // Automation and Remote Control. 1957. – Vol. 18. – pp. 900–907.
9. Pervozvanskii A. A. “Continuous extremum control systems in the presence of random noise” // Automation and Remote Control. 1960. – Vol. 21. – pp. 673–677.
10. 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.
11. Wittenmark B., Urquhart A. “Adaptive extremal control” // Proc. of 34-th IEEE Conference on Decision and Control. – New Orleans, LA: 1995. – pp. 1639–1644.
12. Krstic M., Wang H.-H. “Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems” // Automatica. 2000. y. Vol. 36. – pp. 595–601.
13. Красовский А. А. „Теория самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией” // Под ред. А. А. Колесникова. ТРТУ, 2000. – с. 268–311.
14. 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.

15. 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.
16. Красовский А. А. „Динамика непрерывных самонастраивающихся систем” – М.: Физматгиз, 1963. – 468 с.
17. Казаков Ю. М., Евланов Л. Г. „О теории самонастраивающихся систем с поиском градиента методом вспомогательного оператора” // Тр. II-го межд. конгресса ИФАК, М.: Наука, 1965. – с. 252–262.
18. Солодовников А. А. „Аналитические самонастраивающиеся системы автоматического управления” // М.: Машиностроение, 1965. г. – 356 с.
19. Ли Я. Ц., Ван дер Вальде У. И. „Теория нелинейных самонастраивающихся систем” // М.: Изд.-во АН СССР, 1961. г. – с. 726–744.
20. 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.
21. 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.
22. Narendra K. S., Balakrishnan J. „Adaptive control using multiple models” // IEEE Trans. on Automatic Control, 1997. y.– Vol. 42, no. 2. – pp. 171–187.
23. Гибсон Д. И. „Системы самооптимизации или самонастраивающиеся системы автоматического регулирования” // Т. 2. – М.: Изд.- во АН СССР, 1961. г. – с. 745–763.
24. Tou J. T. „Modern Control Theory” // N.-Y.: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1964. y. – 343 pp.
25. 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.
26. Bellman R. „Adaptive Control Processes – A Guided Tour” // Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1961. y.
27. Bellman R., Kalaba R. „Dynamic Programming and Modern Control Theory” // N.-Y.: Academic Press, 1965. y.
28. Квакернаак Х. „О допустимом адаптивном управлении” // М.: Наука, 1969. г. – с. 17–22.

29. Траксел Д. „Самонастраивающиеся системы (обзорный доклад)” // Тр. II-го междунар. конгресса ИФАК «Дискретные и самонастраивающиеся системы». – М.: Наука, 1965. г. – с. 240–251.
30. Mishkin E., Braun L. B. J. „Adaptive Control Systems” // N.-Y – Toronto – London: McGraw-Hill Book Co. Inc., 1961. г.
31. Ивахненко А. Г. „Задачи экстремального регулирования” // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1956. г. – № 10. – с. 41–56.
32. Draper C.S., Li Y. „Principles of Optimizing Control Systems” // NewYork: ASME, 1954. г.
33. Аналитические самонастраивающиеся системы автоматического управления / Под ред. А. А. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1965. г. – 356 с.
34. Tsien H. S. Engineering Cybernetics. – McGraw Hill, 1954. г. – 289 pp.
35. Bellman R., Kalaba R. Dynamic programming and adaptive control processes: Mathematical foundations // IRE Trans. on Automatic Control. – 1960. г. – Vol. AC-5. – pp. 5–10.
36. Ли Я.-Ц, Ван дер Вальде У. И. Теория нелинейных самонастраивающихся систем // Тр. I-го междунар. конгресса ИФАК «Теория дискретных, оптимальных и самонастраивающихся систем». – Т. 2. – М.: Изд.-во АН СССР, 1961. г. – с. 726–744.
37. Траксел Д. Самонастраивающиеся системы (обзорный доклад) // Тр. II-го междунар. конгресса ИФАК «Дискретные и самонастраивающиеся системы». – М.: Наука, 1965. г. – с. 240–251.
38. Фельдбаум А. А. Проблемы самоприспосабливающихся (адаптивных) систем // Тр. I-й междунар. конф. по самонастраивающимся системам. – М.: Наука, 1965. г.
39. Bellman R. Adaptive Control Processes – A Guided Tour. – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1961. г.
40. Tou J. T. Modern Control Theory. – N.-Y.: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1964. г. – 343 pp.
41. Фельдбаум А. А. „Проблемы самоприспосабливающихся (адаптивных) систем” // Тр. I-й междунар. конф. по самонастраивающимся системам. – М.: Наука, 1965. г.

42. Фу К. С. „Класс самообучающихся систем автоматического регулирования, основанный на использовании теории статистических решений” // Тр. II-го междунационального симпозиума ИФАК по самонастраивающимся системам. – М.: Наука, 1969. г. – с. 7–15.
43. Цыпкин Я. З. „Основы теории обучающихся систем” // М.: Наука, 1970. г. – 252 с.
44. Ивахненко А. Г. „Задачи экстремального регулирования” // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1956. г. – № 10. – с. 41–56.
45. Марголис М., Леондес К. Т. „О теории самонастраивающейся системы регулирования; метод обучающейся модели” // Тр. I-го междунационального конгресса ИФАК «Теория дискретных, оптимальных и самонастраивающихся систем». – Т. 2. – М.: Изд.-во АН СССР, 1961. г. – с. 683–698.
46. Красовский А. А., Буков В. Н, Шендрик В. „Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами” // М.: Наука, 1977. г. – 272 с.
47. Саридис Д. „Самоорганизующиеся стохастические системы управления” // М.: Наука, 1980. г. – 400 с.
48. Срагович В. Г. „Теория адаптивных систем” // М.: Наука, 1981. г. – 384 с.
49. Якубович В. А. „К теории адаптивных систем” // ДАН СССР, 1968. г. – с. 518–521.
50. Florentin J. J. „Optimal probing, adaptive control of a simple bayesian system” // J. Electronics Contr, 1962. y. – pp. 13.–165.
51. Lee R. C. „Optimal estimation, identification and control” // Cambridge, Mass.: MIT Press, 1964. y.
52. 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.
53. Zadeh L. A. „On the definition of adaptivity” // Proc. IEEE, 1963. y.– Vol. 51.– pp. 469–470.
54. Цыпкин Я. З. „Адаптация и обучение в автоматических системах” // М.: Наука, 1968. г. – 400 с.
55. Цыпкин Я. З. „Основы теории обучающихся систем” // М.: Наука, 1970. г. – 252 с.
56. Саридис Д. „Самоорганизующиеся стохастические системы управления” // М.: Наука, 1980. г. – 400 с.
57. Bellman R., Kalaba R. „Dynamic Programming and Modern Control Theory”//N.-Y.: Academic Press, 1965. y.

58. Zadeh L. A. "On the definition of adaptivity" // Proc. IEEE, 1963. y.– Vol. 51.– Pp. 469–470.
59. Воронов А. А., Рутковский В. Ю. „Современное состояние и перспективы развития адаптивных систем” // Сб. ВК-59 «Вопросы кибернетики: проблемы теории и практики адаптивного управления». – М.: Изд-во АН СССР, 1985. г. – с. 5–48.
60. Дружинина М. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. „Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу” // Автоматика и Телемеханика, 1996. г. – № 2. – с. 3–33.
61. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. „Адаптивное управление динамическими объектами” // М.: Наука, 1981. г. – 448 с.
62. Фрадков А. Л. „Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы” // М.: Наука, 1990. г. – 286 с.
63. Фрадков А. Л. „Схема скоростного градиента и ее применение в адаптивном управлении” // Автоматика и Телемеханика, 1979. г. – с. 90–101.
64. Цыпкин Я. З. „Информационная теория идентификации” // М.: Наука, Физмат- лит, 1995. г. – 336 с.
65. Isidori A. „Nonlinear control systems” // Springer-Verlag, 1989. y.
66. 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.
67. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. „Nonlinear and Adaptive Control Design” //Wiley and Sons Inc., 1995. y.
68. 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.
69. 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.
70. Ding Z. „Adaptive control of triangular systems with nonlinear parameterization” // IEEE Trans. Automatic Control, 2001. – Vol. 46, no. 12. – pp. 1963–1968.
71. 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.

