

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

PROMOCIJAS DARBS

Ivars Alps

2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Industriālās elektronikas un elektrotehnoloģiju katedra

Ivars Alps

Elektrotehnoloģiju datorvadības doktora studiju programma

**Intelektuālā elektrotransporta vadības sistēmu
sarakstu problēmu modelēšana neparedzētos
gadījumos**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs

Dr. sc. ing., profesors

A. Ļevčenkovs

Rīga – 2012



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, Ivars Alps, apliecinu, ka elektroniski ORTUS sistēmā augšuplādētā noslēguma darba „Intelektuālā elektrotransporta vadības sistēmu sarakstu problēmu modelēšana neparedzētos gadījumos” 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 noslēguma darbu vērtēšanas komisijai.

2012.gada 13. decembris.

/I. Alps/

PATEICĪBAS

Liels paldies visiem, kuri ir atbalstījuši šī promocijas darba izstrādi. Vislielāko 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, padomiem un konsultācijām tehniskos un praktiskos jautājumos, par atbalsta sniegšanu gan studiju laikā, gan šī promocijas darba izstrādē.

Pateicos RTU zinātniekiem; profesoram Iljam Galkinam, asociētajiem profesoriem Anastasijai Žiraveckai, Nadeždai Kuņicinai, Oskaram Krievam, Jānim Valeinim, Viesturam Bražim, laboratorijas vadītājam Ansim Avotiņam un projektu vadītājai Aijai Laicānei par veiksmīgo sadarbību studiju laikā. Tāpat pateicība tiek izteikta 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 padomiem doktorantūras studiju laikā.

Izsaku pateicību visiem kolēģiem no profesora Anatolija Ļevčenkova doktorantu grupas par padomiem un praktisku palīdzību eksperimentu veikšanā un iekārtu datorprogrammu sastādīšanā.

Tāpat pateicība tiek izteikta Eiropas Savienības Sociālajam fondam par finansiālo atbalstu studijām.

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

Anotācija

Promocijas darba mērķis ir izpētīt un izstrādāt informācijas plūsmu apstrādes algoritmus pilsētas transporta, tai skaitā elektrotransporta, kustības datorvadībai ar mākslīgā intelekta iekārtām un sarakstu teorijas metodēm.

Promocijas darbs sastāv no ievada, piecām nodaļām, secinājumiem izmantotās literatūras saraksta un pielikuma

Promocijas darba pirmajā nodaļā analizēta esošā pilsētas transporta sistēma, klasificēti transporta sistēmas elementi un to savstarpējā mijiedarbība, no kopu teorijas viedokļa izveidots pilsētas transporta sistēmas matemātiskais modelis, definēti konstantie un mainīgie sistēmas kopu elementi, formulēta sarakstu teorijas uzdevumu nostādne un definētas mērķa funkcija uzdevuma risināšanai

Promocijas darba otrajā nodaļā ir izstrādāti algoritmi gan mērķa funkcijas kopējās vērtības gan katra atsevišķā kritērija, aprēķināšanai, izstrādāta procedūra evolucionāro algoritmu, ģenētiskā un imūnā, pielietojumam transporta plūsmu vadības uzlabošanai.

Promocijas darba trešajā nodaļā aprakstīts izstrādātā iebūvētā iekārta, parādītas iekārtas un tās atsevišķo komponentu elektriskās shēmas, analizētas pieslēgumvietas intelektuālā transporta sistēmas infrastruktūras objektiem, pārbrauktuvē, ceļu transporta vienībām un sliežu transporta vienībām.

Promocijas darba ceturtajā nodaļā algoritmu aprobācijai diviem transporta plūsmu vadīšanas uzdevumiem tiek izveidots vienkāršots pilsētas sliežu un autotransporta vienību kustības pētīšanas datormodelis ar noteiktu pārbrauktuvi, sliežu un autotransporta vienību skaitu un to kustības sarakstiem. Transporta sistēmas fragmenta vadība tiek modelēta veicot vairākas eksperimentu sērijas saskaņā ar izstrādātajiem algoritmiem.

Promocijas darba piektajā nodaļā tiek analizēti un novērtēti iegūtie eksperimentu rezultāti. Jaunizveidoto sarakstu nobīdes tiek novērtēti ar hipotēžu pārbaudi izmantojot statistiskās novērtēšanas metodes, z-testa, hī-kvadrāta un Kolmogorova-Smirnova testiem.

Promocijas darba eksperimentu analīze norāda uz to, ka izstrādātie transporta sistēmas vadības algoritmi samazina elektroenerģijas patēriņu, palielina dzelzceļa pārbrauktuvi caurlaides spēju, samazina transporta dīkstāves laiku un samazina sliežu un autotransporta sadursmju varbūtību.

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā uz 155 lpp., satur ievadu, piecas nodaļas, secinājumus, 1 pielikumu, 32 attēlus un 70 tabulas. Izmantotās literatūras sarakstā ir atsauces uz 101 informācijas avotu.

Annotation

The promotion paper consists of the introduction, five chapters, conclusions and list of the applied literature sources.

The first chapter of the promotion paper analyses the existing systems of the city transport, classifies the elements of the system and their interoperation; the mathematical model of the transport system is developed from the set theory point of view, the constant and variable elements are defined in the system, the detailed mathematical model of the research object – transport system element – crossing – is developed, the task of the schedule theory is stated and the target function is defined for the solution of this task in accordance with computer control of the electric transport movement by means of embedded device and schedule theory.

The second chapter of the promotion paper contains the description of the developed algorithms for the calculation of each criterion as well as the total value of the target function. Therefore the application of the immune and genetic algorithms allowed developing the model of transport system control.

The third chapter describes the developed embedded device, the electrical circuits of it and its components; the connection of the intelligent transport system to the elements of infrastructure, crossings, and city transport and railway transport units is analysed.

The opportunities of the investigated algorithms application for the control of city transport are researched in the fourth chapter. A real existing transport system of Riga is investigated at the particular parts of the city; and for the approbation of the algorithm a simplified computer model of railway and auto transport movement at the particular crossing was developed with determined number of transport units and their schedule. The control of the transport system fragment is modeled in accordance with the developed algorithms realizing different sets of experiments.

The fifth part of the promotional paper analyses and evaluates the results obtained in the previous chapter. According to the target function criteria the proposed changes of transport schedules of genetic and immune algorithms for each separate criterion as well as for the target function in general. The evaluation of the schedules changes was realized by means of the statistical evaluation method according to z-criterion, chi-square and Kolmogorov-Smirnov test.

Thesis written in the Latvian language on page 155, contains an introduction, five chapters, conclusions, annex, 32 pictures, 70 tables. The bibliography contains references to 101 sources of information.

Аннотация

Целью диссертации являются исследование и разработка алгоритмов обработки потоков данных для управления городской транспортной системой, а, следовательно, и электротранспортом, с применением устройств с искусственным интеллектом и методов теории расписания. Диссертация состоит из введения, пяти основных глав, выводов и списка использованной литературы.

В первой главе диссертации произведён анализ существующей системы городского транспорта, произведена классификация элементов системы, их взаимодействие, с точки зрения теории множеств создана математическая модель транспортной системы, определены постоянные и переменные множества, сформулирована постановка задачи теории расписания и целевая функция для решения задачи.

Во второй главе диссертации разработаны алгоритмы для расчета значения, как для общей целевой функции, так и для каждого критерия целевой функции отдельно. разработана модель для управления транспортной системой с применением иммунного и генетического алгоритмов.

В третьей главе диссертации разработан прототип встроенного устройства, рассмотрены электрические схемы прототипа в целом и отдельных его компонентов, установлены места подключения к объектам инфраструктуры интеллектуальной транспортной системы, переездам, к единицам рельсового и дорожного транспорта.

В четвертой главе диссертации для апробации разработанных алгоритмов создана упрощенная компьютерная модель управления городским рельсовым и дорожным транспортом с определением количества переездов и единиц транспорта и их расписания движения. Модель управления фрагментом городской транспортной системы построена в результате проведения нескольких серий экспериментов в соответствии с разработанными алгоритмами.

В пятой главе диссертации произведена оценка и анализ полученных в процессе моделирования результатов. Изменения в расписании осуществляются методом проверки гипотез с применением статистической оценки z-тестом, тестом Колмогорова-Смирнова и хи-квадрата.

Анализ результатов, полученных в процессе экспериментов, указывает на то, что применение разработанных алгоритмов управления транспортной системой повышают пропускную способность железнодорожных переездов, уменьшают время

простая дорожного транспорта и снижают вероятность столкновения единиц дорожного и рельсового транспорта.

Диссертация написана на латышском языке на 155 страницах, содержит введение, пять глав, выводы, приложение, 32 рисунков, 70 таблиц. В списке использованной литературы есть ссылки на 101 источник информации.

SATURS

Ievads	13
Tēmas aktualitāte	13
Literatūras apskats	14
Darba mērķis un uzdevumi	25
Pētījuma līdzekļi un metodes	25
Darba zinātniskā novitāte.....	25
Darba praktiskais pielietojums.....	26
Darba aprobācija	27
Autora publikācijas	28
Izstrādātie patenti	30
1. Uzdevuma nostādne transporta kustības sarakstu informācijas sistēmas vadībai neparedzētos gadījumos	31
1.1. Situācijas raksturojums	31
1.2. Neparedzēti gadījumi transporta sistēmā	31
1.3. Elektroenerģijas patēriņu iespaidojošie kritēriji	32
1.4. Pilsētas transporta sistēmas analīze	33
1.4.1. Esošās transporta sistēmas analīze.....	33
1.4.2. Piedāvātā pilsētas transporta sistēma	36
1.4.3. Pilsētas transporta sistēmas kopu apraksts.....	38
1.4.4. Procesoru apraksts	40
1.4.5. Izstrādātais pārbrauktuves matemātiskais modelis	41
1.5. Sarakstu teorijas uzdevumu matemātiskā nostādne	46
1.5.1. Sarakstu sastādīšanas uzdevumi viena procesora gadījumā	46
1.5.2. Daudzprocesoru sarakstu sastādīšana paralēliem procesoriem.....	50
1.5.3. Konveijera tipa daudzprocesoru saraksti	53
1.6. Izstrādātā mērķa funkcija uzdevuma risināšanai	55
1.7. Izvirzītā hipotēze.....	58
1.8. Secinājumi par pirmo nodaļu	59
2. Izstrādātie algoritmi transporta sistēmas informācijas plūsmu vadībai un kustības sarakstu veidošanai	60
2.1. Situācijas raksturojums	60

2.2.	Mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanas algoritms pēc elektrotransporta patērētās enerģijas kritērija	60
2.3.	Elektroenerģijas patēriņa aprēķina algoritms.....	63
2.4.	Mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanas algoritms pēc pārbrauktuves šķērsošanas kritērija.....	66
2.4.1.	Dažādu transporta veidu vienību vienlaicīgas atrašanās plūsmu krustošanās punktos varbūtības aprēķināšanas algoritms.....	66
2.4.2.	Dzelzceļa transporta pretējos virzienos braucošo vienību vienlaicīgas atrašanās plūsmu krustošanās punktos laika kritērija noteikšanas algoritms.....	67
2.4.3.	Autotransporta līdzekļu summārā dīkstāves laika noteikšanas algoritms un kustības sarakstu nobīdes formula	69
2.4.4.	Mērķa funkcijas kopējās vērtības aprēķina algoritms.....	69
2.5.	Evolucionāro algoritmu izmantošana transporta plūsmu vadības uzlabošanai....	70
2.5.1.	Dubultās populācijas imūnais algoritms transporta plūsmu vadības uzlabošanai.....	70
2.5.2.	Ģenētiskais algoritms transporta plūsmu vadības uzlabošanai.....	74
2.6.	Secinājumi par otro nodaļu	76
3.	Iebūvēto iekārtu pielietošanas iespējas sarakstu uzdevumu risināšanai un to integrēšana transporta sistēmā	77
3.1.	Situācijas raksturojums	77
3.2.	Izstrādātās iebūvētās iekārtas principiālā shēma.....	77
3.2.1.	Iebūvētās iekārtas elektriskā shēma	77
3.2.2.	Pārbrauktuves vadīšana ar iebūvēto iekārtu.....	82
3.2.3.	Lokomotīves avārijas bremzēšanas iekārtas vadīšana ar iebūvēto iekārtu ..	84
3.2.4.	Iekārtas uzstādīšana autobusu vadībai	85
3.2.5.	Konvertora elektriskā shēma.....	86
3.3.	Secinājumi par trešo nodaļu	87
4.	Sabiedriskā transporta datormodelēšanas eksperimentu rezultāti.....	88
4.1.	Situācijas raksturojums	88
4.2.	Datormodelis pilsētas elektrotransporta kustības vadības algoritmu darbības pārbaudei.....	88
4.3.	Datormodelis pārbrauktuves šķērsošanas algoritmu darbības pārbaudei	91
4.4.	Imūnā algoritma pielietojums mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanai	98
4.5.	Ģenētiskā algoritma pielietojums mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanai	100

4.6.	Datormodelī iegūtie rezultāti	102
4.6.1.	Pilsētas transporta datormodelēšanas rezultāti.....	102
4.6.2.	Dzelzceļa un autotransporta datormodelēšanas rezultāti	102
4.7.	Secinājumi par ceturto nodaļu	102
5.	Eksperimentu rezultātu novērtējums izmantojot hipotēžu statistiskās novērtēšanas metodi	104
5.1.	Situācijas raksturojums	104
5.2.	Hipotēžu pārbaudes iespējamās kļūdas.....	104
5.3.	Eksperimentu rezultātu novērtēšana un statistisko hipotēžu pārbaude.....	105
5.3.1.	Elektroenerģijas patēriņa uzdevums	105
5.3.2.	Pārbrauktuves šķērsošanas uzdevums.....	107
5.4.	Ģenētiskā un imūnā algoritma salīdzinājums pēc eksperimentu datiem	109
5.4.1.	Pilsētas elektrotransporta uzdevuma algoritmu salīdzinājums	109
5.4.2.	Pārbrauktuves šķērsošanas uzdevuma algoritmu salīdzinājums.....	111
5.5.	Secinājumi par piekto nodaļu.....	117
	Secinājumi.....	118
	Izmantotie informācijas avoti	120
	Pielikums.....	128

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Pieaugot transporta vienību skaitam un palielinoties kustības intensitātei aizvien aktuālāka mūsdienās kļūst transporta plūsmu vadīšana un organizēšana ne tikai lielpilsētās, bet arī reģionos. Lai arī pilsētu atbildīgie dienesti strādā pie šīs problēmas risināšanas, realitātē transporta sastrēgumi un transporta līdzekļu sadursmes ir kļuvušas par ikdienas parādību. Precīzi noteikt sadursmju rezultātā izraisītos zaudējumus, sastrēgumos patērētās enerģijas un nelietderīgi pavadītā laika ietekmi uz valsts un atsevišķu iedzīvotāju ekonomiskajiem rādītājiem noteikt ir sarežģīti, bet to, ka šī ietekme ir negatīva, var apgalvot noteikti.

Ja sastrēgumi pārsvarā gadījumu tikai palielina transporta līdzekļa un to pasažieru ceļā pavadīto laiku un enerģijas patēriņu, tad transporta vienību sadursmes jau ir saistītas ar daudz nopietnākiem zaudējumiem un pat cilvēku bojāeju. Sevišķi smagas sekas ir saduroties dzelzceļa un autotransporta vienībām. Lūk, tikai daži fakti par pēdējo 15 gadu laikā Latvijā notikušo katastrofām saistībā ar dzelzceļa un autotransporta sadursmēm. 2001. gadā uz neapsargātas dzelzceļa pārbrauktuves Ogres rajona Jumpravā notika vilciena un kravas automašīnas sadursme, negadījuma rezultātā no sliedēm noskrēja divi vagoni. Smagajai automašīnai ietriecoties elektrovilcienā Rīga - Aizkraukle, bojā gājuši divi un cietuši vēl divi no automašīnā braucošajiem cilvēkiem. 2008. gadā Tukuma rajona Slampē uz neapsargātas dzelzceļa pārbrauktuves mikroautobuss sadūrās ar dīzeļvilcienu. Avārijas rezultātā gāja bojā divi cilvēki. 2010. gadā Bolderājā uz neapsargātas dzelzceļa pārbrauktuves elektrovilciens sadūrās ar vieglo auto. Šoreiz laimīgā kārtā bojāta tikai tehnika. Ventspilī 2011.gada martā notiek avārija un atkal uz dzelzceļa pārbrauktuves sadūrās vilciens un kravas automašīna.

Pēdējais smagākais negadījums uz dzelzceļa notika 2011.gada 29.martā, kad Ķegumā uz dzelzceļa pārbrauktuves elektrovilciens sadūrās ar kravas auto, kurš veda kokmateriālus. Arī šoreiz iztika bez cilvēku upuriem, bet nodarīti ievērojami materiāli zaudējumi gan Latvijas dzelzceļam gan transportfirmām, kura veica pārvadājumus. Aizvien notiek tiesvedība un avārijas cēloņu izmeklēšana.

Avārijas uz dzelzceļa pārbrauktuvē notiek visās pasaules valstīs. Jebkurā valstī, kurā ir dzelzceļa transports ir novērojams lielāks vai mazāks skaits negadījumu autotransportam šķērsojot dzelzceļa sliežu ceļus un šajos negadījumos bojāgājušo un ievainoto skaits ir dramatisks.

Pēc ASV Federālā Dzelzceļa Administrācijas biroja (FRA) datiem [57] no 1975. gada 31. maijam ASV ir reģistrēti 213814 nelaimes gadījumi autotransportam šķērsojot dzelzceļa pārbrauktuves, kuros bojā gājuši 20421 un 79469 ievainoti. Kā teikts šajā pārskatā, pārsvarā negadījumi notikuši "neapdomāta braukšanas stila vai neuzmanības dēļ" tātad cilvēciskā faktora ietekmē.

Kā ziņots European Railway Agency [24] pārskatā 2010. gadā ievērojama nelaimes gadījumu daļa dzelzceļa transportā Eiropā ir saistīta tieši ar pārbrauktuves šķērsošanu. Organizācija NSA (National Safety Authorities) ir ziņojusi par 3774 nelaimes gadījumiem saistībā ar pārbrauktuves šķērsošanu un šo nelaimes gadījumu rezultātā no 2006. līdz 2008. gadam bojā ir gājuši 1287 cilvēki.

Nemot vērā visu augstākminēto var secināt, ka, neskatoties uz jau izstrādātajām transporta plūsmu vadīšanas procedūrām, pietiekošs drošuma līmenis nav sasniegts un ir nepieciešamas vēl drošākas transporta plūsmu vadīšanas procedūras. Tādēļ promocijas darbā tiek piedāvāts risinājums sekojošiem uzdevumiem;

- izmantojot iebūvētās iekārtas, sarakstu teorijas un evolucionāros algoritmus samazināt līdz minimumam iespēju, ka autotransports un dzelzceļa transports maršrutu krustpunktos atrastos vienlaicīgi, t.i. novēršot šo transporta līdzekļu sadursmes iespējamību,
- palielināt dzelzceļa pārbrauktuves caurlaides spēju, tādējādi samazinot sabiedriskā un cita veida transporta gaidīšanas laiku pie slēgtām pārbrauktuves,
- rekomendējot transporta līdzekļiem piemērotāku pārvietošanās ātrumu visā maršrutā samazināt sabiedriskā elektrotransporta gaidīšanas laiku sastrēgumos, biežu bremsēšanu ar sekojošu paātrināšanos, kas tieši ietekmē elektroenerģijas patēriņu, nodrošināt sabiedriskā transporta pasažierus ar augsta līmeņa komfortu un drošiem pārvadājumu pakalpojumiem.

Promocijas darbs saistīts ar pilsētas transporta sistēmas plūsmu vadību ar mērķi uzlabot sabiedriskā elektrotransporta vienību kustību maršrutos, samazināt pilsētas transporta kopējo dīkstāves laiku un nodrošināt dažādo transporta tipu kustību plūsmu vadību krustojšanās punktos samazinot avāriju iespējamību.

Literatūras apskats

Transporta plūsmu vadīšana ir cieši saistīta ar plānošanu; sarakstiem, sakārtošanu, secības noteikšanu. Plānošanas uzdevumu risināšanai zinātne pievēršas līdz ar rūpniecības attīstību 20. g. sākumā, tomēr pirmie nopietnie zinātniskie raksti un pētījumi par sarakstu

teorijas izmantošanu parādījās gadsimta vidū 50 tajos gados. Jau sarakstu teorijas attīstības pirmsākumos kļuva skaidrs, ka ar optimizāciju saistīto sakārtošanas uzdevumu risināšana ir darbietilpīgs process un ne vienmēr iespējama šāda veida uzdevumu atrisināšana. Pietiekoši plaši un pilnīgi sakārtošanas uzdevumu risināšanas metodes ir aprakstītas vairāku autoru darbos. Lielu ieguldījumu sarakstu teorijas kā zinātnes attīstībā ir devuši tādi zinātnieki kā R.L. Grahams (Ronald L. Graham) V.S. Tanajevs (Танаев В. С.), R. Konvejs (R. Conway).

M. Pinedo (Michael Pinedo) darbā [65] aplūko plānošanas uzdevumu teorētiskos modeļus un to pielietojanas iespējas reālos apstākļos ražošanā. Tiek pētītas kombinatorikas problēmas, plānošanas varbūtību modeļi, plānošanas praktiķu jau plānošanās pielietotās heuristiskās metodes.

V.S. Gordons [88] pēta pieļaujamo sarakstu sastādīšanas uzdevumu ar pārtraukumiem un soda punktiem risināšanu, R. Grahams darbā [44] aplūko dažādus sarakstu izpildīšanas algoritmus, bet šajos uzdevumos aplūkoti specifiski ierobežojumi, saistīti ar izpildes laikiem un tāpēc nav attiecināmi ar transportu saistītām sistēmām.

R. Burstals (Burstall R.M) savā darbā pēta heuristiskās metodes sarakstu problēmu risināšanai [18]

V.S. Tanajevs grāmatās [99,100] detalizēti analizē sarakstu teorijas algoritmu pielietojumu vienstagu un daudzstagu uzdevumu risināšanā, raugoties no sarakstu teorijas viedokļa aplūko vienstagu uzdevumu optimizāciju [98] un uzdevumu apjomu ietekmi uz mašīnresursiem [101], bet šie pētījumi ir teorētiski, bez piemēriem to praktiskai pielietojšanai.

R. Konvejs pamato sarakstu teorijas pielietojumu sakārtošanas uzdevumu risināšanai no matemātikas viedokļa, tiek definēti uzdevuma mainīgie lielumi, definēta galīga sakārtošana vienas mašīnas uzdevumiem, bet arī šie pētījumi nav attiecināti uz praktisku metožu pielietojanu reālās transporta sistēmās.

Tā kā transporta sarakstu sastādīšanas uzdevumi ir saistīti ar sarakstu teoriju un liela apjoma datu sakārtošanu un analīzi, dažu autoru darbiem par sarakstu teorijas uzdevumu risināšanu un evolucionāro algoritmu izmantošanu tika pievērsta īpaša uzmanība.