72. 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.
73. Kojic A., Annaswamy A. „Adaptive Control of Nonlinearly Parameterized Systems with a Triangular Structure” // *Automatica*, 2002. y. – Vol. 38, no. 1. – pp. 115–123.
74. 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.
75. Tsien H. S. „Engineering Cybernetics” // McGraw Hill, 1954. y. – 289 pp.
76. Osborne A. „An Introduction to Microcomputers – 2nd Ed.” // Berkely (California): Osborne-McGraw Hill, 1980. y.
77. Amos S. W., James M. R. „Principles of Transistor Circuits. Butterworth-Heinemann” // ISBN 0-7506-4427-3.
78. Godse A. P., Godse D. A. „Microprocessors & Microcontrollers Technical Publications” // 2010. y. – 948 p.
79. Wilmshurst T. „Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers, Second Edition: Principles and Applications” // 2009. y. – 750 p.
80. Reese R.B. „Microcontrollers: From Assembly Language to C Using the PIC24 Family” // 2008. y. – 824 p.
81. Ceruzzi P. E. „A History of Modern Computing (History of Computing)” // 2003. y. – 459 p.
82. Волкова В. Н., Денисов А. А. „Теория систем: учебное пособие” // М.: Высшая школа, 2006. г. – 511 с. ISBN 5-06-005550-7
83. Кориков А. М., Павлов С. Н. „Теория систем и системный анализ: учеб. Пособие” // Томск: Томс. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2008. г. – 264 с. ISBN 978-5-86889-478-7
84. Эшби У. Р. „Введение в кибернетику” // М.: КомКнига, 2005. г. – 432 с. ISBN 5-484-00031-9
85. Ļevčenkovs A., Gorobecs M., Ribickis L. „Vizuālorientētas programmēšanas pamati industriālajā elektronikā” // Rīga: RTU izdevniecība, 2010. g. – 522 lpp.
86. Ribickis L., Ļevčenkovs A., Gorobecs M. „Sistēmu teorijas pamati industriālās elektronikas modelēšanā” // Rīga: RTU izdevniecība, 2008. g. – 100 lpp.
87. Raņķis I., Bražis V. „Elektrotehnoloģiskās iekārtas” Rīga: RTU izdevniecība, 2005. g. – 108 lpp.

88. Ribickis L., Ļevčenkovs A., Kuņicina N., Gorobecs M. „Ievads dinamisko procesu modelēšanā mehatronikas sistēmās. Mācību grāmata” // Rīga: RTU izdevniecība, 2006. g. – 97 lpp.
89. Ribickis L., Raņķis I., Bražis V. „Elektrotransporta rekuperācijas iespējas” // Rīgas pilsētā. Rīgas Domes zin.-tehn. konferences materiāli, 2001. – 4. lpp.
90. Ribickis L., Vītols A. „Maiņstrāvas elastīgo pārvades sistēmu jaudas plūsmas kontrolleris – UPFC” // Rīga, RTU zinātniskie raksti ”Enerģētika un elektrotehnika”, 4. sērija, 10. sējums, 59.– 64.lpp.
91. Rankis I., Gorobetz M., Levchenkov A. „Optimal Electric Vehicle Speed Control By Intelligent Devices” // Rīgas Tehniskās universitātes raksti. Enerģētika un Elektrotehnika. Sērija 4, sējums 16. 2006. g.
92. Ribickis L., Rankis I. „Electrical drives static characteristics and methods of speed control” // Rīga: RTU izdevniecība, 1995. g. – 107 lpp.
93. Ribickis L., Gorobetz M., Levchenkov A. „Intelligent Electric Vehicle Motion and Crossroad Control” // In Proceedings of 12th International Power Electronics and Motion Control Conference. Portoroz, Slovenia, 2006 – pp. 1239–1244.
94. Gorobecs Mihails „Ģenētisko algoritmu izpēte elektriskā transporta optimālai vadībai. Promocijas darbs” // Rīga: RTU izdevniecība, 2008. g. – 189 lpp.
95. Grundspenķis, J. „Ievads intelektuālās sistēmās” // Rīga: RTU izdevniecība, 1993. g. – 158 lpp.
96. 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.
97. Gen M., Cheng R. “Genetic algorithms and engineering design” // John Wiley & Sons, New York, 1997. y. – 79 pp.
98. Gao J., Fang L. „A Novel Artificial Immune System for Multiobjective Optimization Problems” // Lecture Notes in Computer Science, 2009 y.
99. Gorobetz M. „Intelligent Agent Approaches for Energy Saving in Public Electric Transport Systems” // In: Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS), Jurmala, Latvia, 6. October 2006. y.
100. Gorobetz M., Kunicina N., Levchenkov A. „Back-Propagation Algorithm For Intelligent Agents In Electric Transport Systems” // In. Proceedings of International Conference on Knowledge Engineering and Decision Support, Lisbon, Portugal, 2006. y, – pp. 321–328.

101. Gorobetz M., Kunicina N., Levchenkov A. „Visual Modeling of Power Processes Control in Mechatronics Systems” // In Proceedings of 11th International Conference. Mechanika, Kaunas, Lithuania, 2006. y. – pp.186.–192.
102. Gorobetz M., Kunicina N., Levchenkovs A., Tihomirova N. „Decision Making Modelling in Mechatronics Systems for Transport Control” // In Proceedings of 6th International Conference "Transport Systems Telematics", Katowice, Poland, 2006. y. – pp. 171–180.
103. Gorobetz M., Kunicina N., Levchenkovs A., Uteshev I. „Intelligent Agents Networks for Power Processes Control in Mechatronics Systems” // In Proceedings of 2nd International Conference on ‘Electrical/Electromechanical Computer Aided Design & Engineering, Stuttgart, Germany, 2006. y., – pp. 1–13.
104. Gorobetz M. Electronic Intelligent Agents for Control of Mechatronics System. //In: Rīgas Tehniskās universitātes raksti. Enerģētika un Elektrotehnika. Sērija 4, sējums 20. 2007. g. – 178–189. lpp.
105. Gorobetz M., Baltskars P., Levchenkovs A., Kunicina N., Vinogradova B. „Algorithms for Safety Assessment in Railway Transport” // In Proceedings of 15th International Symposium „Towards more competitive European rail system”, Žilina, Slovākija, 2007. y.
106. Gorobetz M., Levchenkov A. „Evolutionary Algorithms and Dynamic Parameters for Public Electric Transport Modeling” //In Proceedings of 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, Ajaccio,France 2008. y. – pp. 215–219.
107. Gorobetz M., Levchenkov A. „Modelling of Stochastic Parameters for Control of City Electric Transport Systems Using Evolutionary Algorithm” // In Proceedings of International Workshop on 22th European Conference on Modelling and Simulation, Nicosia, Cyprus, 2008. y. – pp. 207–212.
108. Gorobetz M., Balckars P., Levchenkov A., Ribickis L. „Modelling of Neural Network Controller for Scheduling Task in Intelligent Transport Systems // In Proceedings of 16th International Symposium „Towards more competitive European rail system”, Zilina, Slovakia, 2008. y. – pp. 279–289.
109. Greivulis J., Levchenkov A., Gorobetz M. „Modelling Of Artificial Neural Network Controller For Electric Drive with Linear Torque Load Function” // In Proceedings of 7th International Conference Engineering for Rural Development 2008. y.

110. Alps I., Gorobets M., Ļevčenkova A., Ribickis L. "Sarakstu teorijas modelēšana intelektuālajās elektriskā transporta sistēmās" // RTU zinātnisko rakstu krājums „Energētika un Elektrotehnika” sērija 4, sējums 23, Latvija, Rīga, 2008. g. – 184–194 lpp.
111. Alps I., Gorobets M., Levchenkov A., Ribickis L. "Modeling of Scheduling Theory in Intelligent Electric Transport Systems" //In proceedings of Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2008), Lithuania, Panevezys, 2008. y. – pp. 28–37.
112. Alps I., Gorobets M., Levchenkov A. „Algorithm for Multi-Stage Scheduling in Intelligent Electric Transport System” // RTU zinātniskie raksti “Mašīnzinātne un transports” sērija 6, sējums 32, Latvija, Rīga, 2009. g. – 92–99. lpp.
113. Alps I., Potapov A., Gorobets M., Levchenkov A. „Algorithm for Public Electric Transport Schedule Control for Intelligent Embedded Devices” // In proceedings of RTU 51st International Scientific Conference “Power and Electrical Engineering” Latvia, Riga, 2010. y. – pp. 155–160.
114. Alps I., Gorobets M., Levchenkov A. „Algorithm for Increasing Traffic Capacity of Level-Crossing Using Scheduling Theory and Intelligent Embedded Devices” // In proceedings of RTU 52nd International Scientific Conference “Power and Electrical Engineering” Latvia, Riga, 2011. y. – pp. 129–136.
115. Alps I., Gorobets M., Levchenkov A. „Algorithm for Multi-Stage Scheduling in Intelligent Electric Transport System” // In proceedings of 8th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering”, Estonia, Tartu, 2010. y. – pp. 109–115.
116. Alps I., Gorobets M., Levchenkov A. „Intelligent Embedded Devices for Multistage Scheduling Tasks in Public Electric Transport” // In proceedings of 5th International Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2010), Lithuania, Panevezys, 2010. y.
117. Alps I., Gorobets M., Levchenkov A. „Algorithm for Increasing Traffic Capacity of Level-Crossing Using Scheduling Theory” // In proceedings of 6th International Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2011), Lithuania, Panevezys, 2011. y. – pp. 99–108.
118. Borisov, A. N. „Genetic algorithms, genetic programming, genetic machine learning, lecture slides. Transport and Telecommunications” //Riga, TTI, 2004. y. – 251 p.

119. Beinarts I. „Izplūdušās loģikas kontrolleru algoritmu izpēte pasažieru transporta salona siltuma komforta vadībai. Promocijas darbs // Rīga: RTU izdevniecība, 2011. g. – 171 lpp.
120. Krūmiņš O. „Inteliģento transporta sistēmu izveides principi un realizācijas iespējas. Promocijas darbs” // Rīga: RTU izdevniecība, 2010. g. – 171 lpp.
121. Kuņicina N. „Programmu aģentu modelēšanas metožu izstrāde elektropiegādes un transporta loģistikas sistēmās. Promocijas darbs” // Rīga: RTU izdevniecība, 2004. g. – 103 lpp.
122. 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.
123. Berežņojs A. „Transporta plūsmas modeļu vadošo parametru ietekmes uz pilsētas ceļu kustības vadības efektivitāti izpēte. Promocijas darbs” // Rīga, TSI, 2008. g. – 256 lpp.
124. Borisovs A. „Mākslīgā intelekta metodes” // Rīga: RTU izdevniecība, 1993. g. – 75 lpp.
125. Ильницкий А. Л. „Алгоритмы решения многогресурсных задач теории расписаний и их применение” // Киев, 1985. г. – 136 с.
126. Корякин Р. А. „Вероятностный анализ алгоритмов построения кратчайших расписаний для многостадийных систем” // Новосибирск, 2005. г. – 98 с.
127. Рыков И. А. „Алгоритмы с оценками качества для задач календарного планирования, упаковки и выбора подмножества векторов” // 2009. Г.
128. Мохонько В. П. „Микропроцессорная система обеспечения безопасности функционирования железнодорожных поездов. Диссертация” // Самара, 2000. г. – 42 с.
129. Petuhova N. „Temporālie datu modeļi dzelzceļa transporta informācijas sistēmās. Promocijas darbs” // Rīga: TSI, 2010. g. – 164 lpp.
130. Маслов М. Г. „Разработка моделей и алгоритмов составления расписаний в системах административно-организационного управления” // Москва, 2005. г. – 217 с.
131. Tsukamoto Y. „Train Control System”, patent nr. WO2012JP74286 20120921, 2013. y.
132. Chavez O. D. T. „Electronic System for Controlling and Monitoring a Power Brake System”, patent nr. MX20110007404 20110711, 2013. y.
133. Cooper J. K., Peltz D. M. and other „System and Method for Communicating Data in a Vehicle Consist”, patent nr. AU20110302200 20110914, 2013. y.

134. General Electric Company „System, Method and Computer Readable Media for Adaptively Determining a Brake Application Level for Signaling a Remote Locomotive of a Train During a Communication Loss”, patent nr. PCT/US2007/064976, 2007. y.
135. Shtriberski A., Lang V. F. and others „Anti-skidding Adaptive Protection with Skidding Regulator for Rail Vehicles”, patent nr. RU20070144075 20060418, 2010. y.
136. Ming L. „Method for Monitoring Signals in Communication System Working Based on Different Time Proportions”, patent nr. CN20101606642 20101220, 2012. y.
137. Ветлугин Б. И. „Устройство для регулирования скорости движения поезда”, RU2283255C1, 2006. г.
138. Rosenkranz U., Scharnweber K. „Method and Arrangement for the Operation of Railroad Line”, PCT/EP2008/057611, 2008. y.
139. Срисертопол Д. „Разработка и исследование алгоритмов непрямо́й параметрической адаптации в системах обработки информации” // Санкт-Петербург, 2003. г.
140. Антропов А. Н. „Совершенствование тормозных средств грузовых поездов постоянного формирования” // Екатеринбург, 2008. г.
141. Комков Е. В. „Адаптивная система автоматического управления прицельным торможением поездов метрополитена” // Москва, 1984. г.
142. Комогорцев М. Г. „Разработка алгоритмов и систем автоматического контроля ответственных параметров безопасности движения поездов” // Иркутск, 2009. г.
143. Рыбина Г.В. „Основы построения интеллектуальных систем” // Москва, 2010. г.
144. Аверкин А.Н. „Мягкие вычисления” // Новости искусственного интеллекта, 1996. г. № 3.– с. 161–164.
145. Амамия М. „Архитектура ЭВМ и ИИ/М” // М.: Мир, 1993. г.
146. Баталина А.М. „Объектное моделирование поверхностно синтаксического анализа” // Труды конференции. В 3-х т. Т.2. – М.: Физматлит, 2004. г. – с. 462–471.
147. Pourbaix J. „Employment in public transport: 13 million people worldwide” // Observatory of employment in public transport, 2011. y.
148. Russell S., Norvig P. „Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd Edition)” // Prentice Hall, 2009. y.
149. Norbert Wiener „Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine” // Paris, (Hermann & Cie) & Camb. Mass, 1961. y.