Viens no fundamentālākajiem pirmajiem pētījumiem sarakstu teorijas jomā tika publicēts 1967. gadā ASV (2003 gadā tika publicēts otrais izdevums). Šī pētījuma autors ir Ričards Konvejs, Viljams Maksvels un Luiss Millers. Grāmatā [20] tiek formulēts secības jēdziens, analizēta dažādu ierobežojumu iedarbība attiecībā uz secību, sarakstu problēmas tiek klasificētas atkarībā no saņemamās informācijas veida. Tiek pētīti sarakstu novērtēšanas kritēriji un tiek definēti sarakstu teorijas pamatjēdzieni, darbs, procesors, job-

shop uzdevumi, flow shop uzdevumi, u.c. Šinī darbā tiek klasificētas sarakstu teorijas problēmas un tās tiek iedalītas pēc darbiem un to paveikšanai nepieciešamajām operācijām, cehā esošo darbagaldu skaita un veida, dažādajiem darbu paveikšanu ierobežojošajiem nosacījumiem, pēc sarakstu novērtēšanas kritērijiem. Šinī darbā tiek definēti sarakstu problēmu mainīgie job-shop (var tulkot kā darba-ceha) uzdevumu risināšanai; tādi kā darbagaldu skaits, izpildāmo darbu skaits, darbu raksturojošie parametri, pabeigšanas laiks, izlaišanas laiks, ierašanās laiks, izpildes termiņš, gaidīšanas laiks. Tiek apgalvots, ka saraksts atsevišķai problēmai ir pilnīgi noteikts, ja ir dots katra darba katras operācijas gaidīšanas laiku summa. Pārējie daudzie mainīgie tiek ieviesti ērtībai un kompakstumam, bet tie visi ir atvasināti no darba gaidīšanas laika līdz tiek pabeigta iepriekšējā operācija. Kā svarīgākie mainīgie tiek definēti arī darba visu operāciju pabeigšanas laiks, kopējais darba paveikšanas laiks ar konkrēto darbagaldu, darba kavēšanās laiks vai ierašanās pirms noteiktā laika. Tiek aplūkotas sarakstu problēmas, kas attiecināmas uz tādiem darbiem, kuri paveicami ar vienu operāciju un šāda tipa uzdevumiem tiek definēta secība ņemot vērā apstrādes laiku, beigu termiņus, nejauši izvēlētu secību, secību pie neprecīzi noteiktiem operāciju pabeigšanas ilgumiem, secību pie dažādi novērtētiem paveicamo darbu svarīgumiem.

Tāpat grāmatā tiek formulētas sarakstu sastādīšanas problēmas sarežģītāku sakārtošanas uzdevumu, tā saucamo flow-shop (var tulkot kā plūsmas-ceha) risināšanai. Šādu uzdevumu risināšanai tiek definētas dažādas metodes; rekombinācijas metode, darbu pārvietošanās maksimālās vai vidējās vērtības samazināšanas metode divu darbagaldu flow-shop uzdevumos, trīs un vairāku darbagaldu flow-shop sakārtošanas saraksti. Visu šo sarakstu sastādīšanas metožu uzdevums ir viens - mainot darbu ierašanos kārtību operāciju izpildei saīsināt kopējo visu darbu paveikšanas laiku uz visiem darbagaldiem. Vienā no nodaļām grāmatas autori job-shop sakārtošanas uzdevumus pielīdzina tīklsveida uzdevumiem, kur darbagaldu grupas (tīkla mezgli) apkalpo darbu plūsmu caur šiem mezgliem. Tādejādi sakārtošanas uzdevumi tiek reducēti uz kārtību, kādā darbi pārvietojas pa tīkla mezgliem un šie uzdevumi pakļaujas saišu grafu teorijas likumiem. Tiek analizēta paveicamo darbu vienlaicīgas ierašanās iespējas pie darbagaldiem un tiek konstatēts, ka praktiski definējot sakārtošanas uzdevumus nākas saskarties ar to, ka darbu ierašanās paveikšanai ir neregulārs process un reizēm tas ir jāizskata ar varbūtību noteikšanas metodēm. Tiek klasificēti izvēles principi no rindā gaidošajiem darbiem, piem. nejaušs ierašanās veids (Puasona process), ja šo mainīgo lielumi atbilst Puasona sadalījuma likumam, pēc principa FCFS (pirmo apstrādā visagrāk apstrādei padoto darbu), LCFS

(pirmo apstrādā visvēlāk apstrādei padoto darbu), darbu izvēli atkarībā no apstrādes laika, visīsākais-visgarākais apstrādes laiks, u.c. Tāpat tiek definētas prioritātes izvēloties darbus apstrādei ievērojot uzstādītās darbu un laika klases. Analizējot dažādus sakārtošanas, rindošanas un apkalpošanas uzdevumus grāmatas autori secina, ka iespējamo darbagaldu skaita, veicamo darbu un to paveikšanai nepieciešamo operāciju skaita, darbu padošanas laiku apstrādei kombinācijas ir praktiski bezgalīgas un to modelēšana ir ļoti sarežģīts un laikietilpīgs darbs, it sevišķi ja tiek ņemti vērā sakārtošanu apgrūtināši ierobežojumi. Tomēr jāsecina, ka darbā šie pētījumi ir teorētiski un nav attiecināti uz praktisku metožu pielietošanu reālās transporta sistēmās.

Autors, kura darbiem ir pievērsta sevišķa uzmanība sakarā ar sarakstu teoriju, ir V.S Tanajevs, kurš sarakstu teorijas algoritmu izstrādei un pētīšanai ir veltījis vairākus darbus [98,99,100,101]. Darbos definēti sarakstu teorijas pamatjēdzieni, tiek definētas vienstadiju un daudzstadiju sistēmas, to atšķirīgās un kopīgās iezīmes. Tiek noteikts, ka pazīmi nosaka tieši apkalpojošo ierīču daudzums un kārtība, tiek definēti jēdzieni darbu pārtraukumiem, darbagaldu identiskumam un ražībai, darbagaldu dīkstāvei. Tiek definēti arī vairāki sarakstu sastādīšanu limitējošie ierobežojumi; direktīvie izpildes termiņi gan apstrādei kopumā, gan atsevišķam darbam patērējamie, pieļaujamie saraksti pēc resursu pieejamības, apstrādes kārtību nosakošie ierobežojumi. Darbos tiek atzīmēts, ka vispārējā gadījumā pieļaujamā saraksta izveidošana vai pat šāda saraksta esamības fakta konstatēšana kādai konkrētai problēmai jau pats par sevi ir sarežģīts uzdevums. Tiek definēti atrasto sarakstu novērtēšanas kritēriji.

Grāmatā [100] tiek analizēti sarakstu sastādīšanas algoritmi tādiem uzdevumiem, kuri ir pielīdzināmi ar transporta sistēmām saistītu problēmu risināšanai. Transporta sistēmu kustības problēmu risināšana ir saistīta ar daudzstadiju sistēmām. Šādu uzdevumi tiek iedalīti polinomiāli atrisināmam, kuram eksistē vismaz viens efektīvs atrisināšanas algoritms un NP-sarežģītie uzdevumi, kuriem atrisināšanas algoritmi nav zināmi un iespējams tādi nemaz neeksistē. Tiek analizētas sistēmas ar secīgi izvietotiem darbagaldiem un dažādu to apstrādes kārtību, gan vienādu, gan dažādu maršrutu gadījumi, aprakstīta optimālu sarakstu sastādīšana pēc ātrdarbības kritērija gan diviem, gan vairākiem darbagaldiem. Tiek aprakstīti algoritmi sarakstu iegūšanai ar un bez pieļaujamiem pārtraukumiem, aplūkots sarakstu sastādīšanas uzdevums ar nobīdes no sākotnējā minimizāciju. Darbā ir formulēts vispārīgs kustības saraksta sastādīšanas uzdevums kā kāda resursu kopums, ar kura palīdzību ir jāpaveic kāda fiksēta uzdevumu sistēma. Tiek

analizētas dažādu kustības sarakstu klases pēc pieļaujamo pārtraukumu ierobežojuma pazīmes. Tiek formulēts arī sarakstu sastādīšanas algoritma mērķis; pie noteiktiem uzdevumu īpašībām ierobežojumiem un pieejamajiem resursiem atrast sakārtošanas uzdevuma efektīvu algoritmu. Kā efektivitātes mēraukla tiek aplūkoti kustības saraksta ilgums un vidējais uzdevumu atrašanās ilgums sistēmā. Ir aprakstīts sakārtošanas procesa modelis un to modeļu kopums, kuri apraksta resursus, uzdevumu sistēmu, ierobežojumus un kustības saraksta novērtēšanas kritērijus. Darbā tiek noteikts kustības sarakstu iedalījums pēc uzdevuma izpildes ierobežojuma rādītājiem un dota definīcija kustības sarakstu efektivitātes noteikšanai kā saraksta izpildes maksimālais laiks un vidējais svērtais pabeigšanas laiks. Kā galvenā problēma tiek formulēta nepieciešamība atrast efektīvus algoritmus, kuri ļautu starp visiem iespējamajiem kustību sarakstiem atrast tādus, pie kuriem šie lielumi ir vismazākie. Aplūkoti ar konteineru piepildīšanas piemēru četri heuristiskie algoritmi: 1.Norīkojums pirmajam piemērotajam procesoram (FF – first-fit) pie kura katrs uzdevums tiek nozīmēts procesoram ar vismazāko numuru no to procesoru kopuma, kuri ir piemēroti šim mērķim; 2.Norīkojums uz labāko no piemērotajiem procesoriem (BF – best-fit) pie kura katrs uzdevums tiek nozīmēts tam procesoram, kuram ir minimālais summārais neizmantotais laiks; 3.Norīkošana pēc samazināšanās pirmajam piemērotajam procesoram (FFD- First-fit-decreasing); 4.Norīkošana pēc samazināšanās labākajam piemērotajam procesoram (BFD – best-fit-decreasing). Jāatzīmē, ka arī šajās grāmatās aprakstītās metodes netiek aplūkotas kontekstā ar reālu transporta sistēmu, netiek analizētas iespējas veidot sarakstus izmantojot evolucionāros algoritmus.

Pilnīgāka transporta uzdevumu formulēšana atbilstoši sarakstu teorijas algoritmiem aprakstīta promocijas darba sadaļā 1.5

Tādu pasaulē pazīstamu zinātnieku, kā S.Lugers (Stuart Luger), S.O.Haikins (Symon O. Haykin), D. Rusels (Russell D. Reed), T.Džonss (Tim Jones) u.c., darbi saistīti ar mākslīgā intelekta pētīšanu, to programmēšanu, evolucionārajiem algoritmiem [29,85,87] un tai skaitā ģenētisko algoritmu [29] izmantošanu saistībā ar sarakstu teoriju [44, 81,84,86].

S.Lugers grāmatā [61] apraksta mākslīgā intelekta uzbūvi un varbūtējo pielietojumu dažādu sarežģītu uzdevumu risināšanai, S.Haikins grāmatā [47] apraksta nepārtrauktās un diskrētās sistēmas un signalizāciju, D.Rusels grāmatā [75] izklāsta mākslīgā intelekta

rašanās vēsturi, dažādi bāzētās aģentu sistēmas, ģenētiskos algoritmus un spēļu teoriju, kā arī pēta neironu tīklus [76].

Jau ilgāku laika periodu daudzu valstu zinātnieki pēta dažādu evolucionāro algoritmu pielietojšanas iespējas optimizācijas uzdevumos. Tā zinātnieka J. Čena publikācijā [21] tiek aprakstīta adaptīvā Imūnā algoritma izmantošana daudzkritēriju optimizācijas uzdevumu risināšanai.. Autoru kolektīva publicētajā rakstā [50] aprakstītas priekšrocības un trūkumi kombinējot ģenētisko algoritmu izmantošanu un lokālo minimumu meklēšanu. RTU zinātnieku kolektīvs profesora A.Ļevčenkova vadībā ir publicējuši vairākus darbus, veltītus transporta vadīšanai un kustības drošības paaugstināšanai izmantojot evolucionāros algoritmus [37,38,39,42] Lai arī augstākminētajos darbos risinātie uzdevumi ir daļēji saistīti ar transporta vadību, tajos netiek izvirzīts uzdevums sekot katras atsevišķas transporta vienības atrašanās punktam telpā.

Kā nozīmīgs darbs ģenētiskā, ka viena no evolucionārajiem algoritmiem, pielietojšana daudzkritēriju sarakstu uzdevumu risināšanai minama Tapan Bagči grāmata [78]. Kā jau dabas procesu iedvesmotam, šī algoritma aprakstam tiek izmantoti dzīvo organismu attīstību raksturojoši jēdzieni, tādi kā paaudze, vecāki, klonu pāris, krustošana u.c. tāpēc nomenklatūras raksturošanai un procesa aprakstam autors velta nodaļu, kurā paskaidrots ģenētiskā algoritma darbības un binārās kodēšanas princips, paaudzes inicializēšana, vecāku izvēles principi, krustošanas procedūra, skaidrota mutācijas operatora nepieciešamība. Aprakstīti vienkāršotā ģenētiskā algoritma SGA (Simple Genetic Algorithm) soļus; algoritma parametru noteikšana, nejauša paaudzes rindiņu veidošana, katras paaudzes rindiņas novērtēšana atbilstoši piemērotības funkcijai, pavairošanas, krustošanas, mutācijas operācijas, sliktāko rezultātu dzēšana un algoritma beigu kritēriji. Atsevišķa nodaļa šajā darbā veltīta ģenētiskā algoritma parametru izvēlei, populācijas, elites izmēra definēšanas nozīmei, vecāku izvēlēs stratēģijai u.c. Tiek definētas flow-shop sarakstu uzdevumu risināšanas heuristikās metodes; tai skaitā Palmera, Gupta, Danenbriga, Ho un Čanga metodes, aplūkoti dažādu zinātnieku iepriekš piedāvātie uz ģenētiskā algoritma bāzes veidotie algoritmi. Tiek definētas job-shop uzdevumu risināšanas metodes; lineārā programmēšana, priekšrocību noteikšanas likumi, aprakstīti dažādie sarakstu attēlošanas veidi hromosomā. Darbā aprakstītas dažādas daudzkritēriju uzdevumu risināšanas metodes; vienkritērija metode, globālā kritērija metode, minimālo noviržu metode.

Izstrādāto evolucionāro algoritmu apraksts transporta plūsmu vadības uzlabošanai iekļauts promocijas darba sadaļā 2.5

Daudzi zinātnieki savus darbus ir veltījuši daudzkritēriju sakārtošanas uzdevumu modelēšanas problēmu risināšanai. Tā KTU profesors Ž. Bazaras ir modelējis, kā sarakstu problēmas iespaido dažādi ārējie faktori [13], zinātnieki M.Garejs (M.Garey) un D.Džonsons (D.Johnson) [28] apraksta sarakstu teorijas NP-pilnos uzdevumus un to datormodelēšanu, RTU Informācijas tehnoloģijas institūta profesors J. Merkurjevs ir autors sistēmu modelēšanas un imitācijas uzdevumu risināšanai veltītai mācību grāmatai [62].

Sakārtošanas uzdevumu risināšana ar dažādiem sarakstu teorijas algoritmiem ir viena no tēmām arī pēdējos gados rīkotajās starptautiskajās konferencēs, par ko liecina šai problēmai veltītās daudzās publikācijas [17,30,46,48,49,50,63].

Tomēr jāatzīmē, ka visos iepriekšminētajos literatūras avotos autori gan sarakstu teorijas uzdevumus, gan mākslīgā intelekta, gan evolucionāro algoritmu pielietošanu daudzkritēriju uzdevumu risināšanai aplūko teorētiski, bez priekšlikumiem par praktisku izmantošanu ar transportu saistīto uzdevumu risināšanai, netiek piedāvāts algoritmu pielietojums transporta kopējās sistēmas vadīšanai un šo uzdevumu risināšanai netiek pētītas iebūvēto programmējamo kontrolleru pielietošanas iespējas.

Pašreiz pasaules praksē jau tiek izmantotas gan ITS (intelligent transport systems) gan arī iebūvētās intelektuālās iekārtas atsevišķu transporta veidu plūsmu organizācijai.

Ar 2010.gada 07.jūlija ES Direktīvu 2010/40/ES inteligentā transporta sistēma ir definēta kā informācijas un komunikāciju tehnoloģiju kopums, kura pielietošana transporta sistēmu jomā nodrošina inovatīvu pakalpojumu pieejamību dažādu transportu veidiem un transporta kustības vadīšanai kā tādai. Kā viens no ITS uzdevumiem ir padarīt pieejamu papildus informāciju satiksmes dalībniekiem, tādējādi padarot pārvietošanos drošāku, koordinētāku un „gudrāku”[22]

Vairāki pasaulē pazīstami lielākie elektronikas un programmatūras ražotāji jau tagad piedāvā risinājumus autotransporta plūsmu vadīšanai. Šeit jāpiemin SIEMENS izstrādāto sistēmu TACTIC un SCOOT. Ar TACTIC palīdzību tiek organizēta satiksme uz autostrādēm, tuneļos, kā arī tiek realizēta autostāvvietu vadība. Gaisa piesārņojuma samazināšana lielpilsētās, degvielas patēriņa un ceļā pavadītā laika samazināšana ir izstrādēs SCOOT uzdevums. SCOOT pamātā ir satiksmes modelis, kurš iegūst reālā laika datus no devējiem, apstrādā tos un prognozē satiksmes intensitāti nelielā laika posmā. Būtībā tā ir adaptīva luksoforu vadības sistēma regulējamiem ielu krustojumiem [54]. Šādu sistēmu izmantošana uzlabo situāciju pilsētas transporta sistēmā, samazina sastrēgumus un

degvielas patēriņu, tomēr tā ir vērsta tikai uz ceļu transporta lokālu organizāciju, bet neapskata visu transporta sistēmas vadību kopumā un lielākā mērogā.

Arī dzelzceļa transporta vadīšanai praksē jau tiek pielietotas intelektuālās iebūvētās iekārtas un pasaulē ir izstrādāti un tiek pielietoti speciāli drošības pasākumu kompleksi. Tā, piemēram, Krievijā ir izstrādāts un tiek izmantots iekārtu komplekss КЛЮБ (Комплексное локомотивное устройство безопасности) [92]. Eiropas Savienības valstīs ir izstrādāts un tiek izmantots projekts ERTMS (European Rail Traffic Management System) kurš savukārt sastāv no divām komponentēm, ETCS (European Train Control System) [23] un speciāla GSM komunikācijas standarta GSM-R [45] dzelzceļa transporta vadīšanai. ETCS ir vienotas signalizācijas, vadības un vilcienu aizsardzības sistēma, kura tiek izmantota Eiropas dzelzceļa transporta vadīšanai, it sevišķi vilcienu vadīšanai ātrgaitas maršrutos [77]. Tā kā šīs sistēmas un kompleksi pieprasa attiecīgu piemērotu infrastruktūru, šo sistēmu un kompleksu izmantošana Latvijā nav iespējama. Kā viens no infrastruktūras atbilstības kritērijiem ir transporta līdzekļu koordināšu noteikšana. Koordināšu noteikšanai tiek izmantota kāda no pavadoņu navigācijas sistēmām, piemēram, globālā pozicionēšanas sistēma GPS (Global Positioning System) - ASV pavadoņu navigācijas sistēma, kuru izstrādāja ASV Aizsardzības ministrija un kuru uztur ASV Gaisa spēki. No 1976. gada Krievijā tiek izmantota sava pozicionēšanas sistēma GLONASS (ГЛОНАСС - Глобальная Навигационная Спутниковая Система) kuru uztur Krievijas valdība [95]. Eiropai ir no Krievijas GLONASS, ASV GPS un Ķīnas COMPASS neatkarīga augstas precizitātes pozicionēšanas sistēma GALILEO, kuru izstrādāja un uztur Eiropas Savienība un Eiropas Kosmosa Aģentūra ESA (European Space Agency) [52]. Tā kā Latvijā nav pieejama nepieciešamā infrastruktūra šo drošības sistēmu izmantošanai, drošības sistēmas ETCS un КЛЮБ izmantošana Latvijā nav iespējama.

Intelektuālo iekārtu izmantošana transporta plūsmu vadīšanai arī Latvijā ir iepriekš pētīta un ir arī izstrādāti projekti to praktiskai izmantošanai. Daudzus energoefektivitātes tēmai veltītus darbus, monogrāfijas un zinātniskos rakstus, ir izstrādājis LZA akadēmiķis, profesors L. Ribickis [53,55,58,68,72,73], tai skaitā saistībā ar kontrolleru izmantošanu transportā [70] un mehatronisku sistēmu vadīšanu; profesors I. Raņķis un asoc. profesors V. Bražis ir veikuši pētījumus elektroenerģijas rekuperācijas [69], pilsētas sabiedriskā elektrotransporta vadības [40], elektrotehnikas, elektronikas un energoelektronikas jomā [66]; profesori J. Valeinis, J. Dirba un K. Ketners veikuši pētījumus elektriskās piedziņas un transporta līdzekļu elektrisko mašīnu jomā ; profesors A. Ļevčenkovs sadarībā ar doc.

M. Gorobecu un kolēģiem daudzu gadu garumā savu zinātnisko darbību ir veltījis tieši transporta plūsmu vadīšanas problēmu pētīšanai [32,33,34,35,36], sarakstu teorijas un evolucionāro algoritmu pielietošanai transporta plūsmu vadīšanā [25,31,41,43], intelektuālajām iebūvētajām iekārtām [40] un intelektuālā transporta sistēmas pētīšanai un ir autors daudziem rakstiem un monogrāfijām par šādu sistēmu izveidošanu un datu plūsmu vadīšanu [1,2,3,4,5,6,7,8,60,71].

Latvijas zinātnieki ir devuši savu ieguldījumu arī mākslīgā intelekta attīstībai Latvijā: tā profesors J. Grundspenķis veicis pētījumus intelektuālo sistēmu jomā [27], zinātnieki A. Borisovs vispārīgo mākslīgā intelekta metožu un ģenētisko algoritmu jomā [12,14], profesors L. Rastrigins imitācijas modelēšanas jomā.

Latvijā ir izstrādāti un aizstāvēti arī vairāki promocijas darbi par sarakstu teorijas algoritmu izmantošanu un transporta sistēmu vadības uzdevumu risināšanai.

Tā Rīgas Tehniskajā universitātē O. Krūmiņš ir izstrādājis un aizstāvējis promocijas darbu [54] kurā aplūko intelektuālo transporta sistēmu izveides principus un iespēju ar intelektuālām iekārtām vadīt autotransporta vienības. Šajā promocijas darbā cita starpā tika aplūkota iespēja koordinēti vadot luksoforu darbību palielināt ceļu posmu caurlaides spēju autotransportam, bet netika aplūkota luksoforu darbības ietekme uz dažādu transporta veidu plūsmu mijiedarbību, iespēju sabiedriskajam transportam noteikt prioritāti.

I. Uteševs promocijas darbā aplūko [83] elektriskā sliežu transporta bremzēšanas vadības algoritmus izmantojot iebūvētās intelektuālās iekārtas. Promocijas darbā galvenā uzmanība tiek pievērsta elektrotransporta apstādināšanai pirms luksofora aizliedzošā signāla. Turpmāka elektrotransporta kustības vadīšana ar mērķi nodrošināt ievērot iepriekšnoteikto pārvietošanos maršrutā un ierašanos maršruta punktos saskaņā ar kustības sarakstu netiek aplūkota

I. Beinarts savā promocijas darbā [10] risina sabiedriskā transporta salonu mikroklimata nodrošināšanu izmantojot izplūdušās loģikas programmējamus kontrollerus, bet netiek aplūkota mākslīgā intelekta un programmējamo kontrolleru izmantošana transporta kā tāda vadīšanai.