150. 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.
151. 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.
152. Cheng L., Shuo–Yan C., Hsin–Yin H. „Developing adaptive driving route guidance systems based on fuzzy neural network” // Systems, Man and Cybernetics, USA, San Antonio, 2009. y., – pp. 4293 – 4298.
153. Marques, A., Serrano, M. „Pervasive Computing In Transport Embedded Information Systems” // Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshops, Italy, Rome, 2009, 1 – 3 pp.
154. Rauf M., Abd–Alla A.N. and others „Intelligent Multi ID buses navigation system with efficient data transmission technique” // Information Networking and Automation, China, Kunming, 2010. y., – pp. 51–56.
155. Moor–Yarostavcev A., Levchenkov A. „Rolling stock location data analysis using an immune algorithm on an intelligent embedded device” // Telecommunications Forum, Serbia, Belgrade, 2011. y. – pp 1554–1557.
156. Krishna K. „Microprocessors and Microcontrollers – Architecture, Programming and System Design” // Prentice–Hall of India, 2013. y. – 744 pp.
157. Singh R. „Microprocessors Interfacings and Applications” // New Age International Pvt Ltd Publishers, 2007. y. – 420 pp.
158. Catsoulis J. „Designing Embedded Hardware” // O'Reilly Media, 2005. y. – 398 pp.
159. European Railway Agency, Railway Safety Performance in the European Union 2010, Espace International, 299 Boulevard de Leeds, Lille, France, 64 pp.
160. Seyedreza F. „Programming with SIEMENS SIMATIC S7 300/400 programmable controllers” // www.plc-doc.com, 2008. y.
161. Bolton W. „Programmable Logic Controllers” // Newnes, 5th Revised edition edition, 2009. y. – 403 pp.
162. Valvano J. W. „Embedded Systems: Introduction to Arm Cortex Microcontrollers” // CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. y. – 500 pp.

163. Berger H. „Automating with Simatic: Controllers, Software, Programming, Data: Controllers, Software, Programming, Data Communication Operator Control and Process Monitoring” // Wiley VCH; 5th Edition edition, 2012. y. – 284 pp.
164. 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.
165. Синякин А.К., Кошелев А.В. „Физические принципы работы GPS-ГЛОНАСС” // Новосибирск: СГГА, 2009. г. – 110 с.
166. Klūga A. „Satelītu rādionavīgācijas sistēmas” // Rīga: RTU Izdevniecība, 2010. – 152 lpp.
167. Растрингин Л. А. „Адаптация сложных систем. Методы и приложения” // Рига, 1981. г. – 394 с.
168. Растрингин Л.А. „Современные принципы управления сложными объектами” // М.: Сов. радио, 1980. г. – 232 с.
169. Растрингин, Л.А. „Адаптивное обучение с моделью обучаемого” // Рига: Зинатне, 1988. г. – 160 с.
170. 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.
171. e.g. ISO 26262, RTCA DO 178B, IEC or CENELEC EN 5012x, 50125x and IEC 61508 standards.
172. 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 9th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering", Estonia, Parnu, 2010. – pp. 180–185.
173. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A. „Algorithm for Embedded Safety Braking Control System in City Electric Transport” // In proceedings of 52th Annual Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 2010. – pp. 249–254.
174. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A. „Interaction of Real and Embedded Devices for Intelligent Control of City Electric Transport” // „Advances in Transport Systems Telematics”, Poland, Katowice-Ustroń, 2010. – pp. 25–31.

175. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A., Ribickis L. „Modeling of Embedded Intelligent Device for Control of City Electric Transport” // In proceedings of 5th International Conference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS’2010)”, Lithuania, Panevezys, 2010. – pp. 37–42.
176. 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.
177. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A. „Intelligent Electronic Embedded Systems for the Protection of Railway Transport from Accidents” // In proceedings of 11th International Conference „Transport Systems Telematics”, Poland, Katowice-Ustron, 2011. – pp. 85–85.
178. Potapovs A. „Algorithm for Embedded Safety Braking Control System in City Electric Transport” // In proceedings of 52th Annual Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 2011. – pp. 82.
179. Potapovs A., Levchenkov A., Gorobetz M. „Intelligent Electronic Embedded Systems for the Protection of Railway Transport from Accidents” // „Advances in Transport Systems Telematics”, Poland, Katowice-Ustroń, 2011. – pp. 24.–30.
180. Potapovs A., Gorobetz M., Levchenkov A., „Opportunities of Adaptive Control Algorithms Application in Railway Control Systems” // In proceedings of 7th International Conference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS’2012)”, Lithuania, Panevezys, 2012. – pp. 141–146.
181. Potapovs A., Moor-Yaroslavtsev A., Gorobetz M., Levchenkov A. „Smooth Braking of Train Using Adaptive Control Algorithms on Embedded Devices” // In proceedings of 53th Annual Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, 2012. – pp. 135.
182. 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.;
183. 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.;
184. A. Potapovs, A. Ļevčenkovs, M. Gorobecs, S. Holodovs, I. Birjuļins „Vilcienu automātiskas laidenas un precīzas bremzēšanas iekārta”, patenta Nr. P-13-43 no 03.04.2013.

185. A. Ļevčenko, 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. WO/2013/013728 A3 of 26.07.2011
186. Пархомов В. Т. „Устройство и эксплуатация тормозов” // М.: Транспорт, 1994. г. – 208 с.
187. Крылов В. И., Крылов В. В. „Автоматические тормоза подвижного состава” // М.: Транспорт, 1983. г. – 360 с.
188. 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.
189. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Скворцова А. И. „Тяговые расчеты. Справочник” // М.: Транспорт, 1987. г. – 272 с.
190. Kolomeičuks A., Dmitrijevs N. „Dzelzceļa ritošā sastāva automātiskās bremzes” // Rīga, RTU izdevniecība, 2010. g. – 449 lpp.
191. Altbergs T., Balckars P., Bukovskis V. u. c. „Dzelzceļi. Vispārīgais kurss” // Latvijas dzelzceļš, 1996. g. – 279 lpp.
192. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Некрасов О. А. и др. „Правила тяговых расчетов для поездной работы” // М.: Транспорт, 1985. г. – 289 с.
193. Смитиенко Б. М. „Мировая экономика” // М.: Юрайт-Издат, 2013. г. – 590 с.
194. Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД) „Основные принципы обеспечения безопасности и безотказности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики” // Польша, Варшава, 2006. г. – 24 с.
195. Mikulski J. „Activities of Transport Telematics” // Proceedings of „Communications in Computer and Information Science”, Vol. 395., Poland, Katowice-Ustron, 2013. – pp. 488.
196. Ļevčenko A., Potapovs A., Raņķis I. „Programmēšanas tehnoloģijas pamati studiju projektam (EEI345 3 kr.p.)” // RTU – 2011., 111 lpp. ISBN-978-9934-10-194-6
197. Mezītis M. „Vilcienu kustības intervālu regulēšanas mikroprocesoru sistēmas” // Rīga: RTU Izdevniecība, 2012. – 187 lpp.
198. Mezītis M. „Vilcienu kustības intervālu regulēšanas sistēmas (releju)” // Rīga: RTU Izdevniecība, 2007. g. – 297 lpp.
199. Зорина В. И., Астрахана В. И. „Унифицированное комплексное локомотивное устройство безопасности (КЛУБ-У)” // М: Маршрут", 2008. г. – 177 с.

200. Багажов В. В. „Системы безопасности движения для специального самоходного подвижного состава КЛУБ-П и КЛУБ-УП” // М: Маршрут", 2006 г. – 86 с.
201. Ning B. „Advanced Train Control Systems” // WIT Press, 2010. y. – 177 p.
202. Flammini F. „Railway Safety, Reliability, and Security: Technologies and Systems Engineering” // Idea Group,U.S., 2012. y. – 488 p.
203. G. Fregien, Paddison J., Beck M., Kock G. „Zeitgemäße Güterwagenausrüstung für hochwertige Transportaufgaben” // Knorr Bremse, 2013. j. – 19 s.
204. Gfatter G., Berger P., Krause G.,Vohla G. „Grundlagen der Bremstechnik Basics of Brake Technology” // Knorr Bremse, 2012. j. – 136 s.
205. Proakis J. G., Manolakis D. K. „Digital Signal Processing” // Prentice Hall, 2006. y. – 1004 p.
206. Gorobecs M., Korago I. „PSAFECER 2. Posma demonstratoru testēšanas plāns” // RTU, 2013. g. – 16 lpp.
207. Patel J. K., Campbell R. B. “Handbook of The Normal Distribution” // Southern Methodist University, Dallas, US, 1972. y. – 94 p.

PIELIKUMI

Pielikums 1.

Datoreksperimentu programmas kods (fragments)

```
<?php
set_time_limit(0);

/*
$kbrmin=-3;
$kbrmax=3;
$mvagmin=-10;
$mvagmax=10;
$nvagmin=-10;
$nvagmax=10;
*/

$kbrmin=1;
$kbrmax=4.2;
$mvagmin=20;
$mvagmax=100;
$nvagmin=2;
$nvagmax=60;

$conn = mysql_connect("localhost","","");
if (!mysql_select_db("AP_experiment_db",$conn)) die("problem with
db");

$_POST['exp'] = 800;
if (!isset($_POST['exp'])) $exptext=""; else {$exptext=" WHERE exp =
".$_POST['exp']; $exp=$_POST['exp'];}

$q=mysql_query("SELECT exp,nvag,mvag,kbr,vkmh FROM experiments
".$_exptext);

$expnum=0;
while ($row=mysql_fetch_object($q))
{
    $exps[$expnum]=$row->exp;
    $nvags[$expnum]=$row->nvag;
    $mvags[$expnum]=$row->mvag;
    $kbrs[$expnum]=$row->kbr;
    $vkmhs[$expnum]=$row->vkmh;
    $expnum++;
}

$sol=array(); //Array of all solutions

//===== MAIN PROGRAM
=====
for ($exp=0; $exp<$expnum; $exp++)
{
    print "<h2>Experiment Nr.$exps[$exp]</h2>";
    mysql_query("DELETE FROM train_curves");//WHERE exp=$exps[$exp]);

    print "<br>Kbr fact: $kbrs[$exp]
<br>Mvag fact: $mvags[$exp] t
<br>Nvag fact: $nvags[$exp]
<br>Vsak fact: $vkmhs[$exp] kmh";
}
```

```

    $sbrfact=modelling($exps[$exp], $kbrs[$exp], $mvags[$exp],
$nvags[$exp], $vkmhs[$exp], 0, 1000, 0, 1);

    $sp=Array();
    $vp=Array();
    $ap=Array();

    $ti=0;
    $q=mysql_query("SELECT dt,acc,vkmh,sp FROM train_curves WHERE
exp=$exps[$exp] ORDER BY dt ASC");
    while($row=mysql_fetch_object($q))
    {
        $ap[$ti]=$row->acc;
        $sp[$ti]=$row->sp;
        $vp[$ti]=$row->vkmh;
        if ($ti>20) if (abs($ap[$ti]-$ap[$ti-1])<0.2) break;
        $ti++;
    }
    $taconst=$ti;

    mysql_query("DELETE FROM modelling WHERE exp=$exps[$exp]");
    mysql_query("INSERT INTO modelling VALUES
($exps[$exp],$sbrfact,$taconst)");

    print "<br>S fact: ".round($sbrfact)." m";
    print "<br>T const: $taconst s";

    print "<br>4.1 36 53 - ".modelling($exps[$exp], 4.1, 36, 53,
$vkmhs[$exp], 0, 1000, 0, 0);
    //print "<br>".modelling($exps[$exp], $kbrs[$exp], $mvags[$exp],
$nvags[$exp], $vkmhs[$exp], 0, $taconst, 1, 0);

    print "<br><b>Results:</b>";

    /*perebor($vkmhs[$exp],0,$taconst);

    print "<br>Best kbrmax = ".$sol[0][0]."
    <br>and mvag = ".$sol[0][1]."
    <br>and nvag = ".$sol[0][2]."
    <br>Minimal error: ".$sol[0][3]."
    <br>Iterations: ".$sol[0][4];
    */
    /*
    linearrandom($vkmhs[$exp],0,$taconst);

    print "<br><br>Best kbrmax = ".$sol[1][0]."
    <br>and mvag = ".$sol[1][1]."
    <br>and nvag = ".$sol[1][2]."
    <br>Minimal error: ".$sol[1][3]."
    <br>Iterations: ".$sol[1][4];

    nonlinearrandom($vkmhs[$exp],0,$taconst);

    print "<br><br>Best kbrmax = ".$sol[2][0]."
    <br>and mvag = ".$sol[2][1]."
    <br>and nvag = ".$sol[2][2]."
    <br>Minimal error: ".$sol[2][3]."
    <br>Iterations: ".$sol[2][4];

    besttrial($vkmhs[$exp],0,$taconst);

```

```

print "<br><br>Best kbrmax = ".$sol[3][0]."
  <br>and mvag = ".$sol[3][1]."
  <br>and nvag = ".$sol[3][2]."
  <br>Minimal error: ".$sol[3][3]."
  <br>Iterations: ".$sol[3][4];

constradius($vkmhs[$exp],0,$taconst);

print "<br><br>Best kbrmax = ".$sol[4][0]."
  <br>and mvag = ".$sol[4][1]."
  <br>and nvag = ".$sol[4][2]."
  <br>Minimal error: ".$sol[4][3]."
  <br>Iterations: ".$sol[4][4];
*/

besttrialplus($vkmhs[$exp],0,$taconst);

print "<br><br>Best kbrmax = ".$sol[5][0]."
  <br>and mvag = ".$sol[5][1]."
  <br>and nvag = ".$sol[5][2]."
  <br>Minimal error: ".$sol[5][3]."
  <br>Iterations: ".$sol[5][4];

/*
print "<br><br>";
for ($alg=4; $alg<=4; $alg++)
{
  $sbrteor[$alg]=modelling($exps[$exp], $sol[$alg][0], $sol[$alg][1],
$sol[$alg][2], $vkmhs[$exp], 0, 1000, 0, 0);
  print "<br>Algorithm ".$alg+1).": $sbrteor[$alg] S fact: $sbrfact";
}
*/

}

//          =====
=====          FUNCTIONS
function map($x, $in_min, $in_max, $out_min, $out_max)
{
  return ($x - $in_min) * ($out_max - $out_min) / ($in_max - $in_min)
+ $out_min;
}
/*
function modelling($exp, $kbr, $mvag, $nvag, $vsakuma, $vmin, $tmax,
$adapt, $db)
{
  return (pow($kbr,2)+pow($mvag,2)+pow($nvag,2));
}
*/

function modelling($exp, $kbrmax, $mvag, $nvag, $vsakuma, $vmin,
$tmax, $adapt, $db)
{
  if ($adapt) global $sp;
  $Pbrm=0.5; $dp=0.02;
  $dt=1;
  $Pbcmax=0.38; $Pbcproc=0.3; $at=0;

  $vkmh = $vsakuma; //sak
  $vms = $vkmh/3.6;