M. Gorobecs [25] promocijas darbā formulē elektriskā transporta optimālās vadības uzdevumu un mērķa funkcijas, pielietojot mākslīgo intelektu, sarakstu teoriju un evolucionāros algoritmus. Modelēšanai izmantoti neironu tīkli un ģenētiskie algoritmi. Darbā kā galvenie kritēriji tika izvirzīti elektroenerģijas patēriņa minimizēšana, procesu ātruma maksimizēšana un procesu izpildīšanas laika minimizēšana. Saskaņā ar šiem

kritērijiem tika izstrādāts elektromehānisko objektu kustības vadības matemātiskais modelis, bet kustības vadības modelī netika ņemti vērā tādi kritēriji kā jaunu transporta vienību kustības sarakstu sastādīšana neparedzētos gadījumos, izmaiņu rezultātā radušās saraksta nobīdes minimizēšana, kā arī dažāda tipa transporta plūsmu droša vadība plūsmu krustošanās punktos.

N. Kuņicina [56] promocijas darbā aktualizē programmu aģentu, sarakstu teorijas metožu, daudzkritēriju optimizācijas teorijas metožu un matemātiskās statistikas metožu pielietošanas elektropiegādes uzdevumu risināšanai. Tika izstrādāti elektropiegādes uzdevumu risinājuma modeļu izstrāde dažādu blakusapstākļu ietekmē. Promocijas darbā piedāvātā metodika nodrošina lēmuma pieņemšanas procedūras organizāciju elektropiegādes un transporta loģistikas uzdevumu risināšanai, tika izstrādāta programmu aģentu pielietošanas procedūra elektroenerģijas izejvielu piegādātāju transporta līdzekļu kustības sarakstu sastādīšanai, bet netiek aplūkota transporta sistēma kopumā, netiek analizēta dažādo transporta tipu mijiedarbība un netiek analizēta intelektuālā transporta sistēma kā tāda kopumā.

A. Berežnoja promocijas darbā [11] tiek modelēta un analizēta autotransporta plūsma, tās blīvumu noteicošie faktori atsevišķā ceļu posmā, bet netiek ņemta vērā autotransporta plūsmu mijiedarbība ar dzelzceļa transportu.

A. Takahaši promocijas darbā tiek pētītas ģenētiskā algoritma pielietošanas iespējas multimodālo funkciju optimizēšanā, kā ģenētiskos algoritmus raksturojošo parametru izmaiņa ietekmē uz daudzkritēriju uzdevumu atrisinājumus. Šis darbs nav saistīts ar ģenētisko algoritmu pielietošanu transporta sistēmas vadības uzdevumu risināšanai [74].

N. Petuhovas TSI aizstāvētais promocijas darbs [64] tika veltīts temporālo datu modeļu pētīšanai dzelzceļa transporta informācijas sistēmās un šo sistēmu efektivitāte, netika attiecināta uz dzelzceļa transporta mijiedarbību ar autotransportu

V.Gromules promocijas darbs [26] bija veltīts sabiedriskā transporta pakalpojumu kvalitātes uzraudzībai un sabiedriskais transports netika izskatīts kā daļa no transporta sistēmas un netika pētīta dažādu transporta veidu mijiedarbība.

Pēdējo desmit gadu laikā Krievijā par dažādām, ar sarakstu teoriju un ar sakārtošanas algoritmiem saistītām tēmām ir aizstāvēti virkne promocijas darbu.

Tā piemēram R. A. Korjamins promocijas darbā [90] analizē sarakstu pārkārtošanas iespējas ar direktīvo laiku ievērošanu, bet šāds uzdevums nav piemērojams uzdevumiem, kur ierobežojumi saistīti ar darbu veikšanas secību.

M. G. Maslovs promocijas darbā [94] aplūko heiristiskos un ģenētiskos algoritmus sarakstu sastādīšanai, bet direktīvā laika ievērošana netiek noteikta kā viena no mērķa funkcijām.

I. A. Rikova promocijas darbā [97] tiek analizēti tikai no viena resursa atkarīgi plānošanas uzdevumi un netiek aplūkota iespēja ar vienu procesoru apstrādāt vairākus darbus secīgi.

A.A. Lazarevs promocijas darbā [93] pēta iespējas minimizēt sarakstu pārkārtošanas nobīdi, bet arī šajā promocijas darbā kā viens no kritērijiem netiek noteikti ar veicamo operāciju secību saistītie ierobežojumi.

A. L. Ilņickis promocijas darbā [89] formulē un risina tādus sarakstu sastādīšanas daudzkritēriju uzdevumus, kurā kā galvenais noteikums tiek definēta resursu pieejamība, bet netiek piedāvāts izmantot kādu no evolucionārajiem algoritmiem.

V.P. Mahoņko promocijas darbs [96] ir veltīts tieši pārbrauktuvju caurlaides spējas palielināšanai un drošības līmeņa paaugstināšanai autotransportam šķērsojot pārbrauktuves. Lai sasniegtu šo mērķi autors ir izstrādājis pārbrauktuves darbības algoritmus un ieteicis izmantot uz mikroprocesoru bāzes veidotas intelektuālās iekārtas pārbrauktuvju vadīšanai. Šinī darbā pārbrauktuvju vadības algoritmam netiek izmantota sarakstu teorija un netiek pievērsta uzmanība nepieciešamībai apgādāt ar rekomendējošu informāciju par situāciju maršrutā arī autotransportu.

Tas, ka problēmas saistībā ar transporta sistēmu vadīšanu tiek pētītas un šī tēma ir aktuāla arī pašreiz liecina publikācijas un referāti dažādās starptautiskās konferencēs [15,79,80,82]. Tā, piemēram, 2012. gada starptautiskajā konferencē „First International Conference on Railway Technology; Research, Development and Maintenance” prof. A.Bracciali referātā tika minēts, ka kopš Eiropā tiek īstenots drošības pasākumu izpētes projekts, no 1990 līdz 2009. gadam Eiropā ir reģistrēti vairāk kā 400 nopietni negadījumi saistībā ar dzelzceļa transportu. Avārijas un katastrofās uz pārbrauktuvēm 20 gadu laikā ir cietuši, gājuši bojā vai guvuši dažādas pakāpes smaguma ievainojumus, vairāk kā 460 cilvēki [16].

Šī promocijas darba uzdevumi ir saistīti ar visa veida pilsētas transporta, sabiedriskā, privātā, elektriskā un neelektriskā, plūsmu vadīšanu izmantojot iebūvētās intelektuālās iekārtas, t.i. uz mikrokontrolleru bāzes izveidotas programmējamas iekārtas ar intelektuālo vadību, un pielietojot dažādus šo transporta plūsmu vadības algoritmus, tai skaitā arī sarakstu teorijas algoritmus, ģenētiskos un imūnos algoritmus.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izpētīt un izstrādāt informācijas plūsmu apstrādes algoritmus pilsētas transporta, tai skaitā elektrotransporta, kustības datorvadībai ar mākslīgā intelekta iekārtām un sarakstu teorijas metodēm.

Šī mērķa sasniegšanai tiek izvirzīti un promocijas darbā izpildīti sekojoši uzdevumi:

- Analizēt esošās dzelzceļa, sabiedriskā un pilsētas transporta sistēmas, izstrādāt sistēmas objektu kustības vadības matemātiskos modeļus un definēt mērķa funkciju
- Izpētīt ģenētiskos un imūnos algoritmus, izstrādāt procedūras iebūvētām iekārtām avāriju un bīstamo situāciju novēršanai dažādu transporta veidu maršrutu krustošanas punktos
- Izpētīt sarakstu teorijas algoritmus, iespējas tos pielietot transporta kustības vadības uzdevumos secīgas un paralēlas uzdevumu apstrādes sistēmās
- Datormodelī izpētīt izstrādāto procedūru pielietošanu transporta plūsmu sistēmas vadīšanai pēc drošuma, dīkstāves laika un elektroenerģijas patēriņa minimizēšanas kritērijiem
- Salīdzināt dažādu vadības algoritmu ietekmi uz drošu transporta kustības sarakstu izveidošanu
- Izmantojot hipotēžu statistiskās vērtēšanas metodi novērtēt izstrādāto algoritmu izmantošanas ietekmi uz transporta sistēmu un kustības drošību kopumā

Pētījuma līdzekļi un metodes

- Kopu teorija, saišu grafu teorija, sistēmas un procesu analīze
- Evolucionāro algoritmu teorija
- Sarakstu teorija
- Varbūtības teorija
- Modelēšana datorprogrammas MATLAB pakotnes SIMULINK vidē
- Vizuālorientēta un objektorientēta programmēšana
- Statistiskās analīzes metodes

Darba zinātniskā novitāte

Promocijas darbā izstrādāti sekojoši matemātiskie modeļi intelektuālās transporta sistēmas vadībai:

1. Dzelzceļa transporta vadīšanas modelis ar sarakstu teorijas algoritmu izmantošanu summārā pārbrauktuvju atrašanās laika slēgtā stāvoklī samazināšanai
2. Sabiedriskā elektrotransporta vadīšanas modelis ar iebūvēto iekārtu izmantošanu transporta vienību vadīšanai ievērojot kustības sarakstu visos maršrutos
3. Pilsētas transporta plūsmu vadības modelis, kurā tiek izmantoti sarakstu teorijas modeļi un procedūras, kā arī definēta mērķa funkcija daudzkritēriju uzdevumu risināšanai izmantojot evolucionāros algoritmus. Evolucionārie un sarakstu teorijas algoritmi transporta vadības uzdevumu risina ņemot vērā piecus kritērijus:
 - elektriskā pasažieru transporta kustības saraksta izstrāde ar mērķi minimizēt elektroenerģijas patēriņu lieki bremzējot un paātrinoties
 - dzelzceļa transporta vienību kustības saraksta izstrāde ar mērķi minimizēt pārbrauktuvju atrašanās laiku slēgtā stāvoklī,
 - dzelzceļa un pilsētas transporta vienību vienlaicīga atrašanās maršrutu krustošanās punktos varbūtības minimizēšana,
 - pilsētas transporta gaidīšanas laika sastrēgumos minimizēšana,
 - jaunizveidoto kustības sarakstu atšķirības no iepriekš sastādītajiem minimizēšana
4. Ģenētiskā un imūnā algoritma modelis, kas paredzēts pilsētas transporta sistēmas vadības daudzkritēriju uzdevuma risināšanai
5. Pilsētas transporta sistēmas funkcionālās mijiedarbības modelis, kurš apraksta pilsētas transporta atsevišķo elementu mijiedarbību un ļauj modelēt pilsētas transporta sistēmas raksturojošos procesus, tai skaitā arī elektromehānisko procesu intelektuālo vadību
6. Pilsētas transporta vienību kustības sarakstu matemātiskais modelis, kurš paredzēts transporta vadību vadīšanai ņemot vērā drošuma kritērijus
7. Izstrādāts jauns modelis transporta vienību kustības sarakstu izveidošanai ar ģenētisko un imūno algoritmu un to novērtēšanai
8. Pilsētas transporta sistēmas atsevišķu vienību ātruma vadības algoritms, kurš paredzēts piemērota kustības ātruma aprēķinam pēc drošas transporta plūsmu vadības to krustošanās punktos un direktīvā laika izpildīšanās kritērijiem

Darba praktiskais pielietojums

Promocijas darbā izstrādātie algoritmi un piedāvātās transporta sistēmas vadības procedūras var tikt pielietotas pilsētas transporta, tai skaitā arī sabiedriskā elektrotransporta vienību vadības uzlabošanai. Izstrādātie algoritmi un procedūras paaugstinās pilsētas transporta sistēmas savstarpēji krustojošos plūsmu vadīšanas drošuma pakāpi, pielietojot

izstrādātos algoritmus ir iespējams samazināt dīkstāvju laiku pilsētas transporta plūsmu krustošanās punktos, tādā samazināt iespējamo transporta vienību palielinātu uzkrāšanos kādā no maršrutu posmiem, samazināt sekojošus transporta sastrēgumus un samazināt pilsētas sabiedriskā elektrotransporta elektroenerģijas patēriņu. Tāpat izstrādātie algoritmi var nodrošināt neparedzētu apstākļu ietekmē no grafika novirzījušos sabiedriskā transporta vienību iespējami ātrāku atgriešanos pie iepriekš noteiktā kustības saraksta ievērošanas.

Darba aprobācija

Veikto pētījumu rezultāti tika prezentēti un apspriesti 13 starptautiskās konferencēs

1. Starptautiskā konference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2008)”Lietuva, Paņeveži, 2008.gada 23.maijs. Referāts "Modeling of Scheduling Theory in Intelligent Electric Transport Systems"
2. Rīgas Tehniskās universitātes 49.starptautiskā zinātniskā konference, sekcijas „Energētika un elektrotehnika” apakšsekcija „Elektrotehnika”, Latvija, Rīga, 2008.gada 15.oktobris. Referāts „Sarakstu teorijas modelēšana intelektuālajās elektriskā transporta sistēmās”
3. Starptautiskā konference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2009)”Lietuva, Paņeveži, 2009.gada 5.jūnijs. Referāts „Mathematical Formulation of Public Electric Transport Scheduling Task for Artificial Immune Systems”
4. Rīgas Tehniskās universitātes 50.starptautiskā zinātniskā konference, sekcijas „Energētika un elektrotehnika” apakšsekcija „Elektrotehnika”, Latvija, Rīga, 2009.gada 15.oktobris. Referāts „Mathematical Formulation of Public Electric Transport Scheduling Task for Artificial Immune Systems”
5. Rīgas Tehniskās universitātes 50.starptautiskā zinātniskā konference, sekcija „Mašīnzinātne un transports”, Latvija, Rīga, 2009.gada 16.oktobris. Referāts „Algorithm for Multi-Stage Scheduling in Intelligent Electric Transport System”
6. Tallinas Tehnoloģiskās Universitātes 8. starptautiskais simpozījs, sekcija „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering”, Pērnavā, Igaunija, 2010.gada 13.janvāris. Referāts „Algorithm for Multi-Stage Scheduling in Intelligent Electric Transport System”
7. Starptautiskā konference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2010)”Lietuva, Paņeveži, 2010.gada 4.jūnijs. Referāts „Intelligent Embedded Devices for Multistage Scheduling Tasks in Public Electric Transport”

8. Rīgas Tehniskās universitātes 51.starptautiskā zinātniskā konference, sekcijas „Energētika un elektrotehnika” apakšsekcija „Elektrotehnika”, Latvija, Rīga, 2010.gada 14.oktobris. Referāts „Algorithm for Public Electric Transport Schedule Control for Intelligent Embedded Devices”
9. Rīgas Tehniskās universitātes 51.starptautiskā zinātniskā konference, sekcija „Mašīnzinātne un transports”, Latvija, Rīga, 2010.gada 15.oktobris. Referāts „Algorithm of Safety Assessment of Intelligent Embedded Devices for Light Rail Transport”
10. Starptautiskā konference „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS’2011)”Lietuva, Paņeveži, 2011.gada 5.maijs. Referāts „Algorithm for increasing traffic capacity of level-crossing using scheduling theory”
11. Rīgas Tehniskās universitātes 52.starptautiskā zinātniskā konference, sekcija „Mašīnzinātne un transports”, Latvija, Rīga, 2011.gada 15.oktobris. Referāts „Algorithm for Increasing Traffic Capacity of Level-Crossing Using Intelligent Embedded Devices”
12. Rīgas Tehniskās universitātes 52.starptautiskā zinātniskā konference, sekcijas „Energētika un elektrotehnika” apakšsekcija „Elektrotehnika”, Latvija, Rīga, 2011.gada 15.oktobris. Referāts „Algorithm for Increasing Traffic Capacity of Level-Crossing Using Scheduling Theory and Intelligent Embedded Devices”
13. Starptautiskā konference „First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance” Las Palmas de Gran Canaria, Spānija 2012. gada 20.aprīlis. Referāts „Algorithm for Embedded Anti-Collision Devices of Rolling Stock in Safety Tasks”

Autora publikācijas

Veikto pētījumu rezultāti aprakstīti un publicēti desmit rakstos, publicētos starptautisko konferenču rakstu krājumos. Rīgas Tehniskās universitātes zinātnisko rakstu krājumos un konferenču pilna teksta rakstu krājumos ir publicēti zinātniskie raksti:

1. Ivars Alps, Mihails Gorobecs, Anatolijs Ļevčenkovs, Leonīds Ribickis "Sarakstu teorijas modelēšana intelektuālajās elektriskā transporta sistēmās" // RTU zinātnisko rakstu krājums „Energētika un Elektrotehnika” sērija 4, sējums 23, Latvija, Rīga 2008, 184 -194 lpp.
2. Ivars Alps, Mikhail Gorobetz, Anatoly Levchenkov, Leonids Ribickis "Modeling of Scheduling Theory in Intelligent Electric Transport Systems" //In proceedings of Intelligent

Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2008), Lithuania, Panevezys, 2008, 28 – 37 lpp.

3. Mikhail Gorobetz, Ivars Alps, Anatoly Levchenkov "Mathematical Formulation of Public Electric Transport Scheduling Task for Artificial Immune Systems" //In proceedings of Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2009), Lithuania, Panevezys, 2009, 127-134 lpp

4. Ivars Alps, Mikhail Gorobetz, Anatoly Levchenkov „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, 109 – 115 lpp.

5. Ivars Alps, Andrey Potapov, Mikhail Gorobetz, Anatoly Levchenkov „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, 155 – 160 lpp.

6. Ivars Alps, Mikhail Gorobetz, Anatoly Levchenkov „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

7. Ivars Alps, Mikhail Gorobetz, Anatoly Levchenkov „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, 129-136 lpp.

8. Ivars Alps, Mikhail Gorobetz, Anatoly Levchenkov „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, 99-108 lpp.

Ir publicētas divas publikācijas recenzēto konferenču tēžu krājumos

1. Алпс И., Левченков А., Горобец М., Рибицкис Л. „Применение программы СИМУЛИНК для корректировки расписания передвижения в интеллектуальных электротранспортных системах ”// Материалы Шестой международной научно-практической конференции, Россия, Санкт-Петербург, 2008. 49 – 50 lpp.

2. Levchenkov A., Gorobetz M., Balckars P. and Alps I. „Algorithm for Embedded Anti-Collision Devices of Rolling Stock in Safety Tasks” //In proceedings of the First

Izstrādātie patenti

Promocijas darba izstrādes gaitā iegūtie pētījumu rezultāti ir patentēti un ir izsniegts Latvijas Republikas patentu valdes apliecība A.Ļevčenkovs, M.Gorobecs, I.Raņķis, L.Ribickis, P.Balckars, A.Potapovs, I.Alps, I.Korago, V.Vinokurovs “Iekārta drošai autotransporta pārbrauktuvi šķērsošānai izmantojot satelītu navigācijas sistēmas” Rīga, Latvija, LV 14405 B.

2012. gada maijā no Patent Law Office FORAL ir saņemts apstiprinājums tam, ka par Starptautiskā patenta pieteikumu PCT/EP2011/067474 ir saņemts starptautiskās patentu meklēšanas institūcijas atzinums par to, ka izgudrojums atbilst patentspējas kritērijiem.

1. UZDEVUMA NOSTĀDNE TRANSPORTA KUSTĪBAS SARAKSTU INFORMĀCIJAS SISTĒMAS VADĪBAI NEPAREDZĒTOS GADĪJUMOS

1.1. Situācijas raksturojums

Promocijas darba pirmajā daļā analizēta esošā pilsētas transporta sistēma, klasificēti transporta sistēmas elementi un to savstarpējā mijiedarbība, no kopu teorijas viedokļa izveidots pilsētas transporta sistēmas matemātiskais modelis, definēti konstantie un mainīgie sistēmas kopu elementi, izstrādāts izpētāmā transporta sistēmas elementa – pārbrauktuves kā pētāmā objekta detalizēts matemātiskais modelis, noformulēta sarakstu teorijas uzdevumu nostādne un definētas mērķa funkcija uzdevuma risināšanai saistībā ar elektrotransporta kustības datorvadību ar iebūvēto iekārtu un sarakstu teorijas metožu palīdzību.

1.2. Neparedzēti gadījumi transporta sistēmā

Pilsētas transporta sistēma ir pietiekoši sarežģīta struktūra ar daudziem to ietekmējošiem lielumiem. Ne visi faktori var tikt ņemti vērā plānojot transporta sistēmas darbību. Daži faktori ir neprognozējami un atkarīgi no dažādu ārējo spēku ietekmes:

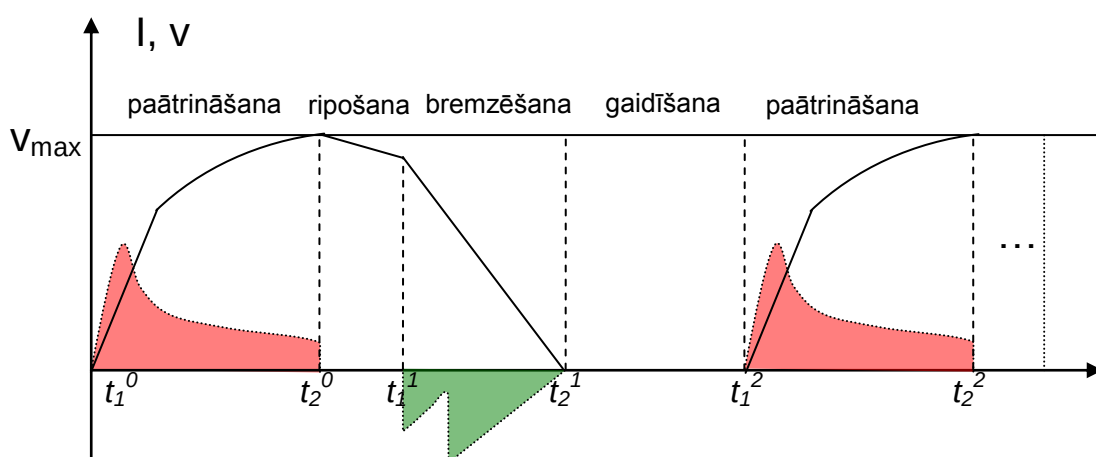
- nelabvēlīgi laika apstākļi un dabas stihijas
- ritošā sastāva un infrastruktūras defekti
- cilvēciskais faktors
- nepārvaramu varu ietekme
- u.c.

Jebkurš no šiem faktoriem tā vai citādi ietekmē kādu no transporta veidiem un tā iedarbības rezultātā notiek atkāpes no iepriekš noteiktā kustības saraksta. Kustības saraksta neievērošana pazemina pasažieru apkalpošanas kvalitāti un paaugstina sadursmes iespēju dažāda veida transporta vienībām atrodies to maršrutu krustojšanās punktos. Atkāpes no kustības saraksta vienai transporta vienībai var radīt nopietnas sekas gan kādai atsevišķai transporta vienībai, gan visai transporta sistēmai kopumā; kustības saraksts pārējām transporta vienībām ir saglabājies iepriekšējais, bet dēļ neparedzēta gadījuma aizkavējusies

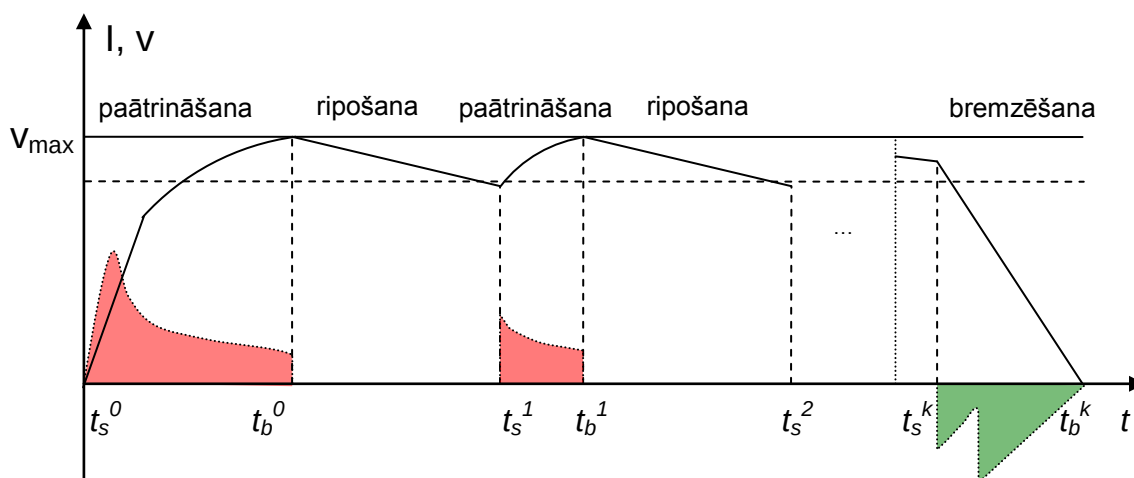
atsevišķa transporta vienība var pasliktināt situāciju sistēmā kopumā. Tādēļ jo īpaši svarīgi ir pēc iespējas atjaunot dēļ neparedzētiem gadījumiem kavējošā transporta atgriešanos pie sākotnēja kustības saraksta ievērošanas, vai, ja tas nav iespējams, pārkārtot transporta sistēmas kustības sarakstu kopumā, ieviešot nobīdes.