```

```

$rez=0;
$sbr=0;

$Pbc=Array();
$ti=0;

for ($i=0; $i<$nvag; $i++) $Pbc[$i]=0;

for ($t=0; ($t<$tmax && $vkmh>$vmin); $t+=$dt)
{
  if ($db)
  {
    mysql_query("INSERT INTO train_curves VALUES
($exp,$ti,$at,$vkmh,$sbr)");
    //print "<br>$ti $at $vkmh $sbr";
  }
  if ($Pbrm>=0.44) $Pbrm-=$dp*$dt;
  $Fbrkop=0;

  for ($i=0; $i<$nvag; $i++)
  {
    $tkav = $i*14/170+2;
    $kbr = map($Pbc[$i],0.05, $Pbcmax, 0, $kbrmax);
    $Kapr = 2.22*$kbr*(16*$kbr+100)/(80*$kbr+100);
    $Fikapr = 0.27*( $vkmh+100)/(5*$vkmh+100);
    $Fbr = 1000*$Kapr*8*$Fikapr;
    $Fbrkop+=$Fbr;
  }
  $mkop=$mvag*$nvag;
  $q0 = $mvag/4;
  $w0 = 0.7+(3+0.09*$vkmh+0.002*$vkmh*$vkmh)/$q0;
  $Fber = $w0*$mkop;
  $at = ($Fber+$Fbrkop)*10/$mkop/1000;
  $vms -= $at*$dt;
  $vkmh = $vms*3.6;
  $sbr+= $vms*$dt;
  if ($adapt)
  {
    $rez+=pow(($sbr-$sp[$ti+1]),2);
    //print "<br>". $sbr." = ". $sp[$ti+1];
  }
  $ti++;
}
if ($adapt) {$rez=$rez/($ti-1); return $rez;} else return $sbr;
}

function perebor($vsak, $vbeig, $taconst)
{
global $sol;
$nvag = 2;
$mvag = 20;
$kbrmax = 0.6;

for ($k=0; $k<10000000; $k++)
{
  $kbrmax+=0.4;
  if ($kbrmax>4.2) {$mvag+=2; $kbrmax=1;}
  if ($mvag>120) {$nvag+=2; $mvag=20;}
  if ($nvag>100) {break;}
}
}

```

```

$rez=modelling(0,$kbrmax,$mvag,$nvag, $vsak, $vbeig, $taconst, 1, 0);

    if (!$k) $mn = $rez;

        if ($rez<$mn)
        {
            $sol[0][0]=$kbrmax;
            $sol[0][1]=$mvag;
            $sol[0][2]=$nvag;
            $mn=$rez;
            $sol[0][3]=$mn;
            $sol[0][4]=$k;
        }
    }
}

//----- Ar atkartojumu labaka gadijuma -----
-----

function linearrandom($vsak, $vbeig, $taconst)
{
    global $sol,$kbrmin,$kbrmax,$mvagmin,$mvagmax,$nvagmin,$nvagmax;
    $kbrbest = $kbr = 2.6;
    $mvagbest = $mvag = 50;
    $nvagbest = $nvag = 30;

    $bad=0;
    $rez=modelling(0,$kbr,$mvag,$nvag, $vsak, $vbeig, $taconst, 1, 0);
    $adaptstep=10;

    $prev=Array();
    do
    {
        {
            $prev[0]=rand(-$adaptstep/2,$adaptstep/2)/10;
            $prev[1]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
            $prev[2]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
        }
        while ($kbr+$prev[0]<$kbrmin || $kbr+$prev[0]>$kbrmax ||
            $mvag+$prev[1]<$mvagmin || $mvag+$prev[1]>$mvagmax ||
            $nvag+$prev[2]<$nvagmin || $nvag+$prev[2]>$nvagmax ||
            ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0));

    for ($k=0; $k<10000000; $k++)
    {
        $kbr+=$prev[0];
        $mvag+=$prev[1];
        $nvag+=$prev[2];

        $reznew = modelling(0,$kbr,$mvag,$nvag, $vsak, $vbeig, $taconst, 1,
0);

        if ($reznew<=$rez)
        {
            $bad=0;
            $rez=$reznew;
            $kbrbest = $kbr;
            $mvagbest = $mvag;
            $nvagbest = $nvag;
        }
        else

```

```

    {
    do
    {
        $prev[0]=rand(-$adaptstep/2,$adaptstep/2)/10;
        $prev[1]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
        $prev[2]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
    }
        while ($kbr+$prev[0]<$kbrmin || $kbr+$prev[0]>$kbrmax ||
            $mvag+$prev[1]<$mvagmin || $mvag+$prev[1]>$mvagmax ||
            $nvag+$prev[2]<$nvagmin || $nvag+$prev[2]>$nvagmax ||
            ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0));
$bad++;
    }

    if ($rez<0.0000001 || $bad>5000) break;
}

    $sol[1][0]=$kbrbest;
    $sol[1][1]=$mvagbest;
    $sol[1][2]=$nvagbest;
    $sol[1][3]=$rez;
    $sol[1][4]=$k;
}

//----- Ar atpakal soli -----
-----

function nonlinearrandom($vsak, $vbeig, $taconst)
{
    global $sol,$kbrmin,$kbrmax,$mvagmin,$mvagmax,$nvagmin,$nvagmax;

    $kbrbest = $kbr = 2.6;
    $mvagbest = $mvag = 50;
    $nvagbest = $nvag = 30;

    $bad=0;
    $rez=modelling(0,$kbr,$mvag,$nvag, $vsak, $vbeig, $taconst, 1, 0);
    $adaptstep=10;

    $prev=Array();
    do
    {
        {
            $prev[0]=rand(-$adaptstep/2,$adaptstep/2)/10;
            $prev[1]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
            $prev[2]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
        }
            while ($kbr+$prev[0]<$kbrmin || $kbr+$prev[0]>$kbrmax ||
                $mvag+$prev[1]<$mvagmin || $mvag+$prev[1]>$mvagmax ||
                $nvag+$prev[2]<$nvagmin || $nvag+$prev[2]>$nvagmax ||
                ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0));
    for ($k=0; $k<10000000; $k++)
    {
        $kbr+=$prev[0];
        $mvag+=$prev[1];
        $nvag+=$prev[2];

        $reznew = modelling(0,$kbr,$mvag,$nvag, $vsak, $vbeig, $taconst, 1,
0);

        if ($rez<=$reznew)
        {

```

```

    $bad++;
    $kbr-=$prev[0];
    $mvag-=$prev[1];
    $nvag-=$prev[2];
do
{
    $prev[0]=rand(-$adaptstep/2,$adaptstep/2)/10;
    $prev[1]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
    $prev[2]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
}
    while ($kbr+$prev[0]<$kbrmin || $kbr+$prev[0]>$kbrmax ||
           $mvag+$prev[1]<$mvagmin || $mvag+$prev[1]>$mvagmax ||
           $nvag+$prev[2]<$nvagmin || $nvag+$prev[2]>$nvagmax ||
           ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0));
else
{
    $bad=0;
    $rez=$reznew;
    $kbrbest = $kbr;
    $mvagbest = $mvag;
    $nvagbest = $nvag;
}

if ($rez<0.0000001 || $bad>5000) break;
}

$sol[2][0]=$kbrbest;
$sol[2][1]=$mvagbest;
$sol[2][2]=$nvagbest;
$sol[2][3]=$rez;
$sol[2][4]=$k;
}

//----- Labaka meginajuma -----
-----
function besttrial($vsak, $vbeig, $taconst)
{
    global $sol,$kbrmin,$kbrmax,$mvagmin,$mvagmax,$nvagmin,$nvagmax;

    $kbr = 2.6;
    $mvag = 50;
    $nvag = 30;

    $N = 40;
    $bad=0;

    $rez=modelling(0,$kbr,$mvag,$nvag, $vsak, $vbeig, $taconst, 1, 0);
    $adaptstep=40;

    $prev=Array();
    $best=Array();

for ($k=0; $k<280000; $k++)
{
    for ($tr=0; $tr<$N; $tr++)
    {
        do
        {
            $prev[0]=rand(-$adaptstep/2,$adaptstep/2)/10;
            $prev[1]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
            $prev[2]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);