1.3. Elektroenerģijas patēriņu iespaidojošie kritēriji

Kā viens no galvenajiem elektroenerģijas patēriņu ietekmējošajiem faktoriem ir elektrotransporta biežā bremsēšana ar sekojošu paātrināšanos. Braucienam izvēloties nevienmērīgu kustības ciklu jāreķinās ar elektroenerģijas paaugstinātu patēriņu. Salīdzinot grafisko interpretāciju elektroenerģijas patēriņam elektrotransporta vienībām virzoties ar pārtraukumiem Att. 1.1. un nepārtrauktas kustības gadījumā samazinot bremsēšanas un sekojošas paātrināšanās ciklu skaitu Att. 1.2. var apgalvot un pētījumos ir noteikts, ka elektroenerģijas patēriņš nepārtrauktas kustības gadījumā var būt pat par 20% zemāks, nekā braucot ar pārtraukumiem [72].



Att. 1.1 Elektroenerģijas patēriņš kustības ar pārtraukumiem gadījumā



Att. 1.2. Elektroenerģijas patēriņš kustības bez pārtraukumiem gadījumā

1.4. Pilsētas transporta sistēmas analīze

1.4.1. Esošās transporta sistēmas analīze

Promocijas darba uzdevumam attiecināmā eksistējošā transporta sistēmas posma analīze no sistēmu teorijas viedokļa [67] ļauj izdalīt šādus sistēmas elementus:

- Elektrotransports

- Tramvaji
 - Mte - tramvaja elektrodzinējs
 - Kt - tramvaja vadības iekārta
 - Wt - tramvaja transmisija
 - σ_t - tramvaja kustības saraksts
 - Ht - tramvaja vadītājs
- Trolejbusi
 - Mtre - trolejbusa elektrodzinējs
 - Gtr - trolejbusa dīzeļģenerators
 - Ktr - trolejbusa vadības iekārta
 - Wtr - trolejbusa transmisija
 - σ_{tr} - trolejbusa kustības saraksts
 - Htr - trolejbusa vadītājs

- Dzelzceļa transports

- Elektrovilcieni
 - Mee - El. vilciena el.dzinējs
 - Ke - El. vilciena vadības iekārta
 - We - El. vilciena transmisija
 - σ_e - El. vilciena kustības saraksts
 - He - El. vilciena vadītājs
- Dīzeļvilcieni
 - Mdd - dīzeļvilciena iekšdedzes dzinējs
 - Ge - dīzeļvilciena ģenerators
 - Mde - dīzeļvilciena elektrodzinējs
 - Kd - dīzeļvilciena vadības iekārta
 - Wd - dīzeļvilciena transmisija
 - σ_D - dīzeļvilciena kustības saraksts

- Hd - dīzeļvilciena vadītājs

-Autotransports

- Viegļās automašīnas
 - Hv - autotransporta vadītājs
 - Kv - autotransporta vadības ierīces
- Kravas automašīnas
 - Hc - kravas auto vadītājs
 - Kc - kravas auto vadības ierīces
- Autobusi
 - Hb - autobusa vadītājs
 - Kb - autobusa vadības ierīces
 - σ_A - autobusa kustības saraksts

-Pasažieru transports

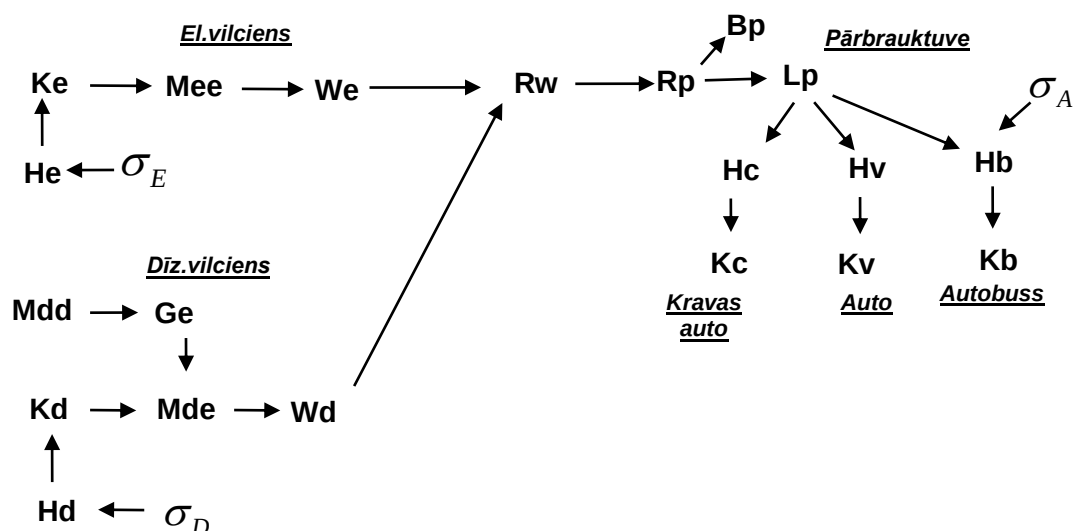
- Trolejbusi
 - Ht
 - Kt
- Tramvaji
 - Htr
 - Ktr

-Infrastruktūra

- Pārbrauktuves
 - Rp – pārbrauktuves releji
 - Bp – pārbrauktuves barjera
 - Lp – pārbrauktuves luksofors
- Sliežu ķēdes Rw
- Pieturas P

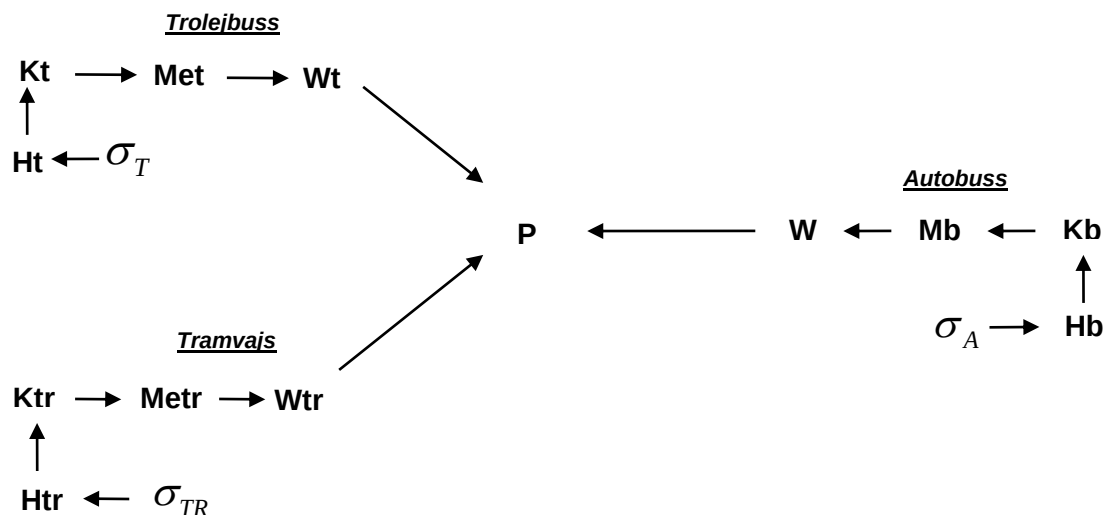
Sliežu transporta līdzekļu vienību vadītāji He, Hd, autotransporta līdzekļu vienību vadītāji Hc, Hv un Hb vada attiecīgo transporta līdzekļu vienības iedarbojoties uz šo transporta līdzekļu vadības elementiem Ke, Kd, Kc, Kv, un Kb. Dīzeļvilcienu vadības elementi iedarbojas uz dīzeļvilciena elektrodzinējiem Mde, kuri savukārt caur ģeneratoriem Ge saistīti ar dīzeļdzinējiem Mdd. Elektrovilcieniem vadības iekārtas iedarbojas uz elektrodzinējiem Mee. Sliežu transporta transmisijas We un Wd caur

sliežu ķēdēm R_w iedarbojas uz pārbrauktuvju relejiem R_p , kuri savukārt nodod vadības signālus pārbrauktuvju barjerām B_p un luksoforiem L_p . Šos vizuālos vadības signālus vizuāli uztver autotransporta vienību vadītāji un pieņem lēmumu atbilstoši reaģēt. Papildus vizuālajiem vadības signāliem sliežu transporta vadītājiem un autobusu vadītājiem ir noteikti vadāmo transporta vienību kustības saraksti σ_E σ_A σ_D . Šo shēmas elementu savstarpējā mijiedarbība parādīta Att. 1.3.



Att. 1.3. Esošās transporta sistēmas un pārbrauktuves elementu mijiedarbība

Sabiedriskā transporta līdzekļu vienību vadītāji H_t , H_{tr} un H_b vada attiecīgo transporta līdzekļu vienības iedarbojoties uz šo transporta līdzekļu vadības elementiem K_t , K_{tr} , K_b . Šie vadības elementi iedarbojas uz attiecīgā transporta līdzekļa vienības elektrodzinējiem M_{et} , M_{etr} vai iekšdedzes dzinējiem M_b un caur transmisijām W_t , W_{tr} un W_{br} pārvada griezes momentu riteņiem, pārvietojas maršrutos un piebrauc pie pieturām P . Sabiedriskā transporta vienībām ir noteikti kustības saraksti σ_T σ_{TR} σ_A . Atkarībā no ārējiem apstākļiem maršrutā un kustības saraksta attiecīgā transportlīdzekļa vadītājs pieņem lēmumu kā reaģēt katrā atsevišķā laika momentā. Šo shēmas elementu savstarpējā mijiedarbība parādīta Att. 1.4.



Att. 1.4. Esošās sabiedriskā transporta sistēmas elementu un pieturas mijiedarbība

1.4.2. Piedāvātā pilsētas transporta sistēma

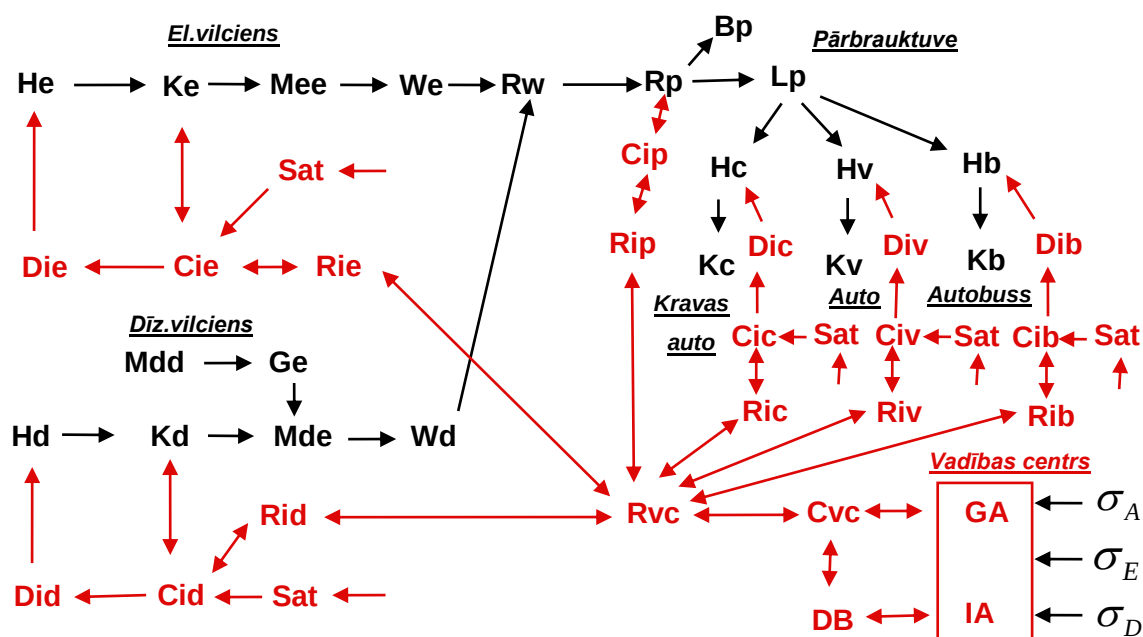
Promocijas darbā piedāvāts papildināt esošo transporta sistēmu ar jauniem elementiem:

- Vadības centrs
 - Rvc – raidītājs
 - Cvc – kontrollers
 - DB – datu bāze
 - IA – imūnā algoritma bloks
 - GA – ģenētiskā algoritma bloks
- Transporta vienības palīgierīces
 - SAT – satelītu signāla uztvērējs
 - Ric, Riv, Rib, Rie, Rid, Rip, Rit, Rit, Rit – raidītājs (WiFi, GPRS)
 - Cic, Civ, Cib, Cie, Cid, Cip, Cit, Cit, Cib – kontrollers
 - Dic, Div, Dib, Die, Did, Dip, Dit, Ditr – displejs
 -

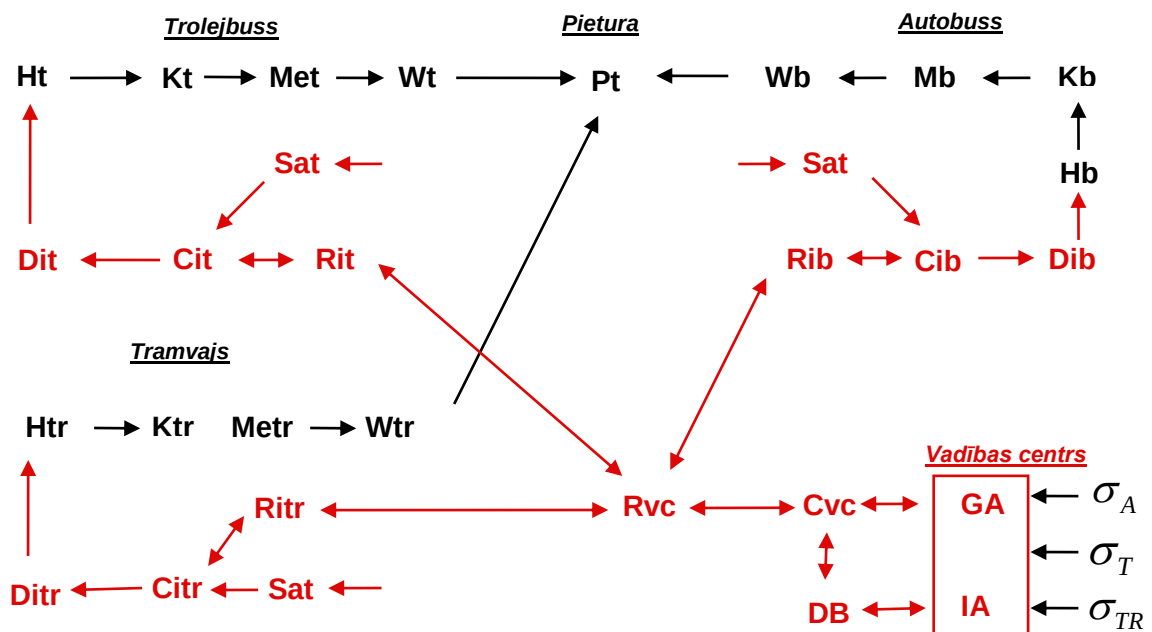
Saskaņā ar piedāvāto transporta sistēmas shēmu katra transporta sistēmas vienība tiek papildināta ar kontrolleriem Cic, Civ, Cib, Cie, Cid, Cit, Citr kuri caur uztvērējiem SAT no GPS satelītiem iegūst informāciju par sistēmas kustīgo vienību pašreizējo atrašanās vietu un ātrumu. Ar kontrolleriem Cip tiek vadītas dzelzceļa pārbrauktuves. Transporta sistēma tiek papildināta ar vadības centru, kurā atrodas vadības centra kontrollers Cvc, datu bāze DB, imūnā un ģenētiskā algoritma bloki IA, GA. Tāpat vadības centrā tiek ievadīta

informācija par visu transporta sistēmas sarakstiem pakļauto vienību kustības sarakstiem $\sigma_E \sigma_A \sigma_D \sigma_T \sigma_{TR}$. Vadības centrs caur raidītāju Rvc pārraida un uztver vadības signālus no visās transporta sistēmas vienībās uzstādītajiem raidītājiem Ric, Riv, Rib, Rie, Rid, Rip, Rit, Ritr. Atkarībā no transporta vienību saņemtajiem signāliem un atbilstoši kustību sarakstiem, datu bāzei, saskaņā ar izstrādātajiem algoritmiem vadības centrā tiek ģenerēts aktuālajai situācijai transporta sistēmā piemērots kustības saraksts katrai sistēmas vienībai un caur raidītājiem iebūvētie kontrolleri tiek pārraidīta rekomendējoša informācija uz transporta vienībās uzstādītajiem displejiem Dic, Div, Dib, Die, Did, Dip, Dit, Ditr. Atkarībā no rekomendācijām transporta vienību vadītāji pieņem atbilstošu lēmumu par ātruma izvēli. Ja transporta vienību sadursmes varbūtība sasniedz kritisko vērtību un ir nepieciešams uzsākt nekavējošu sliežu transporta vienības bremzēšanu, kontrolleris signālu par šīs darbības uzsākšanu nosūta sliežu transporta vienības avārijas bremzēšanas sistēmai bez mašīnista iejaukšanās.

Tādejādi kļūst iespējams koordinēti vadīt visu transporta sistēmu kopumā un tiek izveidota Intelektuālā Transporta Sistēma (ITS). Šāda sistēma ļauj izstrādāt piemērotāku vadības modeli atkarībā no aktuālās situācijas sistēmā, nosūtīt katram ITS transporta vienības vadītājam rekomendējošu rakstura informāciju lēmuma pieņemšanai, vai, avārijas varbūtībai sasniedzot kritisko robežu, ietekmēt ITS vienību kustību bez cilvēka iejaukšanās un novērst iespējamās sadursmes. Piedāvāto papildelementu mijiedarbība ar esošo transporta sistēmu un pārbrauktuvi parādīta Att. 1.5, mijiedarbība ar pieturu parādīta Att. 1.6.



Att. 1.5. Piedāvātās transporta sistēmas elementu mijiedarbība ar esošo sistēmu



Att. 1.6. Piedāvātās sabiedriskā transporta sistēmas elementu mijiedarbība ar esošo

1.4.3. Pilsētas transporta sistēmas kopu apraksts

Saskaņā ar sarakstu teorijas terminoloģiju [20,44,99,100] un kopu teoriju [19] transporta sistēmas kopas var aprakstīt sekojoši

P – procesoru (nekustīgo objektu) kopa

P^1 – dzelzceļa posmu kopa – vadāmo/nevadāmo procesoru apakškopa

P^2 – pārbrauktuvju kopa - vadāmo procesoru apakškopa

P^3 – dzelzceļa staciju kopa - vadāmo procesoru apakškopa

P^4 – autoceļu un ielu posmu kopa – vadāmo/nevadāmo procesoru apakškopa

P^5 – sabiedriskā transporta pieturu kopa - nevadāmo procesoru apakškopa

P^6 – ielu krustojumu kopa - vadāmo/nevadāmo procesoru apakškopa

m – procesoru skaits

p – procesors, neatkarīgi no apakškopas piederības

$m^1, \dots, m^6$ – procesoru apakškopu elementu skaits

$p^1, \dots, p^6$ – procesors, kurš pieder procesoru apakškopai

C – procesora apstrādes elementu kopa

U – uzdevumu (kustīgo objektu) kopa

U^1 – vilcieni - uzdevumu U apakškopa

U^2 – kravas automašīnu kopa - uzdevumu U apakškopa

U^3 – autobusu kopa - uzdevumu U apakškopa

U^4 – tramvaju kopa - uzdevumu U apakškopa

U^5 – trolejbusu kopa - uzdevumu U apakškopa

n – uzdevumu skaits

u – uzdevums, neatkarīgi no apakškopas piederības

$n^1, \dots, n^5$ – uzdevumu apakškopu elementu skaits

$u^1, \dots, u^5$ – uzdevums, kas pieder uzdevuma apakškopai

- Laikam pakārtoto mainīgo kopas

Σ – sarakstu kopa

σ – saraksts

(laika momentu kopa, atbilst gan katram uzdevumam, gan katram procesoram)

T – laika intervālu kopa

dt – laika intervāls

t – laika moments

t_s – laika intervāla sākuma laika moments

t_b – laika intervāla beigu laika moments

t_{vest} – signāla padošanas moments pirms pārbrauktuves aizvēršanas

- Statisko elementu kopas

L – luksoforu kopa

(transporta plūsmu vadības elektriskie objekti, nosaka procesoru vadāmību, katram luksoforam atbilst vismaz viens procesors)

L^1 – dzelzceļa luksofori - luksoforu apakškopa

L^2 – ielas luksofori - luksoforu apakškopa

L^3 – pārbrauktuves luksofori - luksoforu apakškopa

- Maršrutu kopas

R – transporta maršrutu kopa

(sakārtota procesoru kopa, ir katram uzdevumam ir konstanta un nemainīga sliežu un pilsētas sabiedriskajām transportam, individuāla un mainīga kravas un vieglajām automašīnām)

R^1 – vilcienu maršrutu kopa - maršrutu R apakškopa

R^2 – kravas automašīnu maršrutu kopa - maršrutu R apakškopa

R^3 – autobusu maršrutu kopa - maršrutu R apakškopa

R^4 – tramvaju maršrutu kopa - maršrutu R apakškopa

R^5 – trolejbusu maršrutu kopa - maršrutu R apakškopa

- Papildus nosacījumi

i, j, k – indeksi

χ – ģeogrāfiskais platums

ψ – ģeogrāfiskais garums

s – attālums

v – ātrums

a – paātrinājums

g – garums

Q – varbūtība

T_Σ – summārais dīkstāves laiks (visu transporta vienību stāvēšanas laika pie slēgtas pārbrauktuves summa)

Δt – laika starpība (nobīde)

$\leftarrow, \rightarrow$ – virziena indekss, pielieto abus vienā izteiksmē, pretējo virzienu definēšanai

1.4.4. Procesoru apraksts

- Dzelzceļa posmi

P^1 - dzelzceļa posmu kopas elementu parametri:

$\chi_s^{p^1}$ - dzelzceļa posma sākuma punkta ģeogrāfiskais platums

$\psi_s^{p^1}$ - dzelzceļa posma sākuma punkta ģeogrāfiskais garums

$\chi_b^{p^1}$ - dzelzceļa posma beigu punkta ģeogrāfiskais platums

$\psi_b^{p^1}$ - dzelzceļa posma beigu punkta ģeogrāfiskais garums

g^{p^1} - dzelzceļa posma garums;

$v_{\max}^{p^1}$ - dzelzceļa posma maksimālais ātrums;

l^{p^1} - dzelzceļa posma luksofors (var nebūt definēts)

- Pārbrauktuves

P^2 - pārbrauktuves kopas elementu parametri:

C – sliežu ceļu kopa

$\chi_{dz}[p^2]_s^c$ - c-tā pārbrauktuves dzelzceļa posma sākuma punkta ģeogrāfiskais platums

$\psi_{dz}[p^2]_s^c$ - c-tā pārbrauktuves dzelzceļa posma sākuma punkta ģeogrāfiskais garums

$\chi_{dz}[p^2]_b^c$ - c-tā pārbrauktuves dzelzceļa posma beigu punkta ģeogrāfiskais platums

$\psi_{dz}[p^2]_b^c$ - c-tā pārbrauktuves dzelzceļa posma beigu punkta ģeogrāfiskais garums

$g_{dz}[p^2]$ - c-tā pārbrauktuves dzelzceļa posma garums

$\chi_{auto}[p^2]_s^{\rightarrow}$ - pārbrauktuves autoceļa posma sākuma punkta ģeogrāfiskais platums

$\psi_{auto}[p^2]_s^{\rightarrow}$ - pārbrauktuves autoceļa posma sākuma punkta ģeogrāfiskais garums

$\chi_{auto}[p^2]_b^{\rightarrow}$ - pārbrauktuves autoceļa posma beigu punkta ģeogrāfiskais platums

$\psi_{auto}[p^2]_b^{\rightarrow}$ - pārbrauktuves autoceļa posma beigu punkta ģeogrāfiskais garums

$\chi_{auto}[p^2]_s^{\leftarrow}$ - pārbrauktuves pretējā virziena autoceļa posma sākuma punkta ģeogrāfiskais platums

$\psi_{auto}[p^2]_s^{\leftarrow}$ - pārbrauktuves pretējā virziena autoceļa posma sākuma punkta ģeogrāfiskais garums

$\chi_{auto}[p^2]_b^{\leftarrow}$ - pārbrauktuves pretējā virziena autoceļa posma beigu punkta ģeogrāfiskais platums

$\psi_{auto}[p^2]_b^{\leftarrow}$ - pārbrauktuves pretējā virziena autoceļa posma beigu punkta ģeogrāfiskais garums

g^{p^2} - pārbrauktuves autoceļa garums;

$v_{c\max}^{p^2}$ - c-tā pārbrauktuves dzelzceļa posma maksimālais ātrums;

$L_{p^2}^1$ - pārbrauktuves dzelzceļa luksoforu kopa;

$L_{p^2}^3$ - pārbrauktuves automašīnu luksoforu kopa;

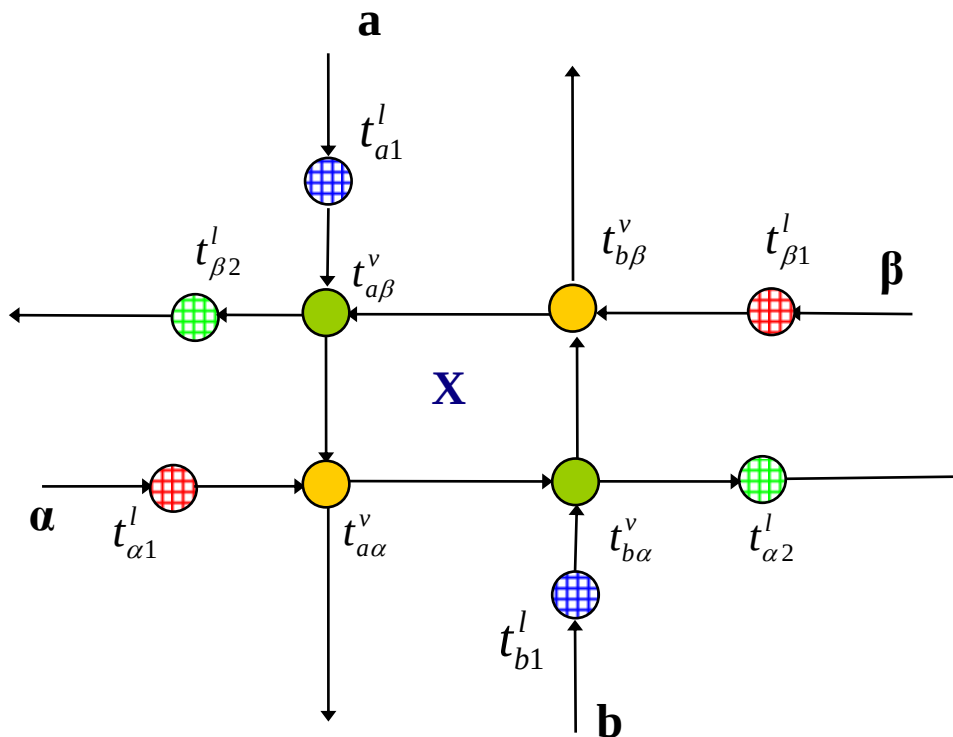
$t_{apr}^{p^2}$ - pārbrauktuves automašīnu luksofora ieslēgšanas aprēķina laiks pie $v^{u^1} = v_{c\max}^{p^2}$.

1.4.5. Izstrādātais pārbrauktuves matemātiskais modelis

Att. 1.7 ir attēloti dzelzceļa pārbrauktuves darbību raksturojošie sliežu un autotransporta plūsmu savstarpējās mijiedarbības mezglu punkti:

α, β - sliežu transporta plūsmas;

a, b – autotransporta plūsmas.



Att. 1.7 pārbrauktuves darbību raksturojošie sliežu un autotransporta plūsmu savstarpējās mijiedarbības mezglu punkti

Grafa katru mezglu punktu raksturo trīs parametri:

$a1: < \chi_{a1}, \psi_{a1}, t_{a1} >$ - mezgls ar mainīgām ģeogrāfiskā garuma un platuma koordinātēm un fiksētu laika momentu, kurā autotransporta a plūsmas vienība saņem signālu par pārbrauktuves slēgšanu;

$b1: < \chi_{b1}, \psi_{b1}, t_{b1} >$ - mezgls ar mainīgām ģeogrāfiskā garuma un platuma koordinātēm un fiksētu laika momentu, kurā autotransporta b plūsmas vienība saņem signālu par pārbrauktuves slēgšanu;

$\alpha 1: < \chi_{\alpha 1}, \psi_{\alpha 1}, t_{\alpha 1} >$ - mezgls ar mainīgām ģeogrāfiskā garuma un platuma koordinātēm un fiksētu laika momentu, kurā sliežu transporta α plūsmas vienība nosūta signālu par pārbrauktuves slēgšanu;

$\alpha 2: < \chi_{\alpha 2}, \psi_{\alpha 2}, t_{\alpha 2} >$ - mezgls ar mainīgām ģeogrāfiskā garuma un platuma koordinātēm un fiksētu laika momentu, kurā sliežu transporta α plūsmas vienība nosūta signālu par pārbrauktuves atvēršanu;

$\beta 1: < \chi_{\beta 1}, \psi_{\beta 1}, t_{\beta 1} >$ - mezgls ar mainīgām ģeogrāfiskā garuma un platuma koordinātēm un fiksētu laika momentu, kurā sliežu transporta β plūsmas vienība nosūta signālu par pārbrauktuves slēgšanu;

$\beta 2: < \chi_{\beta 2}, \psi_{\beta 2}, t_{\beta 2} >$ - mezgls ar mainīgām ģeogrāfiskā garuma un platuma koordinātēm un fiksētu laika momentu, kurā sliežu transporta β plūsmas vienība nosūta signālu par pārbrauktuves atvēršanu;

$a\alpha: < \chi_{a\alpha}, \psi_{a\alpha}, t_{a\alpha} >$ - mezgls ar konstantām ģeogrāfiskā garuma un platuma koordinātēm un mainīgu laika momentu, kurā ir iespējama transporta a un α plūsmas vienību sadursme;

$a\beta: < \chi_{a\beta}, \psi_{a\beta}, t_{a\beta} >$ - mezgls ar konstantām ģeogrāfiskā garuma un platuma koordinātēm un mainīgu laika momentu, kurā ir iespējama transporta a un β plūsmas vienību sadursme;

$b\alpha: < \chi_{b\alpha}, \psi_{b\alpha}, t_{b\alpha} >$ - mezgls ar konstantām ģeogrāfiskā garuma un platuma koordinātēm un mainīgu laika momentu, kurā ir iespējama transporta b un α plūsmas vienību sadursme;

$b\beta: < \chi_{b\beta}, \psi_{b\beta}, t_{b\beta} >$ - mezgls ar konstantām ģeogrāfiskā garuma un platuma koordinātēm un mainīgu laika momentu, kurā ir iespējama transporta b un β plūsmas vienību sadursme.

- Infrastruktūras konstantes
 - S_{ST_i, ST_j} – attālums starp stacijām ST_i, ST_j , m
 - $S_{ST, LC}$ – attālums no stacijas ST līdz pārbrauktuvei LC , m
 - t_{clos}^{calc} - pārbrauktuves minimālais aizvēršanas laiks, s
 - d - virziens - $d \in \{nepara, para\}$
 - $R^d = \{R1, R2, \dots\}$ - maršrutu kopa katrā virzienā d
 - Sc_R^d - attālums no barjeras aizvēršanas signāla punkta līdz pārbrauktuvei katram maršrutam R katrā virzienā d , m
 - So_R^d - attālums no pārbrauktuves līdz barjeras atvēršanas signāla punktam katram maršrutam R katrā virzienā d , m
 - tc_R^d - laika aizture starp barjeras aizvēršanas punkta sasniegšanas momentu un reālo barjeras slēgšanas momentu katram maršrutam R katrā virzienā d , s
 - to_R^d - laika aizture starp reālo barjeras aizvēršanas momentu un kustības maršrutā uzsākšanu katram maršrutam R katrā virzienā d , s

- Sst_R^d - attālumš no barjeras atvēršanas kontrolpunkta līdz stacijai katram maršrutam R katrā virzienā d, m
- Ritošo sastāvu raksturojošas konstantes
 - id – sastāva id numurs
 - t – sastāva tips
 - d – kustības virziens
 - R - maršruts
 - Lw – vagona garums, m
 - Nw – vagonu skaits
 - L – vilciena garums, m
 - V - sākuma ātrums, m/s
 - V_{max} – maksimālais normatīvais pieļaujamais ātrums, m/s
 - Td – atiešanas laiks pēc saraksta, min
 - Ta – pienākšanas laiks pēc saraksta, min
 - a – normatīvos noteiktais paātrinājums, m/s^2
 - b – normatīvos noteiktais bremzēšanas palēninājums, m/s^2
- Vienādojumi katras ritošā sastāva vienības aprēķinam
 - $t_a = (V_{max} - V) / a$ (1.4.1)
paātrināšanās laiks līdz maksimālajam ātrumam, s
 - $S_a = (V_{max} - V) \cdot t_a / 2$ (1.4.2)
paātrināšanās ceļš līdz maksimālajam ātrumam, m
 - $S_{const} = |(S_{ST,LC} - Sc_R^d)| - S_a$ (1.4.3)
pārvietošanās attālums ar konstantu ātrumu līdz barjeras aizvēršanai, m
 - $t_{const} = S_{const} / V_{max}$ (1.4.4)
pārvietošanās laiks ar konstantu ātrumu līdz barjeras aizvēršanai, s
 - $t_{total} = t_a + t_{const}$ (1.4.5)
kopējais laiks no kustības uzsākšanas līdz barjeras aizvēršanai, s
 - IF $S_{ST,LC} \geq Sc_R^d$ THEN
 - $t_{clos} = Td \cdot 60 + t_{total} + tc_R^d$ (1.4.6)
pārbrauktuves aizvēršanas laiks, s

ELSE :

$$\circ \quad t_{clos} = Td \cdot 60 - t_{total} + tc_R^d \quad (1.4.7)$$

pārbrauktuves aizvēršanas laiks, s

$$\circ \quad S_{clos} = S_a + S_{const} + tc_R^d \cdot V_{max} \quad (1.4.8)$$

attālums no kustības uzsākšanas līdz barjeras aizvēršanas punktam, m

$$\circ \quad S_{clos,LC} = S_{ST,LC} - S_{clos} \quad (1.4.9)$$

attālums no barjeras aizvēršanas punkta līdz pārbrauktuvei, m

$$\circ \quad t_{clos,LC} = S_{clos,LC} / V_{max} \quad (1.4.10)$$

laiks kustībā no barjeras aizvēršanas punkta līdz pārbrauktuvei, s

$$\circ \quad t_b = V_{max} / b \quad (1.4.11)$$

bremzēšanas laiks braucot ar maksimālo ātrumu, s

$$\circ \quad S_b = t_b \cdot V_{max} / 2 \quad (1.4.12)$$

bremzēšanas ceļš braucot ar maksimālo ātrumu, m

IF $S_b > Sst_R^d$ *AND* $t^{RS} = \text{'with stop'}$ *THEN :*

$$\circ \quad t_{const}^{last} = (Td - Ta) \cdot 60 - t_a - t_b \quad (1.4.13)$$

pēdējā vagona kustības laiks braucot ar konstantu maksimālo ātrumu, s

$$\circ \quad S_{const}^{last} = V_{max} \cdot t_{const}^{last} \quad (1.4.14)$$

pēdējā vagona kustības ceļš braucot ar konstantu maksimālo ātrumu, m

$$\circ \quad So^{last} = S_{ST1,ST2} + L - Sst_R^d - S_a - S_{const}^{last} \quad (1.4.15)$$

attālums no pēdējā vagona bremzēšanas punkta līdz barjeras atvēršanas punktam, m

$$\circ \quad t_{br,op}^{last} = \frac{-V_{max} + \sqrt{V_{max}^2 + 2 \cdot (-b) \cdot So^{last}}}{(-b)} \quad (1.4.16)$$

laiks no pēdējā vagona bremzēšanas punkta līdz barjeras atvēršanas punktam, s

$$\circ \quad t_{open} = t_{clos} + t_a + t_{const}^{last} + t_{br,op}^{last} \quad (1.4.17)$$

pārbrauktuves atvēršanas laiks, s

ELSE :

$$\circ \quad S_{clos,open} = (S_{ST,LC} - S_{clos}) + So_R^d + L \quad (1.4.18)$$

attālums no patiesā barjeras aizvēršanas punkta līdz atvēršanās punktam, m

$$\circ \quad t_{open} = t_{clos} + S_{clos,open} / V_{max} \quad (1.4.19)$$

pārbrauktuves atvēršanas laiks, s

IF $to_R^d > 0$ *THEN*

$$\circ \quad t_{clos} = 0 \quad (1.4.20)$$

pārbrauktuves aizvēršanas laiks, s

$$\circ \quad S_{clos} = S_{ST,LC} \quad (1.4.21)$$

attālums no kustības uzsākšanas līdz barjeras aizvēršanas punktam, m

$$\circ \quad S_{clos,open} = S_{clos,LC} + So_R^d + L \quad (1.4.22)$$

attālums no barjeras aizvēršanas punkta līdz atvēršanas punktam, m

$$\circ \quad \text{IF } S_a \leq S_{clos,open} \text{ THEN } t_{open} = t_{clos} + t_a + (S_{clos,open} - S_a) / V_{\max} \quad (1.4.23)$$

$$\circ \quad \text{ELSE : } t_{open} = t_{clos} + \sqrt{2S_{clos,open} / a} \quad (1.4.24)$$

pārbrauktuves atvēršanas laiks, s

1.5. Sarakstu teorijas uzdevumu matemātiskā nostādne

1.5.1. Sarakstu sastādīšanas uzdevumi viena procesora gadījumā

Darbu sakārtošana ar nevienlaicīgu ierašanās laiku un direktīvajiem termiņiem [99]

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- katra uzdevuma $u \in U$:
 - izpildes laiks $l(u) \in \mathbb{Z}^+$
 - uzsākšanas laika moments $r(u) \in \mathbb{Z}_0^+$
 - direktīvais termiņš $d(u) \in \mathbb{Z}^+$

kur :

$\mathbb{Z}^+$ - veselu pozitīvu skaitļu kopa, $\mathbb{Z}_0^+$ - veselu pozitīvu skaitļu kopa un 0

Darbu sakārtošanas ar nevienlaicīgu ierašanās laiku un direktīvajiem termiņiem mērķa funkcija:

$$\sigma_{SNLDT}(U) \rightarrow T \quad (1.5.1)$$

kur T - direktīvais izpildes termiņš

pie ierobežojumiem:

$$\begin{cases} \sigma(u) > \sigma(u') \Rightarrow \sigma(u) \geq \sigma(u') + l(u') \\ \sigma(u) \geq r(u), \quad \forall u \in U \\ \sigma(u) + l(u) \geq d(u), \quad \forall u \in U \end{cases} \quad (1.5.2)$$

Neizpildīto uzdevumu minimizācija

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Daļējs kopas U uzdevumu sakārtojums $\langle \cdot$
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - izpildes laiks $l(u) \in \mathbb{Z}^+$
 - direktīvais termiņš $d(u) \in \mathbb{Z}^+$
- Pozitīvs vesels skaitlis $K \geq |T|$

Neizpildīto uzdevumu minimizācijas mērķa funkcija

$$\sigma_{NU}(U) \rightarrow T \quad (1.5.3)$$

pie ierobežojumiem:

$$\begin{cases} K \geq |U'| \subseteq U, \quad \sigma(u') + l(u') > d(u') \\ u \langle \cdot u' \Rightarrow \sigma(u) + l(u) < \sigma(u') \end{cases} \quad (1.5.4)$$

Nepaveikto uzdevumu svaru koeficienta vērtības minimizācija

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - izpildes laiks $l(u) \in \mathbb{Z}^+$
 - svaru koeficients $\omega(u) \in \mathbb{Z}^+$
 - direktīvais termiņš $d(u) \in \mathbb{Z}^+$
- Pozitīvs skaitlis K

Nepaveikto uzdevumu svaru koeficienta minimizācijas mērķa funkcija

$$\sigma_{NUSM}(U) \rightarrow T \quad (1.5.5.)$$

pie ierobežojumiem:

$$\begin{cases} \sum \omega(u) \leq K \\ \sigma(u) + l(u) > d(u) \end{cases} \quad (1.5.6)$$

Darbu pabeigšanas svērtā momenta minimizācija

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Daļējs kopas U uzdevumu sakārtojums $\langle \cdot \rangle$,
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - izpildes laiks $l(u) \in \mathbb{Z}^+$
 - svaru koeficients $\omega(u) \in \mathbb{Z}^+$
- Pozitīvs skaitlis K .

Darbu pabeigšanas svērtā momenta minimizācijas mērķa funkcija:

$$\sigma_{DPSM}(U) \rightarrow T \quad (1.5.7)$$

pie ierobežojumiem:

$$\begin{cases} \sum_{u \in U} (\sigma(u) + l(u)\omega(u)) \leq K \\ u \langle \cdot u' \Rightarrow \sigma(u) + l(u) < \sigma(u') \end{cases} \quad (1.5.8)$$

Par nepaveiktajiem darbiem piešķiramo sodu minimizācija

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - izpildes laiks $l(u) \in \mathbb{Z}^+$,
 - svaru koeficients $\omega(u) \in \mathbb{Z}^+$
 - direktīvais termiņš $d(u) \in \mathbb{Z}^+$
- Pozitīvs vesels skaitlis K .

Par nepaveiktajiem darbiem piešķirama soda mērķa funkcija:

$$\sigma_{NDPS}(U) \rightarrow T \quad (1.5.9)$$

pie ierobežojumiem:

$$\begin{cases} \sum_u (\sigma(u) + l(u) - d(u))\omega(u) \leq K \\ \sigma(u) + l(u) > d(u) \end{cases} \quad (1.5.10)$$

Sakārtošanas uzdevums ar direktīvajiem termiņiem un pielāgošanas laiku

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,

- Procesora apstrādes elementu kopa C ,
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - izpildes laiks $l(u) \in Z^+$,
 - direktīvais termiņš $d(u) \in Z^+$
 - apstrādes elements $k(u) \in C$
- Kā arī katram $c \in C$
 - pielāgošanas laiks $l(c) \in Z_0^+$.

Sakārtošanas uzdevuma ar direktīvajiem termiņiem un pielāgošanas laiku mērķa funkcija:

$$\sigma_{SDTPL}(U) \rightarrow T \quad (1.5.11)$$

pie ierobežojumiem:

$$\begin{cases} \sigma(u)' < \sigma(u') \\ \sigma(u') \geq \sigma(u) + l(u) + l(k(u')) \\ \sigma(u) \not\prec \sigma(u'') \not\prec \sigma(u') \\ k(u) \neq k(u') \end{cases} \quad (1.5.12)$$

Maksimālo izdevumu minimizācija

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Daļējs kopas U uzdevumu sakārtojums $\langle \cdot \rangle$,
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - izpildes laiks $l(u) \in Z^+$
 - paveikšanas izdevumi $c(u) \in Z$
- Pozitīvs vesels skaitlis K .

Maksimālo izdevumu minimizācijas mērķa funkcija

$$\sigma_{MI}(U) \rightarrow T \quad (1.5.13)$$

pie ierobežojuma:

$$\sum_{u': \sigma(u') \leq \sigma(H)} c(u) \leq K \quad (1.5.14)$$

1.5.2. Daudzprocesoru sarakstu sastādīšana paralēliem procesoriem

Daudzprocesoru saraksts [100]

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Procesoru skaits $m \in \mathbb{Z}^+$,
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - izpildes laiks $l(u) \in \mathbb{Z}^+$,
 - direktīvais termiņš $d(u) \in \mathbb{Z}^+$
- Kopējais direktīvais laiks $D \in \mathbb{Z}^+$

Daudzprocesoru saraksta mērķa funkcija:

$$\sigma_{DPS}(U) \rightarrow T \quad (1.5.15)$$

pie ierobežojumiem:

$$\begin{cases} \forall t \geq 0, \quad |U'| \leq m, \quad \sigma(u') \leq t < \sigma(u') + l(u') \\ \sigma(u) + l(u) \leq D \end{cases} \quad (1.5.16)$$

Saraksti ar prioritātes nosacījumu

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Procesoru skaits $m \in \mathbb{Z}^+$,
- Kopējais direktīvais laiks $D \in \mathbb{Z}^+$
- Daļējs kopas U uzdevumu sakārtojums $\langle \cdot \rangle$,
- Katra uzdevuma $u \in U$ izpildes laiks $l(u) \in \mathbb{Z}^+$

Saraksta ar prioritātes nosacījumu mērķa funkcija

$$\sigma_{SPRIOR}(U) \rightarrow T \quad (1.5.17)$$

pie ierobežojumiem:

$$\begin{cases} u \langle u' \Rightarrow \sigma(t') \geq \sigma(t) + l(t) = \sigma(t) + 1 \\ \sigma(u) + l(u) \leq D \end{cases} \quad (1.5.18)$$

Saraksti ar ierobežotiem resursiem

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Procesoru skaits $m \in \mathbb{Z}^+$,
- Kopējais direktīvais laiks $D \in \mathbb{Z}^+$
- Katra uzdevuma $u \in U$ izpildes laiks $l(u) = 1$
- Resursu skaits $r \in \mathbb{Z}^+$
- Resursu robežas $B_i, 1 \leq i \leq r$
- $0 \leq R_i(u) \leq B_i$

Saraksta ar ierobežotiem resursiem mērķa funkcija

$$\sigma_{SIR}(U) \rightarrow T \quad (1.5.19)$$

pie ierobežojumiem:

$$\begin{cases} u \langle u' \Rightarrow \sigma(t') \geq \sigma(t) + l(t) = \sigma(t) + 1 \\ \sigma(u) + l(u) \leq D \\ \sum_{u \in S(t)} R_i(u) \leq B_i, \quad \text{pie } \sigma(u) \leq t < \sigma(u) + l(u), q > 0 \end{cases} \quad (1.5.20)$$

Saraksti ar individuāliem direktīvajiem laikiem

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Procesoru skaits $m \in \mathbb{Z}^+$,
- Daļējs kopas U uzdevumu sakārtojums $\langle \cdot \rangle$,
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - izpildes laiks $l(u) = 1$,
 - direktīvais laiks $d(u) \in \mathbb{Z}^+$

Saraksta ar individuāliem direktīvajiem laikiem mērķa funkcija

$$\sigma_{SIDL}(U) \rightarrow T \quad (1.5.21)$$

pie ierobežojuma:

$$\forall u \in U \quad \sigma(u) + l(u) \leq d(u) \quad (1.5.22)$$

Saraksts ar pārtraukumiem

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Procesoru skaits $m \in \mathbb{Z}^+$,
- Kopējais direktīvais laiks $D \in \mathbb{Z}^+$
- Daļējs kopas U uzdevumu sakārtojums $\langle \cdot \rangle$,
- Katra uzdevuma $u \in U$ izpildes laiks $l(u) \in \mathbb{Z}^+$

Saraksta ar pārtraukumiem mērķa funkcija:

$$\sigma_{sp}(U) \rightarrow T \quad (1.5.23)$$

pie ierobežojumiem

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall t \geq 0, \quad |U'| \leq m, \quad \sigma(u') \leq t < \sigma(u') + l(u') \\ \sigma(u) + l(u) \leq D \\ u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^k \in u_i \in U \\ \sum_{j=1}^k l(u_i^j) = l(u_i) \\ \sigma(u_i^{j+1}) = \varsigma(u_i^j) + l(u_i^j) \end{array} \right. \quad (1.5.24)$$

Daudzprocesoru pabeigšanas svērtā momenta minimizācija

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Procesoru skaits $m \in \mathbb{Z}^+$,
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - izpildes laiks $l(u) \in \mathbb{Z}^+$
 - svaru koeficients $\omega(u) \in \mathbb{Z}^+$
- Pozitīvs skaitlis K .