```

```

}
while ($kbr+$prev[0]<$kbrmin || $kbr+$prev[0]>$kbrmax ||
      $mvag+$prev[1]<$mvagmin || $mvag+$prev[1]>$mvagmax ||
      $nvag+$prev[2]<$nvagmin || $nvag+$prev[2]>$nvagmax ||
      ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0));
  $reztr=modelling(0,$kbr+$prev[0],$mvag+$prev[1],$nvag+$prev[2],
$vsak, $vbeig, $taconst, 1, 0);
  print "<br>Trial   $tr:   " . ($kbr+$prev[0]) . "   " . ($mvag+$prev[1]) . "
" . ($nvag+$prev[2]) . "   " . $reztr;

  if (!isset($rezmin))
  {
    $rezmin=$reztr;
    $best[0]=$prev[0]; $best[1]=$prev[1]; $best[2]=$prev[2];
  }
  else
    if ($reztr<$rezmin)
    {
      $rezmin=$reztr;
      $best[0]=$prev[0]; $best[1]=$prev[1]; $best[2]=$prev[2];
    }
}
print "<h2>$k</h2>";
print "<br><br><b>Best   selected:   $rezmin   " . ($kbr+$best[0]) . "
" . ($mvag+$best[1]) . "   " . ($nvag+$best[2]) . "</b><br>";

if ($rezmin<$rez)
{
  $rez=$rezmin;
  $kbr+=$best[0];
  $mvag+=$best[1];
  $nvag+=$best[2];
  $bad=0;
}
else
{
  $adaptstep*=0.8;
  $bad++;
  if ($adaptstep<1)
  {
    $adaptstep=40;
    $bad=0;
    do
    {
      $prev[0]=rand(-$adaptstep/2,$adaptstep/2)/10;
      $prev[1]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
      $prev[2]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
    }
    while ($kbr+$prev[0]<$kbrmin || $kbr+$prev[0]>$kbrmax ||
          $mvag+$prev[1]<$mvagmin || $mvag+$prev[1]>$mvagmax ||
          $nvag+$prev[2]<$nvagmin || $nvag+$prev[2]>$nvagmax ||
          ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0));

    $kbr+=$prev[0];
    $mvag+=$prev[1];
    $nvag+=$prev[2];
    $rez=modelling(0,$kbr,$mvag,$nvag, $vsak, $vbeig, $taconst, 1,
0);
  }
}
unset($rezmin);

```

```

print "<br><b>Current point: $kbr $mvag $nvag</b><br>";
print "<br><b>Current minimum: $rez. Step: $adaptstep</b><br>";
if ($rez<0.0000001) break;
}
$sol[3][0]=$kbr;
$sol[3][1]=$mvag;
$sol[3][2]=$nvag;
$sol[3][3]=$rez;
$sol[3][4]=$k*$N;
}

//----- Ar pastavimo radiusu -----
-----
function constradius($vsak, $vbeig, $taconst)
{
  global $sol,$kbrmin,$kbrmax,$mvagmin,$mvagmax,$nvagmin,$nvagmax;

  $kbr = 2.6;
  $mvag = 40;
  $nvag = 30;

  $R = 20;
  $N = 40;
  $bad=0;

  $rez=modelling(0,$kbr,$mvag,$nvag, $vsak, $vbeig, $taconst, 1, 0);

  $prev=Array();
  $best=Array();

  for ($k=0; $k<280000; $k++)
  {
    for ($tr=0; $tr<$N; $tr++)
    {
      do
      {
        $prev[0]=round($R*cos(rand(0,628)/100)*10)/10;
        $prev[1]=round($R*cos(rand(0,628)/100))*10;
        $prev[2]=round($R*cos(rand(0,628)/100))*10;
        //if ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0) $R*=1.1;
      }
      while ($kbr+$prev[0]<$kbrmin || $kbr+$prev[0]>$kbrmax ||
        $mvag+$prev[1]<$mvagmin || $mvag+$prev[1]>$mvagmax ||
        $nvag+$prev[2]<$nvagmin || $nvag+$prev[2]>$nvagmax ||
        ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0));

      $reztr=modelling(0,$kbr+$prev[0],$mvag+$prev[1],$nvag+$prev[2],
        $vsak, $vbeig, $taconst, 1, 0);
      print "<br>Trial $tr:    ".$kbr+$prev[0]."    ".$mvag+$prev[1]."
        ".$nvag+$prev[2]."    ".$reztr;

      if (!isset($rezmin))
      {
        $rezmin=$reztr;
        $best[0]=$prev[0]; $best[1]=$prev[1]; $best[2]=$prev[2];
      }
      else
      if ($reztr<$rezmin)
      {
        $rezmin=$reztr;
        $best[0]=$prev[0]; $best[1]=$prev[1]; $best[2]=$prev[2];
      }
    }
  }
}

```

```

    }
  }
  print "<h2>$k</h2>";
  print "<br><br><b>Best selected: $rezmin (".$best[0])."
".($best[1])." ".$best[2])."</b><br>";

  if ($rezmin<$rez)
  {
    $rez=$rezmin;
    $kbr+=round($best[0]*10)/10;
    $mvag+=round($best[1]);
    $nvag+=round($best[2]);
    $bad=0;
    $R*=1.1;
  }
  else
  {
    $R*=0.9;
    $bad++;
    if ($R<1)
    {
      $R=20;
      $bad=0;
    }
  }
  do
  {
    $prev[0]=round($R*cos(rand(0,628)/100)*10)/10;
    $prev[1]=round($R*cos(rand(0,628)/100));
    $prev[2]=round($R*cos(rand(0,628)/100));
    //if ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0) $R*=1.1;
  }
  while ($kbr+$prev[0]<$kbrmin || $kbr+$prev[0]>$kbrmax ||
        $mvag+$prev[1]<$mvagmin || $mvag+$prev[1]>$mvagmax ||
        $nvag+$prev[2]<$nvagmin || $nvag+$prev[2]>$nvagmax ||
        ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0));

    $kbr+=round($prev[0]*10)/10;
    $mvag+=round($prev[1]);
    $nvag+=round($prev[2]);
    $rez=modelling(0,$kbr,$mvag,$nvag,$vsak,$vbeig,$taconst,1,
0);
  }

}

unset($rezmin);
print "<br><b>Current point: $kbr $mvag $nvag</b><br>";
print "<br><b>Current minimum: $rez. Radius: $R</b><br>";
if ($rez<0.0000001) break;
}
$sol[4][0]=$kbr;
$sol[4][1]=round($mvag);
$sol[4][2]=round($nvag);
$sol[4][3]=$rez;
$sol[4][4]=$k*$N;
}

//----- Labaka meginajuma + skirosana beigas-----
-----
function besttrialplus($vsak,$vbeig,$taconst)
{
  global $sol,$kbrmin,$kbrmax,$mvagmin,$mvagmax,$nvagmin,$nvagmax;

```

```

$kbr = 2.6;
$mvag = 50;
$nvag = 30;

$N = 100;
$bad=0;

$rez=modelling(0,$kbr,$mvag,$nvag, $vsak, $vbeig, $taconst, 1, 0);
$adaptstep=40;

$prev=Array();
$best=Array();

$iter=1;

for ($k=0; $k<280000; $k++)
{
$trmax = ceil($adaptstep)*ceil($adaptstep)*ceil($adaptstep)*4;
print "<br>Trial max = $trmax";
$N = 1000/$adaptstep;

for ($str=0; $str<$N; $str++)
{
if ($N<$trmax)
{
do
{
$prev[0]=rand(-$adaptstep/2,$adaptstep/2)/10;
$prev[1]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
$prev[2]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
}
while ($kbr+$prev[0]<$kbrmin || $kbr+$prev[0]>$kbrmax ||
$mvag+$prev[1]<$mvagmin || $mvag+$prev[1]>$mvagmax ||
$nvag+$prev[2]<$nvagmin || $nvag+$prev[2]>$nvagmax ||
($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0));
}
else
{
if ($str==0)
{
$prev[0]=-round($adaptstep/2)/10;
$prev[1]=-round($adaptstep);
$prev[2]=-round($adaptstep);
}
else
{
$prev[0]+=0.1;
if ($prev[0]>=$adaptstep/2/10) {$prev[0]=-round($adaptstep/2)/10;
$prev[1]++;}
if ($prev[1]>=$adaptstep) {$prev[1]=-round($adaptstep);
$prev[2]++;}
if ($prev[2]>=$adaptstep) {break;}
}
}
$reztr=modelling(0,$kbr+$prev[0],$mvag+$prev[1],$nvag+$prev[2],
$vsak, $vbeig, $taconst, 1, 0);
$iter++;
print "<br>Trial $str: " . ($kbr+$prev[0]) . " " . ($mvag+$prev[1]) . "
" . ($nvag+$prev[2]) . " " . $reztr;