Daudzprocesoru pabeigšanas svērtā momenta minimizācijas mērķa funkcija:

$$\sigma_{m-DPSM}(U) \rightarrow T \quad (1.5.25)$$

pie ierobežojuma:

$$\sum_{t \in T} (\sigma(t) + l(t)) \omega(t) \leq K \quad (1.5.26)$$

1.5.3. Konveijera tipa daudzprocesoru saraksti

Atvērtais konveijera tipa saraksts

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- procesoru skaits $m \in \mathbb{Z}^+$,
- kopējais direktīvais laiks $D \in \mathbb{Z}^+$
- katra uzdevuma $u \in U$:
 - operācijas $q_1[u], q_2[u], \dots, q_m[u]$
 - izpildes laiks $l(q) \in \mathbb{Z}^+$

Atvērtā konveijera tipa saraksta mērķa funkcija:

$$\sigma_{AKS}(U) \rightarrow T \quad (1.5.27)$$

pie ierobežojumiem:

$$\begin{cases} \sigma_i(u) > \sigma_i(u') \Rightarrow \sigma_i(u) \geq \sigma_i(u') + l(q_i[u']) \\ [\sigma_i(u), \sigma_i(u) + l(q_i[u])] \cap [\sigma_i(u'), \sigma_i(u') + l(q_i[u'])] = \emptyset & u \neq u' \\ \sigma_i(u) + l(q_i[u]) \leq D & \forall u \in U \\ 1 \leq i \leq m \end{cases} \quad (1.5.28)$$

Secīgs konveijera tipa saraksts

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Procesoru skaits $m \in \mathbb{Z}^+$,
- Kopējais direktīvais laiks $D \in \mathbb{Z}^+$
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - operācijas $q_1[u], q_2[u], \dots, q_m[u]$
 - operācijas izpildes laiks $l(q) \in \mathbb{Z}^+$

Secīgā konveijera tipa saraksta mērķa funkcija:

$$\sigma_{SKS}(U) \rightarrow T \quad (1.5.29)$$

pie ierobežojumiem:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_i(u) > \sigma_i(u') \Rightarrow \sigma_i(u) \geq \sigma_i(u') + l(q_i[u']) \\ [\sigma_i(u), \sigma_i(u) + l(q_i[u])] \cap [\sigma_i(u'), \sigma_i(u') + l(q_i[u'])] = \emptyset \quad u \neq u' \\ \sigma_i(u) + l(q_i[u]) \leq D \quad \forall u \in U \\ \sigma_{i+1}(u) \geq \sigma_i(u) + l(q_i[u]) \quad \forall u \in U \\ 1 \leq i \leq m \end{array} \right. \quad (1.5.30)$$

Secīgs saraksts bez gaidīšanas laika

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Procesoru skaits $m \in \mathbb{Z}^+$,
- Kopējais direktīvais laiks $D \in \mathbb{Z}^+$
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - operācijas $q_1[u], q_2[u], \dots, q_m[u]$
 - operācijas izpildes laiks $l(q) \in \mathbb{Z}^+$

Secīgā konveijera tipa saraksta bez gaidīšanas laika mērķa funkcija:

$$\sigma_{SKSBGL}(U) \rightarrow T \quad (1.5.31)$$

pie ierobežojumiem:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_i(u) > \sigma_i(u') \Rightarrow \sigma_i(u) \geq \sigma_i(u') + l(q_i[u']) \\ [\sigma_i(u), \sigma_i(u) + l(q_i[u])] \cap [\sigma_i(u'), \sigma_i(u') + l(q_i[u'])] = \emptyset \quad u \neq u' \\ \sigma_i(u) + l(q_i[u]) \leq D \quad \forall u \in U \\ \sigma_{i+1}(u) = \sigma_i(u) + l(q_i[u]) \quad \forall u \in U \\ 1 \leq i \leq m \end{array} \right. \quad (1.5.32)$$

Divprocesoru secīgs saraksts ar buferi

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Procesoru skaits $m = 2$,
- Kopējais direktīvais laiks $D \in \mathbb{Z}^+$
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - operācijas $q_1[u], q_2[u], \dots, q_m[u]$
 - operācijas izpildes laiks $l(q) \in \mathbb{Z}^+$
- „bufera ietilpība” $B \in \mathbb{Z}_0^+$

Divprocesoru secīgā saraksta ar buferi mērķa funkcija:

$$\sigma_{DSSB}(U) \rightarrow T \quad (1.5.33)$$

pie ierobežojumiem:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_i(u) > \sigma_i(u') \Rightarrow \sigma_i(u) \geq \sigma_i(u') + l(q_i[u']) \\ [\sigma_i(u), \sigma_i(u) + l(q_i[u])] \cap [\sigma_i(u'), \sigma_i(u') + l(q_i[u'])] = \emptyset \quad u \neq u' \\ \sigma_i(u) + l(q_i[u]) \leq D \quad \forall u \in U \\ \sigma_{i+1}(u) = \sigma_i(u) + l(q_i[u]) \quad \forall u \in U \\ \sigma_1(u) + l(q_1[u]) \leq t \leq B \\ \sigma_1(u) + l(q_1[u]) > t \leq B \\ 1 \leq i \leq m \\ t \geq 0 \end{array} \right. \quad (1.5.34)$$

Vispārīgs konveijera tipa saraksts

Dots:

- Uzdevumu kopa U ,
- Procesoru skaits $m = 2$,
- Kopējais direktīvais laiks $D \in \mathbb{Z}^+$
- Katra uzdevuma $u \in U$:
 - operācijas $q_1[u], q_2[u], \dots, q_k[u]$, $1 \leq k \leq n_u$
 - operācijas izpildes laiks $l(q) \in \mathbb{Z}^+$
 - operācijas izpildes procesors $p(q) \in \{1, 2, \dots, m\}$, $p(q_k[u]) \neq p(q_{k+1}[u])$

Vispārīga konveijera tipa saraksta mērķa funkcija:

$$\sigma_{VKS}(U) \rightarrow T \quad (1.5.35)$$

kur

$$\sigma_{VKS}(U) = (\sigma_1(\{u : p(q) = 1\} \rightarrow Z_0^+), \dots, \sigma_m(\{u : p(q) = m\} \rightarrow Z_0^+)) \quad (1.5.36)$$

pie nosacījumiem:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_i(q) > \sigma_i(q') \Rightarrow \sigma_i(q) \geq \sigma_i(q') + l[q'] \\ \sigma(q_{k+1}[u]) \geq \sigma(q_k[u]) + l(q_k[u]), \quad 1 \leq k \leq n_u \\ \sigma(q_{n_u}[u]) + l(t_{n_u}[u]) \leq D \end{array} \right. \quad (1.5.37)$$

1.6. Izstrādātā mērķa funkcija uzdevuma risināšanai

Mērķa funkcija tiek izteikta kā atsevišķu kritēriju kopa. Kā svarīgākie uzdevuma atrisināšanai tiek definēti sekojošie kritēriji:

- elektroenerģijas patēriņa kritērijs E (patērētā elektroenerģija transporta paātrināšanai)
- pretsadursmju kritērijs Q (dažādu transporta veidu vienību vienlaicīgas atrašanās plūsmu krustošanās punktos X varbūtība)
- plūsmu kustības pārtraukšanas kritērijs Θ (viena transporta veida dažādu pretējos virzienos braucošu vienību vienlaicīgas atrašanās plūsmu krustošanās punktos X)
- dīkstāves kritērijs T_{Σ} (transporta līdzekļu summārais dīkstāves laiks kopējā plūsmā)
- nobīdes kritērijs Δt_{sum} (izmaiņu rezultātā jaunizveidoto kustības sarakstu nobīde no jau esošā)

$$F(\Delta t) = \begin{cases} E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} \int_{t_1^j}^{t_2^j} UI dt \rightarrow \min \\ Q = Q(T_X^1 \cap \dots \cap T_X^i \cap \dots \cap T_X^n) \rightarrow \min \\ \Theta = \left| \left[t_{S \max}^{U^{2 \rightarrow}} ; t_{B \min}^{U^{2 \rightarrow}} \right] \cup \left[t_{S \max}^{U^{2 \leftarrow}} ; t_{B \min}^{U^{2 \leftarrow}} \right] \right| \rightarrow \min \\ T_{\Sigma} = f(\Sigma) \rightarrow \min \\ \Delta t_{sum} = f(\Sigma, \Sigma') \rightarrow \min \end{cases} \quad (1.6.1)$$

kur:

- $\Delta t = (\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n)$ - jaunizveidotā saraksta nobīžu no sākotnējā kopa
- n - elektriskā transporta vienību skaits
- k_i - $i^{tās}$ elektriskā transporta vienības paātrināšanās intervālu skaits
- U - tīkla spriegums (V) (pilsētas transportam nominālais spriegums 630V, dzelzceļa transportam nominālais spriegums 3kV)
- I - tīkla patērētā strāva (A)
- $\Sigma = \{\sigma_{11}, \dots, \sigma_{ij}, \dots, \sigma_{nm}\}$ - jaunizveidoto kustības sarakstu kopa, sastāvoša no dažādu transporta veidu vienību kustības sarakstu kopām, pie kam $i=1..n$ - transporta veidu indekss; $j=1..m_i$ - $i^{tās}$ transporta veida $j^{tās}$ vienības indekss,
- $\Sigma' = \{\sigma'_{11}, \dots, \sigma'_{ij}, \dots, \sigma'_{nm}\}$ - sākotnējo kustības sarakstu kopa,
- $\sigma_{ij} = (t_1^{ij}, \dots, t_k^{ij}, \dots, t_q^{ij})$ - $i^{tās}$ transporta veida $j^{tās}$ vienības saraksts, pie kam $k=1..q_{ij}$ - $i^{tās}$ transporta veida $j^{tās}$ vienības maršruta punkta indekss,

- t_k^{ij} - $i^{tā}$ transporta veida $j^{tās}$ vienības atrašanās laika intervāls $k^{tajā}$ maršruta punktā,
- $X = \{x_1, x_2, \dots, x_c\}$ - dažādu transporta veidu maršrutu krustojšanās punktu kopa,
- $T_x^i = (t_x^{i1}, \dots, t_x^{im_i})$ $x \in X$ - $i^{tā}$ transporta veida visu vienību atrašanās punktā x laika intervālu kopa,
- $[t_{B\min}^{U^{2\leftarrow}}; t_{S\max}^{U^{2\leftarrow}}]; [t_{B\min}^{U^{2\rightarrow}}; t_{S\max}^{U^{2\rightarrow}}]$ - dzelzceļa transporta pretējos virzienos braucošo vienību atrašanās punktā x laika intervāli.

Kopējās mērķa funkcijas aprēķināšana tiek veikta aprēķinot un normalizējot katru mērķa funkcijas kritēriju, turklāt katram kritērijam tiek piešķirts eksperta noteikts nozīmīgumu raksturojošs svara koeficients.

Mērķa funkcijas atsevišķo kritēriju normalizēšanai tiek izmantoti sekojoši vienādojumi

$$\begin{aligned}
 E_{norm} &= \frac{E_{\max} - E}{E_{\max} - E_{\min}} \\
 Q_{norm} &= Q \\
 \Theta_{norm} &= \frac{\Theta_{\max} - \Theta}{\Theta_{\max} - \Theta_{\min}} \\
 T_{\Sigma norm} &= \frac{T_{\Sigma} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \\
 \Delta t_{sum, norm} &= \frac{\Delta t - \Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}
 \end{aligned} \tag{1.6.2}$$

Tiek piedāvāts noteikt kritērijiem sekojošus svaru koeficientus:

α_E - elektroenerģijas patēriņa kritērija svaru koeficients

α_Q - pretsadursmju kritērija svaru koeficients

α_{Θ} - plūsmu kustības pārtraukšanas kritērija svaru koeficients

$\alpha_{T_{\Sigma}}$ - dīkstāves kritērija svaru koeficients

$\alpha_{\Delta t}$ - nobīdes kritērija svaru koeficients

pie kam tiek ievērota sakarība

$$\alpha_E + \alpha_Q + \alpha_{\Theta} + \alpha_{T_{\Sigma}} + \alpha_{\Delta t} = 1 \tag{1.6.3}$$

Tādejādi mērķa funkcijas vērtības aprēķins tiek izteikts ar šādu formulu:

$$F(\Delta t) = \alpha_E E_{norm} + \alpha_Q Q_{norm} + \alpha_\Theta \Theta_{norm} + \alpha_{T_\Sigma} T_{\Sigma norm} + \alpha_{\Delta t} \Delta t_{sum norm} \rightarrow \min \quad (1.6.4)$$

Dažādu transporta veidu vienību vienlaicīgas atrašanās plūsmu krustošanās punktos varbūtības Q aprēķināšanai kā vienkāršākais un laika resursu ziņā piemērotākais tiek izvēlēts normālsadalījuma likums. Normālsadalījums ir viens no nozīmīgākajiem varbūtības sadalījumiem [9]. 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 [51].

Ņemot vērā to, ka konkrētā uzdevuma risināšana saistīta ar pasažieru pārvadājumiem tiek noteikts, ka maksimālā nobīde ir vienāda ar 4s. Tas nozīmē, ka gadījumu varbūtība tiks aprēķināta ar vairāk kā 99,72% precizitāti. Izstrādātās mērķa funkcijas aprēķinam tiks izmantoti evolucionārie algoritmi, ģenētiskais un imūnais algoritms, kuri sīkāk ir aprakstīti promocijas darba sadaļā 2.5.

1.7. Izvirzītā hipotēze

Analizējot izstrādāto mērķa funkcijas kritērijus tiek izvirzīta šāda pamathipotēze:

- kādā ierobežotā laikā posmā izmantojot evolucionāros algoritmus var ģenerēt tādas kustību sarakstus

$$\Sigma^a = (\sigma\alpha_1, \sigma\alpha_2, \dots, \sigma\alpha_n); \Sigma^b = (\sigma\beta_1, \sigma\beta_2, \dots, \sigma\beta_m); \Sigma^a = (\sigma a_1, \sigma a_1, \dots, \sigma a_v); \Sigma^b = (\sigma b_1, \sigma b_2, \dots, \sigma b_z) \quad (1.7.1)$$

kur:

α, β - pretējos virzienos braucošās dzelzceļa transporta vienības

a, b - pretējos virzienos braucošās ceļu transporta vienības

n, m, v, z – transporta vienību skaiti

pie kuriem izpildās šādi nosacījumi:

1. α, β , an un bm punktos X neatrodas vienlaicīgi;

$$(d(a_{ts}) \cup d(b_{ts})) \cap (d(\alpha_{tb}) \cup d(\beta_{tb})) = \emptyset \quad (1.7.2)$$

kur: $d(a_{ts})$ un $d(b_{ts})$ – vienību a un b plūsmu krustošanās punktos X veicamo darbu sākuma momenti

$d(\alpha_{tb})$ un $d(\beta_{tb})$ – vienību α un β plūsmu krustošanās punktos X veicamo darbu beigu momenti

2. pretēji virzošās vienības α un β punktos X atrodas vienlaicīgi;

$$\text{ja } d(\alpha) > d(\beta), \text{ tad } \begin{cases} t_{\alpha}^s \leq t_{\beta}^s \\ t_{\alpha}^b \geq t_{\beta}^b \end{cases} \quad (1.7.3)$$

$$\text{un ja } d(\alpha) < d(\beta), \text{ tad } \begin{cases} t_{\alpha}^s \geq t_{\beta}^s \\ t_{\alpha}^b \leq t_{\beta}^b \end{cases} \quad (1.7.4)$$

kur t_{α}^s ; t_{α}^b un t_{β}^s ; t_{β}^b ir transporta vienību α un β darbu sākuma un beigu momenti

3. jaunizveidoto kustības sarakstu kopa ir labāka par jau esošo sarakstu kopu pēc visiem mērķa funkcijas kritērijiem

$$\begin{cases} f_E(\Delta t) < f_E(\Delta t_0) \\ f_Q(\Delta t) < f_Q(\Delta t_0) \\ f_{\Theta}(\Delta t) < f_{\Theta}(\Delta t_0) \\ f_{T_{\Sigma}}(\Delta t) < f_{T_{\Sigma}}(\Delta t_0) \\ f_{\Delta t_{sum}}(\Delta t) < f_{\Delta t_{sum}}(\Delta t_0) \end{cases} \quad (1.7.5)$$

kur:

$\Delta t = (\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n)$ - jaunizveidotā saraksta nobīžu kopa no sākotnējā

$\Delta t_0 = (0, 0, \dots, 0)$ - sākotnējais saraksts

1.8. Secinājumi par pirmo nodaļu

Pirmajā nodaļā tiek definēti šādi transporta sistēmas matemātiskie modeļi un procedūras:

1. Izveidotais pilsētas esošās transporta sistēmas matemātiskais modelis un definētie dažādu transporta tipu manīgie un konstantie lielumi dod iespēju risināt sarakstu uzlabošanas uzdevumus ar evolucionāro algoritmu pielietošanu
2. Izstrādāts transporta sistēmas modelis ar intelektuālo vadību, kurā tiek definēti pamatelementi, kas savukārt dod iespēju izveidot šīs transporta sistēmas funkcionālo prototipu
3. Izveidots pārbrauktuves matemātiskais modelis tās vadības datormodelēšanai
4. Definētie mērķa funkcijas kritēriji un to nozīmīgums dod iespēju skaitliski novērtēt sarakstus pēc izstrādātajiem kritērijiem

Promocijas pirmajā daļā izstrādātie modeļi, procedūras un definētā mērķa funkcija tiks izmantotas datormodeļa izveidei.

2. IZSTRĀDĀTIE ALGORITMI TRANSPORTA SISTĒMAS INFORMĀCIJAS PLŪSMU VADĪBAI UN KUSTĪBAS SARAKSTU VEIDOŠANAI

2.1. Situācijas raksturojums

Pašreiz visa pilsētas transporta sistēma kopumā pēc vienota algoritma netiek vadīta. Atsevišķi transporta veidu, autobusi, dzelzceļa transports, vadība tiek koordinēta, bet atrauti no kopējās sistēmas un neņemot vērā aktuālo situāciju pilsētas transporta sistēmā. Visas pilsētas transporta sistēmas vadīšana kopumā ir sarežģīta un saistīta ar daudziem praktiski grūti izpildāmiem vai neizpildāmiem nosacījumiem. Toties to transporta līdzekļus, kuri ir pakļauti kustības saraksta ievērošanai, vadīšana ir iespējama bez ievērojamas infrastruktūras pārveidošanas un bez pašu transporta līdzekļu vienību būtiskas pārbūves. Šinī nodaļā ir izstrādāti algoritmi gan mērķa funkcijas katra kritērija, gan mērķa funkcijas kopējās vērtības aprēķināšanai. Tāpat šinī nodaļā pielietojot imūno un ģenētisko algoritmu ir izstrādāts transporta sistēmas vadības modelis.

2.2. Mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanas algoritms pēc elektrotransporta patērētās enerģijas kritērija

Dots: visu pilsētas elektrotransporta un autobusu maršrutu krustošanās punktu - pieturu

koordinātes: $\chi_{p^5}^p = \{\chi_{p^5}^{p^1}, \chi_{p^5}^{p^2}, \dots, \chi_{p^5}^{p^c}\}$; $\psi_{p^5}^p = \{\psi_{p^5}^{p^1}, \psi_{p^5}^{p^2}, \dots, \psi_{p^5}^{p^c}\}$

$\chi_{p^5}^p$ - pieturas ģeogrāfiskais platums

$\psi_{p^5}^p$ - pieturas ģeogrāfiskais garums

c – pieturu p skaits $p \in P^5$

$\bar{V}^u$ - katras transporta vienības u vidējais ātrums m/s $u \in U^1 \cup U^2 \cup U^3$,

V_s - katras transporta vienības u ātruma standarta novirze m/s

Aprēķinot mērķa funkcijas vērtību pēc patērētās elektroenerģijas kritērija netiek ņemts vērā plūsmu kustības pārtraukšanas kritērijs Θ un dīkstāves kritērijs T_Σ

1.solis. Noteikt visu pilsētas transporta vienību pašreizējo ātrumu

$$V_{tek} = norm(\bar{V}^u, V_s) \quad \text{m/s} \quad (2.2.1)$$

2.solis Katram transporta līdzeklim, kura maršruts krustojas ar cita transporta līdzekļa maršrutu, noteikt:

2.1. pašreizējo atrašanās vietu maršrutā

$$< \chi_0^1, \psi_0^1 >; < \chi_0^2, \psi_0^2 >; \dots; < \chi_0^U, \psi_0^U >$$

2.2. attālumus $d_{u,p}$ no pašreizējās atrašanās vietas līdz visiem priekšā esošajiem maršrutu krustojšanās punktiem - pieturām

$$d_{u,p} = \sqrt{(\chi_1^{R^U} - \chi_0^{U_n})^2 + (\psi_1^{R^U} - \psi_0^{U_n})^2} + \sum_{i=2}^z \sqrt{(\chi_i^{R^U} - \chi_{i-1}^{R^U})^2 + (\psi_i^{R^U} - \psi_{i-1}^{R^U})^2} \text{ m} \quad (2.2.2)$$

pie kam $u \in U$ un $p \in P^5$; z – procesoru skaits līdz pieturai p saskaņā ar maršrutu

2.3. vidējo nepieciešamo braukšanas laiku $t_{vid.nepiecieš}^U$ no pašreizējās atrašanās vietas līdz maršrutu krustojšanās punktam

$$t_{vid.nepiecieš}^U = \left(\frac{d_{u,p}}{(\bar{V}^u + V_S)} + \frac{d_{u,p}}{(\bar{V}^u - V_S)} \right) / 2 \text{ s} \quad (2.2.3)$$

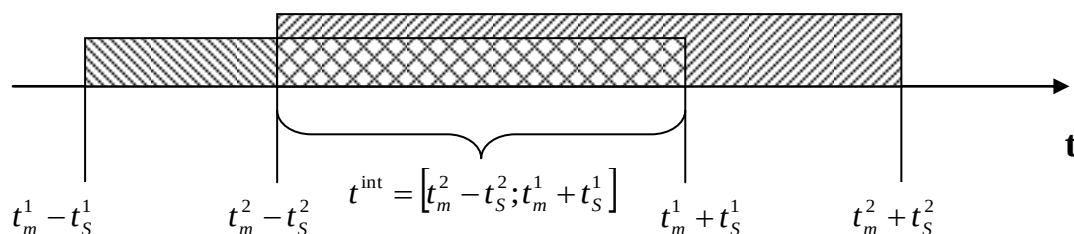
2.4. standarta novirzi laikam t_S^U

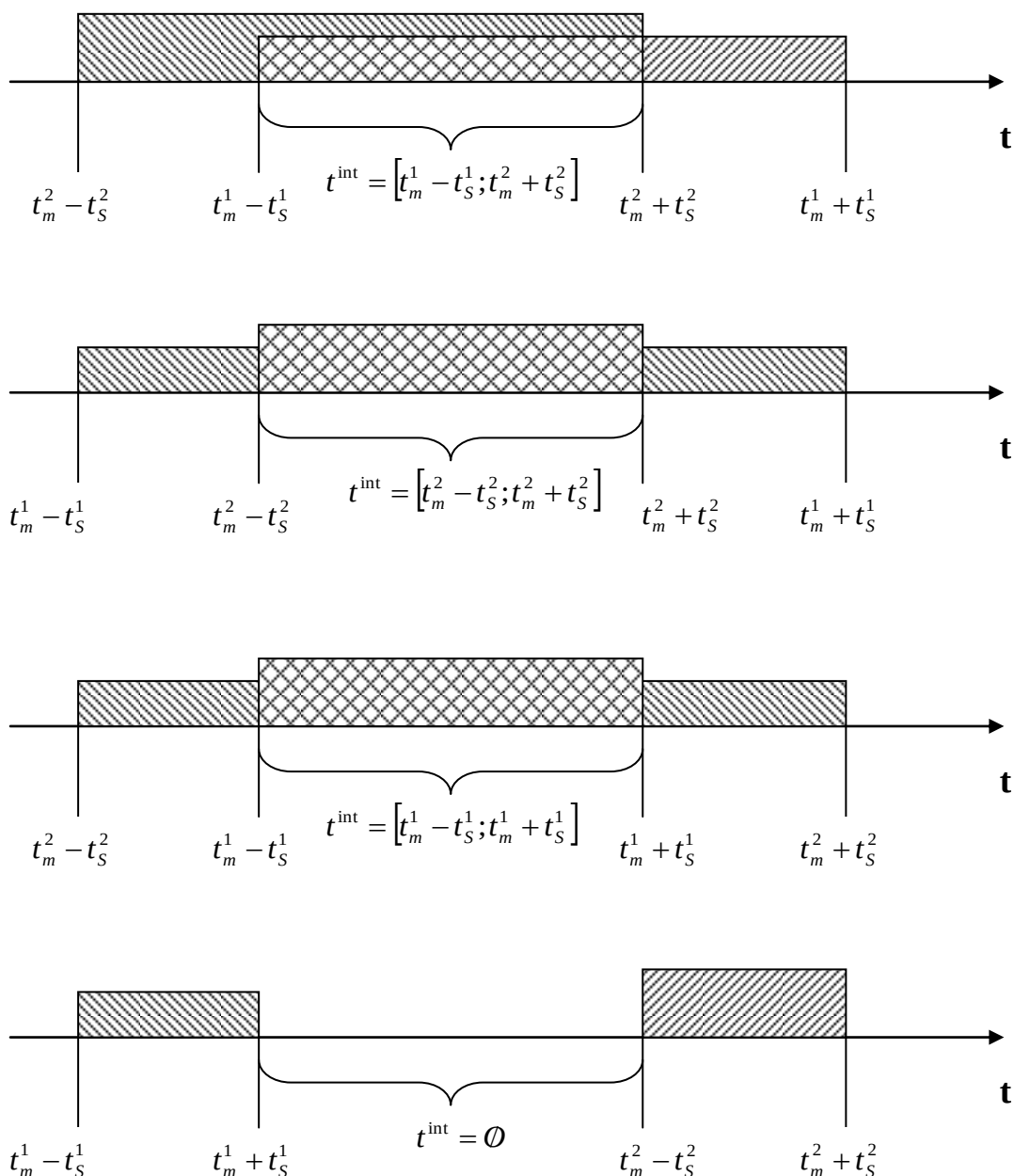
$$t_S^U = t_{vid.nepiecieš}^U - \frac{d_{u,p}}{\bar{V}^u + V_S} \text{ s} \quad (2.2.4)$$

3.solis. Noteikt laika normālā blīvuma sadalījuma krustojšanās intervālu t^{int} , kad attiecīgais sabiedriskā transporta vienību pāris $\langle u_1, u_2 \rangle$ vai $\langle u_1, u_3 \rangle$ atradīsies tiem atbilstošo maršrutu krustojšanās punktā p:

$$t^{int} = [t_{min}^{int}; t_{max}^{int}] = [t_{min}^1; t_{max}^1] \cap [t_{min}^2; t_{max}^2] \text{ s} \quad (2.2.5)$$

Iespējami vairāki blīvuma sadalījuma krustojšanās intervālu varianti Att. 2.1





Att. 2.1. Blīvuma sadalījuma krustošanās intervālu varianti

4.solis Noteikt varbūtību Q tam gadījumam ξ , kad transporta līdzekļi atradīsies maršrutu krustošanās punktā laika intervālā t^{int}

$$Q^{U^2 U^3} = \Phi\left(\frac{t_{\max}^{\text{int}} - t_{\text{vid.nepiecieš}}^{U^2 U^3}}{t_S^{U^2 U^3}}\right) - \Phi\left(\frac{t_{\min}^{\text{int}} - t_{\text{vid.nepiecieš}}^{U^2 U^3}}{t_S^{U^2 U^3}}\right) \quad (2.2.6)$$

5.solis Noteikt maksimālo varbūtību $Q^{\max}$ gadījumam, ka abi transporta līdzekļi kā neatkarīgi notikumi atradīsies maršrutu krustošanās punktā laika intervālā t^{int}

$$Q^{\max} = \max(Q_1^{U^2 U^3}; Q_2^{U^2 U^3}, \dots, Q_n^{U^2 U^3}) \quad (2.2.7)$$

6.solis. Aprēķināt katras elektrotransporta vienības papildus patērēto elektroenerģiju E^U , ja ir iespējama divu transporta līdzekļu atrašanās pieturā vienā laika intervālā:

IF $Q > 0$ THEN

$$\text{IF } t_{\text{vid1}}^U < t_{\text{vid2}}^U \quad (2.2.8)$$

$$E_2^U = E_2^U + E(0, 10) \quad (2.2.9)$$

ELSE

$$E_1^U = E_1^U + E(0, 10) \quad (2.2.10)$$

kur $E(0,10)$ – elektroenerģija patērēta elektrotransportam paātrinoties no 0 km/h līdz 10 km/h, lai piebrauktu tuvāk pieturai. Elektroenerģijas aprēķina formulas aprakstītas promocijas darba sadaļā 2.3

7. solis. Aprēķināt kopējo papildus elektroenerģijas patēriņu

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (2.2.11)$$

8. solis. Aprēķināt sarakstu izmaiņu summāro novirzi Δt no esošā

$$\Delta t_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^3 \Delta t^{U^i} \text{ s} \quad (2.2.12)$$

9.solis. Aprēķināt normalizētās vērtības:

9.1. enerģijas kritērijam

$$E_{\text{norm}} = \frac{E_{\max} - E}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (2.2.13)$$

9.2. nobīdes kritērijam

$$\Delta t_{\text{sum,norm}} = \frac{\Delta t - \Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}} \quad (2.2.14)$$

10.solis. Aprēķināt kopējo mērķa funkcijas vērtību

$$F = \alpha_E E + \alpha_Q Q^{\max} + \alpha_{\Delta t} \Delta t_{\text{sum,norm}} \quad (2.2.15)$$

2.3. Elektroenerģijas patēriņa aprēķina algoritms

Elektroenerģijas patēriņš elektrotransporta vienībām paātrinoties no 0 km/h līdz uzdotam ātrumam v_{uzd} tiek rēķināts šādi [7171] ;

Algoritmā izmantojamie apzīmējumi:

U_k - tīkla spriegums = 630 V,

I_k - tīkla strāva,

Rk - tīkla pretestība = 0.3 Omi,

E – tīkla enerģija

ie - dzinēja ierosmes strāva,

i - dzinēja enkura strāva,

cf - magnētiskā plūsma,

cm - momenta konstante,

n - rotācijas ātrums,

um - dzinēja spriegums,

g - impulsu regulatora koef.,

v – kustības ātrums (km/h)

Inicializācija: $v = 0$, $n = 0$, $dt = 0.1$

1. solis. IF $n * 22.55 < (630 - I_k * R_k - 480 * 0.125)$ (2.3.1)

THEN solis 1.1. ELSE solis 2.

1.1. solis. Aprēķināt elektrodzinēja apgriezienu izmaiņu dt intervālā:

$$dn = (1722 - (90.9 + 0.255 * n)) * dt / 252.5 \quad (2.3.2)$$

1.2. solis. Aprēķināt tekošo elektrodzinēja apgriezienu vērtību n:

$$n = n + dn \quad (2.3.3)$$

1.3. solis. Aprēķināt dzinēja spriegumu um:

$$um = n * 22.55 + 480 * 0.125 \quad (2.3.4)$$

1.4. solis. Aprēķināt impulsu regulatora koeficientu

$$g = um / (U_k - 480 * g * R_k) \quad (2.3.5)$$

1.5. solis. Aprēķināt tīkla strāvu

$$I_k = g * 480 \quad (2.3.6)$$

1.6. solis. Aprēķināt pašreizējo ātrumu

$$v = (n * \pi * 0.655 * 3.6) / 7.43 \quad (2.3.7)$$

1.7. solis. Aprēķināt patērēto elektroenerģiju

$$E = E + I_k * U_k * dt \quad (2.3.8)$$

1.8. solis. IF $v = v_{uzd}$ THEN Algoritma beigas ELSE solis 1.

2. solis. Uzstādīt dzinēja ierosmes strāvu ie un magnētisko plūsmu cf:

$$ie = 480; cf = ie / (4.578 + 0.0349 * ie) \quad (2.3.9)$$

3. solis. IF $ie > 240$ TAD solis 3.1. ELSE solis 4.

3.1. solis. Aprēķināt momenta konstanti cm

$$cm = cf / (2 * \pi) \quad (2.3.10)$$

3.2. solis. Aprēķināt jauno dzinēja apgriezienu skaita vērtību

$$n = n + (cm * 480 - (90.9 + 0.255 * n)) * dt / 252.5 \quad (2.3.11)$$

3.3. solis. Aprēķināt magnētisko plūsmu

$$cf = (U_k - 480 * R_k - 480 * 0.125) / n \quad (2.3.12)$$

3.4. solis. Aprēķināt jauno ierosmes strāvas vērtību

$$ie = cf * 4.578 / (1 - cf * 0.0349) \quad (2.3.13)$$

3.5. solis. Aprēķināt pašreizējo ātrumu

$$v = (n * \pi * 0.655 * 3.6) / 7.43 \quad (2.3.14)$$

3.6. solis. Aprēķināt patērēto elektroenerģiju

$$E = E + I_k * U_k * dt \quad (2.3.15)$$

3.7. solis. IF $v = v_{uzd}$ THEN Algoritma beigas ELSE solis 3.

4. solis. IF $ie \leq 240$ TAD solis 4.1. ELSE solis 3.

4.1. solis. Aprēķināt momenta konstanti cm

$$cm = cf / (2 * \pi) \quad (2.3.16)$$

4.2. solis. Aprēķināt jauno dzinēja apgriezienu skaita vērtību

$$n = n + (cm * i - (90.9 + 0.255 * n)) * dt / 252.5 \quad (2.3.17)$$

4.3. solis. Aprēķināt tīkla strāvu

$$I_k = i \quad (2.3.18)$$

4.4. solis. Aprēķināt magnētisko plūsmu

$$cf = (U_k - i * R_k - i * 0.125) / n \quad (2.3.19)$$

4.5. solis. Aprēķināt ierosmes strāvu

$$ie = cf * 4.578 / (1 - cf * 0.0349) \quad (2.3.20)$$

4.6. solis. Aprēķināt dzinēja enkura strāvu

$$i = 2 * ie \quad (2.3.21)$$

4.7. solis. Aprēķināt pašreizējo ātrumu

$$v = (n * \pi * 0.655 * 3.6) / 7.43 \quad (2.3.22)$$

4.8. solis. Aprēķināt patērēto elektroenerģiju

$$E = E + I_k * U_k * dt \quad (2.3.23)$$

4.9. solis. IF $v = v_{uzd}$ THEN Algoritma beigas ELSE solis 4.

2.4. Mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanas algoritms pēc pārbrauktuves šķērsošanas kritērija

Aprēķinot mērķa funkcijas vērtību pēc pārbrauktuves šķērsošanas kritērija netiek ņemts vērā elektroenerģijas patēriņa kritērijs.

2.4.1. Dažādu transporta veidu vienību vienlaicīgas atrašanās plūsmu krustošanās punktos varbūtības aprēķināšanas algoritms

Dots: visu autotransporta maršrutu un dzelzceļa transportu maršrutu krustošanās punktu

koordinātes $\chi_s^p = \{\chi_s^{p^1}, \chi_s^{p^2}, \dots, \chi_s^{p^c}\}$; $\psi_s^{p^1} = \{\psi_s^{p^1}, \psi_s^{p^2}, \dots, \psi_s^{p^c}\}$

χ_s^p - dzelzceļa posma (pārbrauktuves) sākuma punkta ģeogrāfiskais platums

ψ_s^p - dzelzceļa posma (pārbrauktuves) sākuma punkta ģeogrāfiskais garums

c – pārbrauktuves p skaits $p \in P^2$

$\bar{V}^u$ - katras transporta vienības u vidējais ātrums m/s $u \in U^1 \cup U^2 \cup U^3$,

V_s - katras transporta vienības u ātruma standarta novirze m/s

1.solis Veikt sadaļas 2.2. soļus 1; 2; un 3.

2.solis Noteikt varbūtību Q tam gadījumam ξ , kad

2.1.autotransports atradīsies maršrutu krustošanās punktā laika intervālā t^{int} skat
(2.2.6)

2.2. vilciens atradīsies maršrutu krustošanās punktā laika intervālā t^{int}

$$Q^{U_1} = \Phi\left(\frac{t_{\max}^{\text{int}} - t_{\text{vid.nepiecieš}}^{U_1}}{t_s^{U_1}}\right) - \Phi\left(\frac{t_{\min}^{\text{int}} - t_{\text{vid.nepiecieš}}^{U_1}}{t_s^{U_1}}\right) \quad (2.4.1)$$

3.solis Noteikt kopējo varbūtību Q^{kop}

$$Q^{\text{kop}} = Q^{U_2 U_3} * Q^{U_1} \quad (2.4.2)$$

4.solis Noteikt maksimālo varbūtību $Q^{\max}$ gadījumam, ka abi transporta līdzekļi atradīsies maršrutu krustošanās punktā laika intervālā t^{int}

$$Q^{\max} = \max(Q^{\text{kop1}}; Q^{\text{kop2}}; \dots, Q^{\text{kopn}}) \quad (2.4.3)$$

2.4.2. Dzelzceļa transporta pretējos virzienos braucošo vienību vienlaicīgas atrašanās plūsmu krustošanās punktos laika kritērija noteikšanas algoritms

Dots: visas autotransporta maršrutu un dzelzceļa transportu maršrutu krustošanās punktu (pārbrauktuvju) aizvēršanas un atvēršanas punktu koordinātes

$\chi_{dz}[p^2]_s^c$ - c-tā pārbrauktuves dzelzceļa posma sākuma punkta ģeogrāfiskais platums

$\psi_{dz}[p^2]_s^c$ - c-tā pārbrauktuves dzelzceļa posma sākuma punkta ģeogrāfiskais garums

$\chi_{dz}[p^2]_b^c$ - c-tā pārbrauktuves dzelzceļa posma beigu punkta ģeogrāfiskais platums

$\psi_{dz}[p^2]_b^c$ - c-tā pārbrauktuves dzelzceļa posma beigu punkta ģeogrāfiskais garums

c – pārbrauktuvju skaits

$\bar{V}^u$ - katras dzelzceļa transporta vienības vidējais ātrums m/s $u \in U^1$,

V_s^u - katras dzelzceļa transporta vienības ātruma standarta novirze m/s $u \in U^1$

L_u – katra vilciena $u \in U^1$ garums, m

t_{vest}^p – katras pārbrauktuves $p \in P^2$ direktīvais drošas aizvēršanas laiks s

1.solis Veikt sadaļā 2.2 aprakstīto algoritma soli 1

2.solis Katram dzelzceļa transporta līdzeklim noteikt:

2.1. pašreizējo pirmā vagona atrašanās vietu maršrutā

$$< \chi_0^{1pirm}, \psi_0^{1pirm} >; < \chi_0^{2pirm}, \psi_0^{2pirm} >; \dots; < \chi_0^{U_1pirm}, \psi_0^{U_1pirm} > \quad (2.4.4)$$

2.2. attālumu d_{pirm} no pirmā vagona pašreizējās atrašanās vietas līdz visām priekšā esošajām pārbrauktuvēm

$$d_{pirm} = \sqrt{(\chi_1^{R^U} - \chi_0^{U_n})^2 + (\psi_1^{R^U} - \psi_0^{U_n})^2} + \sum_{i=2}^z \sqrt{(\chi_i^{R^U} - \chi_{i-1}^{R^U})^2 + (\psi_i^{R^U} - \psi_{i-1}^{R^U})^2} \text{ m} \quad (2.4.5)$$

pie kam $u \in U$ un $p \in P^2$; z – procesoru skaits līdz pārbrauktuvei p saskaņā ar maršrutu

2.3. maksimālo nepieciešamo braukšanas laiku $t_{\max.pirm}$ pirmajam vagonam no pašreizējās atrašanās vietas līdz tuvākās pārbrauktuves aizvēršanas punktam

$$t_{\max.pirm} = \frac{d_{pirm}}{\bar{V}^u - V_s} - t_{vest}^p \text{ s} \quad (2.4.6)$$

2.4. minimālo nepieciešamo braukšanas laiku $t_{\min.pirm}$ pirmajam vagonam no pašreizējās atrašanās vietas līdz tuvākās pārbrauktuves aizvēršanas punktam

$$t_{\min.pirm} = \frac{d_{pirm}}{\bar{V}^u + V_S} - t_{vest}^p \text{ s} \quad (2.4.7)$$

2.5. maksimālo nepieciešamo braukšanas laiku $t_{\max.ped}$ pēdējam vagonam no pašreizējās atrašanās vietas līdz tuvākās pārbrauktuves atvēršanas punktam

$$t_{\max.ped} = \frac{d_{pirm} + L_{u^1}}{\bar{V}^u - V_S} \text{ s} \quad (2.4.8)$$

2.6. minimālo nepieciešamo braukšanas laiku $t_{\min.ped}$ pēdējam vagonam no pašreizējās atrašanās vietas līdz tuvākās pārbrauktuves atvēršanas punktam

$$t_{\min.ped} = \frac{d_{pirm} + L_{u^1}}{\bar{V}^u + V_S} \text{ s} \quad (2.4.9)$$

3.solis Aprēķināt katras pārbrauktuves:

3.1. vidējo aizvēršanas laiku

$$t_{vid}^{aizvers} = \frac{t_{\min.pirm}^{u^1,p} + t_{\max.pirm}^{u^1,p}}{2} \text{ s} \quad (2.4.10)$$

3.2. vidējo atvēršanas laiku

$$t_{vid}^{atvers} = \frac{t_{\min.ped}^{u^1,p} + t_{\max.ped}^{u^1,p}}{2} \text{ s} \quad (2.4.11)$$

4.solis Aprēķināt divām pretējos virzienos braucošām vienībām kopīgo pārbrauktuves atrašanās slēgtā stāvoklī laiku t_{slegts}^{kop}

$$t_{slegts}^{kop} = \left| \left[t_{sakuma}^{int} ; t_{beigu}^{int} \right] \right| = \left| \left[t_{vid}^{aizversU^{1 \rightarrow}} ; t_{vid}^{atversU^{1 \rightarrow}} \right] \cap \left[t_{vid}^{aizversU^{2 \leftarrow}} ; t_{vid}^{atversU^{2 \leftarrow}} \right] \right| \text{ s} \quad (2.4.12)$$

5.solis Aprēķināt summāro pretējos virzienos braucošo vienību pārbrauktuves atrašanās slēgtā stāvoklī laiku Θ

$$\Theta = \sum_{i=1}^n t_{slegts}^{kop\ i} \text{ s} \quad (2.4.13)$$

2.4.3. Autotransporta līdzekļu summārā dīkstāves laika noteikšanas algoritms un kustības sarakstu nobīdes formula

Dots: visu autotransporta maršrutu un dzelzceļa transportu maršrutu krustošanās punktu

koordinātes $\chi_s^p = \{\chi_s^{p^1}, \chi_s^{p^2}, \dots, \chi_s^{p^c}\}$; $\psi_s^{p^1} = \{\psi_s^{p^1}, \psi_s^{p^2}, \dots, \psi_s^{p^c}\}$; kur

χ_s^p - dzelzceļa posma (pārbrauktuves) sākuma punkta ģeogrāfiskais platums

ψ_s^p - dzelzceļa posma (pārbrauktuves) sākuma punkta ģeogrāfiskais garums

c – pārbrauktuviņu skaits

$\bar{V}^u$ - katras transporta vienības u vidējais ātrums m/s $u \in U^1 \cup U^2 \cup U^3$,

V_s - katras transporta vienības u ātruma standarta novirze m/s

L_u – katra vilciena $u \in U^1$ garums, m

t_{vest}^p – katras pārbrauktuves $p \in P^2$ direktīvais drošas aizvēršanas laiks

1.solis Veikt sadaļā 2.2. aprakstītos algoritma soļus 1; 2

2. solis. Veikt sadaļā 2.4.2 aprakstītos algoritma soļus 2.3 - 2.6; 3; 4; 5

3.solis. Aprēķināt katras autotransporta vienības dīkstāves laiku $t_{dikst}^{u^{2,3}}$

$$\text{IF } t_{\text{vid}}^{\text{aizvers}} \leq t_{\text{vid}, \text{nepiecieš}}^{u^{2,3}} \leq t_{\text{vid}}^{\text{atvers}} \text{ THEN } t_{dikst}^{u^{2,3}} = t_{\text{vid}}^{\text{atvers}} - t_{\text{vid}, \text{nepiecieš}}^{u^{2,3}} \text{ ELSE } t_{dikst}^{u^{2,3}} = 0$$

4.solis. Aprēķināt summāro autotransporta vienību dīkstāves laiku T_Σ

$$T_\Sigma = \sum_{i=1}^{n^{U^1}} t_{dikst}^i + \sum_{i=1}^{n^{U^2}} t_{dikst}^i \quad \text{s} \quad (2.4.14)$$

5.solis. Izmaiņu rezultātā jaunizveidoto kustības sarakstu nobīdes no jau esošā noteikšanas formula

$$\Delta t_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^3 \Delta t^{U^i} \quad \text{s} \quad (2.4.15)$$

2.4.4. Mērķa funkcijas kopējās vērtības aprēķina algoritms

Dots: visu autotransporta maršrutu un dzelzceļa transportu maršrutu krustošanās punktu

koordinātes: $\chi_s^p = \{\chi_s^{p^1}, \chi_s^{p^2}, \dots, \chi_s^{p^c}\}$; $\psi_s^{p^1} = \{\psi_s^{p^1}, \psi_s^{p^2}, \dots, \psi_s^{p^c}\}$

χ_s^p - dzelzceļa posma (pārbrauktuves) sākuma punkta ģeogrāfiskais platums

ψ_s^p - dzelzceļa posma (pārbrauktuves) sākuma punkta ģeogrāfiskais garums

c – pārbrauktuņu skaits

$\bar{V}^u$ – katras transporta vienības u vidējais ātrums m/s $u \in U^1 \cup U^2 \cup U^3$,

V_s – katras transporta vienības u ātruma standarta novirze m/s

L_u – katra vilciena $u \in U^1$ garums, m

t_{vest}^p – katras pārbrauktuves $p \in P^2$ direktīvais drošas aizvēršanas laiks, s

1.solis. Veikt sadaļā 2.4.3. aprakstītos algoritma soļus 1; 2; 3; 4; 5.