```

```

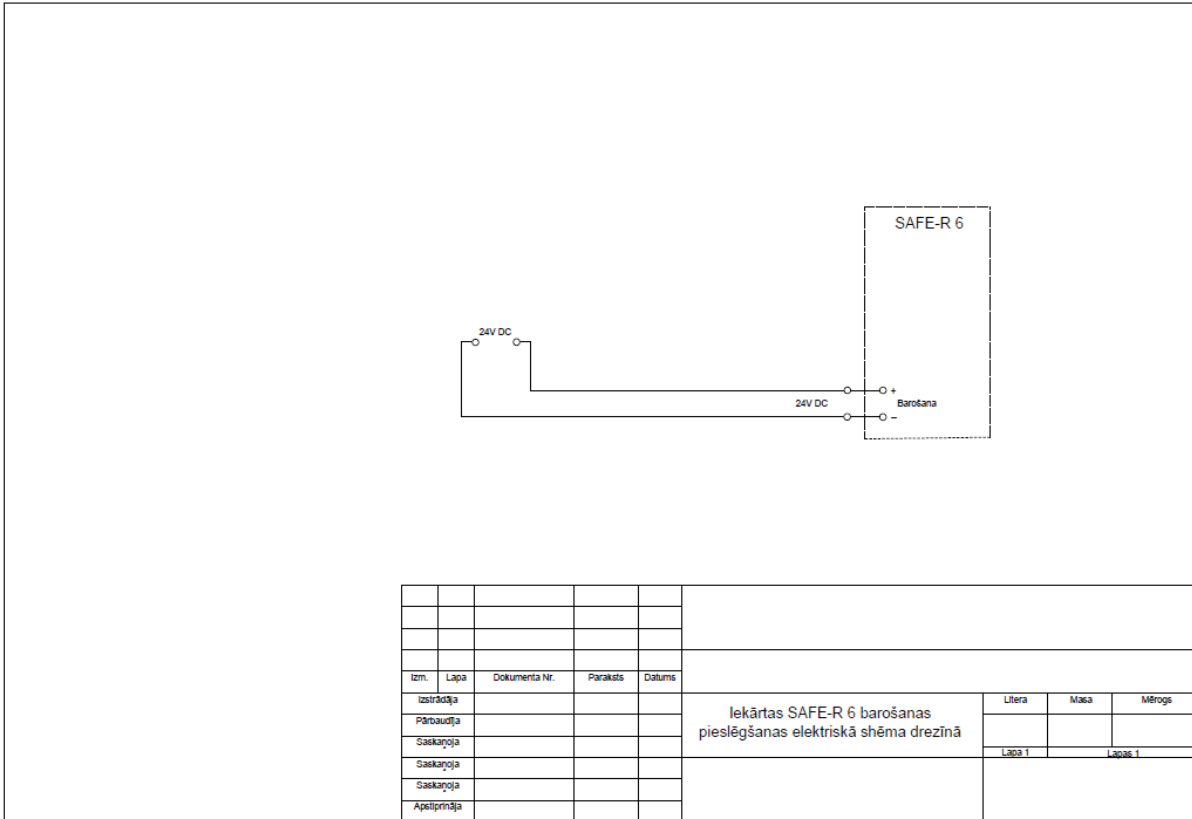
if (!isset($rezmin))
{
    $rezmin=$reztr;
    $best[0]=$prev[0]; $best[1]=$prev[1]; $best[2]=$prev[2];
}
else
    if ($reztr<$rezmin)
    {
        $rezmin=$reztr;
        $best[0]=$prev[0]; $best[1]=$prev[1]; $best[2]=$prev[2];
    }
}
print "<h2>$k</h2>";
print "<br><br><b>Best selected: $rezmin (".$kbr+$best[0])."
" ".$mvag+$best[1])." ".$nvag+$best[2])."</b><br>";

if ($rezmin<$rez)
{
    $rez=$rezmin;
    $kbr+=$best[0];
    $mvag+=$best[1];
    $nvag+=$best[2];
    $bad=0;
}
else
{
    $adaptstep*=0.8;
    $bad++;
    if ($adaptstep<1 || $trmax<$N)
    {
        $adaptstep=40;
        $bad=0;
        do
        {
            $prev[0]=rand(-$adaptstep/2,$adaptstep/2)/10;
            $prev[1]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
            $prev[2]=rand(-$adaptstep,$adaptstep);
        }
        while ($kbr+$prev[0]<$kbrmin || $kbr+$prev[0]>$kbrmax ||
            $mvag+$prev[1]<$mvagmin || $mvag+$prev[1]>$mvagmax ||
            $nvag+$prev[2]<$nvagmin || $nvag+$prev[2]>$nvagmax ||
            ($prev[0]==0 && $prev[1]==0 && $prev[2]==0));
        $kbr+=$prev[0];
        $mvag+=$prev[1];
        $nvag+=$prev[2];
        $rez=modelling(0,$kbr,$mvag,$nvag, $vsak, $vbeig, $taconst, 1,
0);
    }
}
unset($rezmin);
print "<br><b>Current point: $kbr $mvag $nvag</b><br>";
print "<br><b>Current minimum: $rez. Step: $adaptstep</b><br>";
if ($rez<0.0000001) break;
}

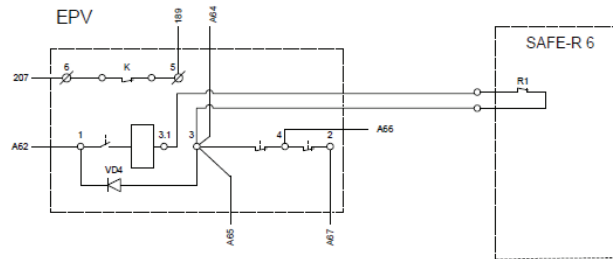
$sol[5][0]=$kbr;
$sol[5][1]=$mvag;
$sol[5][2]=$nvag;
$sol[5][3]=$rez;
$sol[5][4]=$iter;
}

```


Pielikums 4.

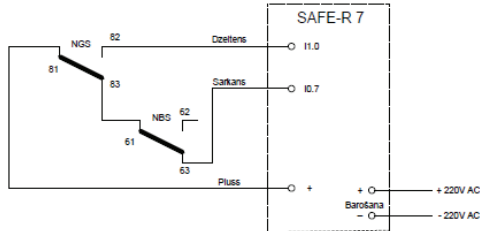


Pielikums 5.



Izm.	Lapa	Dokumenta Nr.	Paraksts	Datums										
					Iekārtas SAFE-R 6 pieslēgšanas pie drezīnas EPV elektriskā shēma									
					<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">Litera</td> <td style="width: 25%;">Maka</td> <td style="width: 50%;">Mērogs</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Lapa 1</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">Lapas 1</td> </tr> </table>	Litera	Maka	Mērogs				Lapa 1	Lapas 1	
Litera	Maka	Mērogs												
Lapa 1	Lapas 1													

Pielikums 6.



Izm.	Lapa	Dokumenta Nr.	Paraksts	Datums	
					Iekārtas SAFE-R 7 pieslēgšanas shēma releju skapī ŠRUM-1
					Liters Mērogs
					Lapa 1 Lapa 1