2.solis. Aprēķināt normalizētās vērtības:

2.1. vienlaicīguma kritērijam

$$\Theta_{\text{norm}} = \frac{\Theta_{\text{max}} - \Theta}{\Theta_{\text{max}} - \Theta_{\text{min}}} \quad (2.4.16)$$

2.2. dīkstāves kritērijam

$$T_{\Sigma \text{norm}} = \frac{T_{\Sigma} - T_{\text{min}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \quad (2.4.17)$$

2.3. nobīdes kritērijam

$$\Delta t_{\text{sum.norm}} = \frac{\Delta t - \Delta t_{\text{min}}}{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}} \quad (2.4.18)$$

3.solis. Aprēķināt kopējo mērķa funkcijas vērtību

$$F = \alpha_Q Q_{\text{norm}} + \alpha_{\Theta} \Theta_{\text{norm}} + \alpha_{T_{\Sigma}} T_{\Sigma \text{norm}} + \alpha_{\Delta t} \Delta t_{\text{sum.norm}} \quad (2.4.19)$$

2.5. Evolucionāro algoritmu izmantošana transporta plūsmu vadības uzlabošanai

2.5.1. Dubultās populācijas imūnais algoritms transporta plūsmu vadības uzlabošanai

Nomenklatūra

$A(0)$ – sākotnējā antiķermeņu populācija

$M(0)$ – sākotnējā atmiņas populācija

$N_c > n$ – vesels skaitlis, klonu izmērs

T_p^C – klonu pavairošanas operators

T_M^A – līdzības attīstīšanas operators

T_S^C - klonu izvēles operators

T_M^U - atmiņas papildināšanas operators

T_A^U - antiķermeņu papildināšanas operators

$T\%$ - atgriezeniskās saites koeficients

s - atmiņas populācijas izmērs

Dubultās populācijas imūnais algoritms tika izstrādāts kā efektīvs vispārēja pielietojuma algoritms lielizmēra optimizācijas uzdevumu risināšanai. Aplūko šādu uzdevumu

Maksimizēt $f(x)$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_D) \in \Omega$;

kur $f(x)$ ir mērķa funkcija, x ir D mainīgais vektors, $\Omega \subseteq D$ nosaka iespējamo risinājumu apgabalu, kurš D -dimensiju apgabalā ierobežots ar vērtībām $\underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i, i = 1, 2, \dots, D$

Tādejādi iespējamo risinājumu apgabals ir vienāds ar $\Omega = [\underline{x}, \bar{x}]$, kur $\underline{x} = (\underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_D)$ un $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_D)$

Uzdevumu risināšanā antiķermenis nozīmē meklējamo punktu iespējamo atrisinājumu apgabalā. Vienādojuma skaitliskās optimizācijas uzdevumos antiķermenis $a = (a_1, a_2, \dots, a_l)$ ir mainīgo vektora x kods, apzīmēts ar $a = \text{encode}(x)$, un x tiek saukts par antiķermeņa a atšifrējumu, izteiktu kā $x = \text{decode}(a)$. Tiek pieņemts normalizēts ar reālām vērtībām izsakāms attēlojums

$$a = \text{encode}(x) = (x - \underline{x}) / (\bar{x} - \underline{x}) \quad (2.5.1)$$

Tādejādi $l = D$ un $0 \leq a_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, D$

Vienādojumā aprakstītajā uzdevumā antiķermeņa a līdzības vērtība $\text{affinity}(a) > 0$ ir mērķa funkcijas $f(x)$ vērtības attēlošana kur $a = \text{encode}(x), x \in \Omega$. Tiek pieņemta sekojoša attēlošanas funkcija

$$\text{affinity}(a) = e^{f(x)} \text{ kur } x = \text{decode}(a) \quad (2.5.2)$$

Eksponentfunkcija ir palielināšanas funkcija un tā nodrošina līdzības vērtību pozitīvu $\text{affinity}(a) > 0$ visām antiķermeņu vērtībām.

Solis 1. Inicializācija. Pēc nejaušības principa tiek veidota inicializācijas jeb sākotnējā antiķermeņu populācija $A(0) = \{a_1(0), a_2(0), \dots, a_n(0)\}$. Tāpat pēc nejaušības principa tiek veidota sākotnējā atmiņas populācija $M(0) = \{m_1(0), m_2(0), \dots, m_s(0)\}$. Aprēķina līdzību visiem antiķermeņiem no kopām $A(0)$ un $M(0)$. Sākotnēji $k = 0$.

Solis 2. Klonu pavairošana. No kopas $A(k)$ pielietojot klonu pavairošanas operatoru T_p^C iegūst kopu $Y(k)$.

$$Y(k) = T_p^C(A(k)) = \{T_p^C(a_1(k)), T_p^C(a_2(k)), \dots, T_p^C(a_n(k))\} \quad (2.5.3)$$

kur $Y_i(k) = T_p^C(a_i(k)) = I_i \times a_i(k)$, $i = 1, 2, \dots, n$, pie kam I_i ir q_i dimensiju vienības vektors.

$$q_i(k) = \left\lfloor N_c \times \frac{\text{affinity}(a_i(k))}{\sum_{j=1}^n \text{affinity}(a_j(k))} \right\rfloor, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.5.4)$$

$q_i(k)$ vērtība ir proporcionāla līdzības mērvienībai. Pēc klonu pavairošanas populācija kļūst vienāda ar sekojošo

$$Y(k) = \{Y_1(k), Y_2(k), \dots, Y_n(k)\} \quad (2.5.5)$$

kur

$$Y_i(k) = \{y_{ij}(k)\} = \{y_{i1}(k), y_{i2}(k), \dots, y_{iq_i}(k)\}, \quad y_{ij}(k) = a_i(k), \quad j = 1, 2, \dots, q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.5.6.)$$

Solis 3. Līdzības attīstīšana. Līdzības attīstīšanas operators T_M^A darbojas pamatā ar diviem dažādošanas mehānismiem, tādiem kā hipermutācija un receptoru rediģēšana. Abos mehānismos gēni tiek nejauši mainīti, t.i. mutēti. Šādas izmaiņas reizēm var izraisīt antiķermeņu klonu līdzības palielināšanos, kas nav vēlama. Antiķermeņiem ir jādzēš līdzīgie gēni un ar rekombinācijas palīdzību jāveido pilnīgi jauni antiķermeņi, t.i. jāveic receptoru rediģēšana. Receptoru rediģēšana ļauj izvairīties no lokālo optimumu sasniegšanas un mazina antiķermeņu līdzību. Antiķermenim $y_{ij}(k)$, $j = 1, 2, \dots, q_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ populācijā $Y(k)$ tā daži skaitļi jāaizvieto ar nejaušu veselu skaitli no 0 līdz 9. Receptoru rediģēšana ir līdzīga vienotai rekombinācijai. Tiek rediģēts antiķermenis $a = (a_1, a_2, \dots, a_I)$. No pašreizējās atmiņas populācijas $M(k)$ tiek nejauši izvēlēts elements $m = (m_1, m_2, \dots, m_D)$. Tiek ģenerēts nejaušs Būla vektors $r = (r_1, r_2, \dots, r_D)$ kur $r_i \in \{0, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, D$ un tad jaunais antiķermenis a' tiks izteikts

$$\text{sekojoši } a' = (a'_1, a'_2, \dots, a'_D); \text{ kur } a'_i = \begin{cases} a_i & \text{ja } r_i = 0 \\ m_i & \text{ja } r_i = 1 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, D \quad (2.5.7)$$

Tātad, no kopas $Y(k)$ pielietojot līdzības attīstīšanas operatoru T_M^A iegūst kopu $Z(k)$

$$Z(k) = \{Z_1(k), Z_2(k), \dots, Z_n(k)\} \quad (2.5.8)$$

kur $Z_i(k) = \{z_{ij}(k)\} = \{z_{i1}(k), z_{i2}(k), \dots, z_{iq_i}(k)\}$, $z_{ij}(k) = T_M^A(y_{ij}(k))$,

$$j=1,2,\dots,q_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (2.5.9)$$

Solis 4. Novērtēšana. Līdzības aprēķināšana visiem kopas $Z(k)$ elementiem

Solis 5. Klonu izvēle. Pielietojot kopas $Z(k) \cup A(k)$ klonu izvēles operatoru T_S^C iegūst kopu $A(k+1)$.

Definē, ka $\forall i=1,2,\dots,n$; $z_i^*(k) \in Z_i(k)$ ir vislabākais antiķermenis kopā $Z_i(k)$, tad

$$a_i(k+1) = T_S^C(Z_i(k) \cup a_i(k)) = \begin{cases} z_i^*(k) & \text{if } \text{affinity}(a_i(k)) \leq \text{affinity}(z_i^*(k)) \\ a_i(k) & \text{if } \text{affinity}(a_i(k)) > \text{affinity}(z_i^*(k)) \end{cases} \quad (2.5.10)$$

Nākamā populācija tiek aprēķināta kā

$$A(k+1) = T_S^C(Z(k) \cup A(k)) = \{T_S^C(Z_1(k) \cup a_1(k)), T_S^C(Z_2(k) \cup a_2(k)), \dots, T_S^C(Z_n(k) \cup a_n(k))\} = \{a_1(k+1), a_2(k+1), \dots, a_n(k+1)\} \quad (2.5.11)$$

$$\text{kur } a_i(k+1) = T_S^C(Z_i(k) \cup a_i(k)), \quad i=1,2,\dots,n \quad (2.5.12)$$

Solis 6. Atmiņas populācijas papildināšana. Papildinot kopu $M(k)$ izmantojot atmiņas papildināšanas operatoru T_M^U iegūst jaunu atmiņas populāciju $M(k+1)$

Definē, ka $a^*(k+1) \in A(k+1)$ ir labākais antiķermenis populācijā $A(k+1)$, tad aprēķina atšķirību (attālumu) starp $a^*(k+1)$ un katru kopas $M(k)$ elementu. Ja atšķirība (attālums) starp $m_j(k)$ un $a^*(k+1)$ ir minimāla un tā vērtība ir δ_{j_0} tad ir divas iespējas. Pirmā, $\delta_{j_0} \leq \delta_0$ kur δ_0 ir minimālā atšķirība (attālums) starp katriem diviem kopas $M(k)$ elementiem, tad salīdzina $a^*(k+1)$ un $m_j(k)$ līdzību šādi

$$m_j(k+1) = \begin{cases} a^*(k+1) & \text{if } \text{affinity}(a^*(k+1)) > \text{affinity}(m_j(k)) \\ m_j(k) & \text{else} \end{cases} \quad (2.5.13)$$

Otrā gadījumā, ja $\delta_{j_0} > \delta_0$, tad antiķermeni $a^*(k+1)$ pievieno atmiņas populācijai un izdzēš sliktāko vērtību atmiņas populācijā. Rezultātā iegūst

$$M(k+1) = \{m_1(k+1), m_2(k+1), \dots, m_s(k+1)\} \quad (2.5.14)$$

Solis 7. Antiķermeņu populācijas papildināšana. To veic savstarpēji mijiedarbojoties $M(k+1)$ un $A(k+1)$ ar antiķermeņu papildināšanas operatoru T_A^U . Sliktākos t antiķermeņus no kopas $A(k)$ aizstāj ar nejauši izvēlētiem $t = \lfloor T\% \times s \rfloor$ antiķermeņiem no $M(k+1)$ kopas.

Solis 8. Pārtraukšanas kritērija pārbaude. Ja pārtraukšanas kritēriju nosacījumi ir apmierināti, algoritms tiek pārtraukts. Ja nē, tad $k = k+1$ un iet uz Solis2.

2.5.2. Ģenētiskais algoritms transporta plūsmu vadības uzlabošanai

Solis 1. Inicializācija. Inicializē sarakstu nobīdes kopu: $SNK = \{\Delta t^1, \Delta t^2, \dots, \Delta t^p\}$

$\Delta t^i = \{\Delta t_1^i, \Delta t_2^i, \dots, \Delta t_n^i\}$ - i-tā nobīžu kopa,

kur

p – populācijas izmērs (pāra skaitlis);

n – transporta līdzekļu skaits,

Δt_j^i - j-tā transporta līdzekļa nobīde no sākotnējā saraksta

i = 1...p; j = 1...n

Solis 2. Novērtēšana. Aprēķina (novērtē) pēc mērķa funkcijas:

$$MF = \{F(\Delta t^1), F(\Delta t^2), \dots, F(\Delta t^p)\} \quad (2.5.15)$$

Solis 3. Sakārtošana. Sakārtot sarakstu nobīžu kopas pēc novērtējuma:

$$\overline{SNK} = \{\overline{\Delta t^1}, \overline{\Delta t^2}, \dots, \overline{\Delta t^p}\} \quad F(\overline{\Delta t^1}) = \min(MF), \quad F(\overline{\Delta t^{i-1}}) \leq F(\overline{\Delta t^i}), \quad i = 2, p \quad (2.5.16)$$

Solis 4. Elītes veidošana. Izvēlēties labākās nobīžu kopas elites kopas veidošanai

$$SNK_{elite} \subset \overline{SNK} \quad (2.5.17)$$

Solis 5. Selekcijas procedūra. Tiek izvēlēts nejaušas selekcijas algoritms

$$SNK_{sel} = \overline{SNK} \quad (2.5.18)$$

5.1. ģenerē gadījuma skaitli $g \in [1, p]$

5.2. papildina selekcijas kopu SNK_{sel} ar g-to elementu no nobīžu kopas un no nobīžu kopas atņem g-to elementu.

$$SNK_{sel} = SNK_{sel} \cup \{\overline{\Delta t^g}\}, \quad \overline{SNK} = \overline{SNK} \setminus \{\overline{\Delta t^g}\} \quad (2.5.19)$$

5.3. Ja $\overline{SNK} = \emptyset$ tad selekcijas kopas papildināšana pabeigta. Pretējā gadījumā iet uz solis 5.1.

Ar šo procedūru tiek iegūta rekombinēta kopas SNK elementu kopa

$$SNK_{sel} = \{< \hat{\Delta t}^1, \hat{\Delta t}^2 >, \dots, < \hat{\Delta t}^{p-1}, \hat{\Delta t}^p >\} \quad (2.5.20)$$

Solis 6. Krustošanas procedūra. Tiek izvēlēta viena punkta krustošanas (Single point crossover, SPX)

6.1. solis: Definē bitu b, kurš sadala hromosomu s divās daļās

6.2. solis: No sarakstu nobīžu kopas SNK_{sel}^i kur i – paaudzes kārtas numurs izvēlas

pāri: $\langle \Delta t^{j^i}, \Delta t^{(j+1)^i} \rangle$

6.3. solis: Ģenerē jaunus bitus sarakstu nobīdēm izmantojot šādu likumu:

$$\begin{aligned} b_k^{j^{i+1}} &= \begin{cases} b_k^j, & \text{ja } k \leq b \\ b_k^{j+1}, & \text{ja } k > b \end{cases} \\ b_k^{j+1^{i+1}} &= \begin{cases} b_k^j, & \text{ja } k > b \\ b_k^{j+1}, & \text{ja } k \leq b \end{cases} \end{aligned} \quad (2.5.21)$$

kur k – bita indekss hromosomā ; $k = 1, 2, \dots, z$; kur z ir bitu skaits sarakstu nobīdes kopā

6.4. solis Nākošās paaudzes sarakstu nobīžu kopas sastāv no aprēķinātajiem bitiem

$$\begin{aligned} \Delta t^{j^{i+1}} &= \{b_1^{j^{i+1}}, b_2^{j^{i+1}}, \dots, b_z^{j^{i+1}}\} \\ \Delta t^{j+1^{i+1}} &= \{b_1^{(j+1)^{i+1}}, b_2^{(j+1)^{i+1}}, \dots, b_z^{(j+1)^{i+1}}\} \end{aligned} \quad (2.5.22)$$

6.5. solis Ja $j + 1 = p$, tad procedūru beidz ar jaunas $(i+1)$ paaudzes sarakstu nobīžu kopu:

$$SNK^{i+1} = \{\Delta t^{1^{i+1}}, \Delta t^{2^{i+1}}, \dots, \Delta t^{p-1^{i+1}}, \Delta t^{p^{i+1}}\} \quad (2.5.23)$$

Pretējā gadījumā iet uz 6.2. solis

Solis 7. Mutācijas procedūra. Nejaušu izmaiņu ieviešana algoritma darbības laikā.

Nepieļauj visu populācijas elementu vienveidību.

7.1. Ģenerē gadījuma skaitli $g = rand(1; 1/\mu)$

kur μ - mutācijas koeficients (tiek pieņemts 1/100)

7.2. Gēns mutē pēc šādas sakarības

Ja $b_k^j = 0$ tad

$$b_k^i = \begin{cases} 0, & \text{ja } g > 1 \\ 1, & \text{ja } g = 1 \end{cases} \quad (2.5.24)$$

pretējā gadījumā

$$b_k^i = \begin{cases} 1, & \text{ja } g > 1 \\ 0, & \text{ja } g = 1 \end{cases} \quad (2.5.25)$$

Solis 8. Novērtēšana. Novērtēt jauno populāciju pēc mērķa funkcijas:

$$MF^{j+1} = \{F(\Delta t^{1^{j+1}}), F(\Delta t^{2^{j+1}}), \dots, F(\Delta t^{p^{j+1}})\} \quad (2.5.26)$$

Solis 9. Sakārtošana. Sakārtot jauno populāciju pēc novērtējuma $\overline{SNK}^{j+1} = \{\overline{\Delta t}^{1^{j+1}}, \overline{\Delta t}^{2^{j+1}}, \dots, \overline{\Delta t}^{p^{j+1}}\}$ $F(\overline{\Delta t}^{j+1}) = \min(MF)$, $F(\overline{\Delta t}^{i-1^{j+1}}) \leq F(\overline{\Delta t}^{i^{j+1}})$, $i = \overline{2}, \overline{p}$ (2.5.27)

Solis 10. Jaunās paaudzes savienošana ar eliti

$$SNK = (SNK_{elite} + \overline{SNK}^{j+1}) \quad (2.5.28)$$

Solis 11. Izdzēšana. Izdzēš pēdējos indivīdus no savienotās populācijas, ja jaunā populācija ir lielāka par noteikto izmēru:

$$SNK = SNK \setminus \{\Delta t^{p+1}, \Delta t^{p+2}, \dots\} \quad (2.5.29)$$

2.6. Secinājumi par otro nodaļu

Promocijas darba otrajā nodaļā ir izstrādāti šādi algoritmi un procedūras:

1. elektroenerģijas patēriņa kritērija noteikšanas algoritms, kurš ļauj skaitliski noteikt pilsētas elektrotransporta paātrināšanai patērēto elektroenerģijas daudzumu
2. dažādu transporta veidu vienību vienlaicīgas atrašanās plūsmu krustošanās punktos varbūtības aprēķināšanas algoritms, kurš ļauj skaitliski noteikt dažādu transporta veidu vienību to maršrutu krustošanās punktos sadursmes varbūtības vērtību
3. dzelzceļa transporta pretējos virzienos braucošo vienību vienlaicīguma noteikšanas algoritms, kurš ļauj skaitliski noteikt dzelzceļa transporta vienību atrašanās plūsmu krustošanās punktos laika kritēriju
4. autotransporta līdzekļu summārā dīkstāves laika noteikšanas algoritms, kurš ļauj skaitliski noteikt visu ceļu transporta līdzekļu vienību dīkstāvi pie pārbrauktuvēm
5. definēta izmaiņu rezultātā jaunizveidoto kustības sarakstu nobīdes no jau esošā noteikšanas formula, kura ļauj skaitliski aprēķināt jaunizveidoto sarakstu nobīdi no esošā
6. kopējās mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanas algoritms, kurš ļauj skaitliski aprēķināt jaunizveidoto sarakstu mērķa funkcijas vērtību un salīdzināt to ar esošo sarakstu mērķa funkcijas vērtību
7. definēta procedūra kustības saraksta izmaiņu veikšanai izmantojot dubultās populācijas imūno algoritmu, kas nosaka šī algoritma izmantošanas galvenos soļus jaunu sarakstu veidošanai
8. definēta procedūra kustības saraksta izmaiņu veikšanai izmantojot ģenētisko algoritmu, kas nosaka šī algoritma izmantošanas galvenos soļus jaunu sarakstu veidošanai

3. IEBŪVĒTO IEKĀRTU PIELIETOŠANAS IESPĒJAS SARAKSTU UZDEVUMU RISINĀŠANAI UN TO INTEGRĒŠANA TRANSPORTA SISTĒMĀ

3.1. Situācijas raksturojums

Lai realizētu datu plūsmas vadību starp ITS elementiem nepieciešams šos elementus apgādāt ar iebūvētām iekārtām signāla saņemšanai un nogādāšanai līdz izpildierīcēm. Lai tas būtu iespējams promocijas darba trešajā nodaļā aprakstīts izstrādātās iebūvētās iekārtas prototips, parādītas prototipa un tā atsevišķo komponentu elektriskās shēmas, tiek noteiktas pieslēgumvietas intelektuālā transporta sistēmas infrastruktūras objektiem, pārbrauktuvēm, auto un sliežu transporta vienībām.

3.2. Izstrādātās iebūvētās iekārtas principiālā shēma

3.2.1. Iebūvētās iekārtas elektriskā shēma

Ņemot vērā iepriekšējo pozitīvo pieredzi sakarā ar programmējamo loģisko kontrolleru izmantošanu intelektuālās transporta sistēmas vadīšanai, daudzās šai tēmai veltītās publikācijas zinātnisko rakstu krājumos, RTU aizstāvētos promocijas darbus un saņemtos patentus par kontrolleru un satelītu navigācijas izmantošanu dzelzceļa transporta vadīšanai [59] promocijas darbā tiek piedāvāts transporta vienību vadīšanai izmantot izstrādāto iebūvētās iekārtas prototipu, kura sastāv no šādiem galvenajiem komponentiem:

- kontrollers
- GPS signāla uztvērējs
- GPS uztvērēja antena
- GSM/GPRS raidītājs
- GSM/GPRS antena
- displejs
- konvertors

Kā kontrollers izvēlēts ARDUINO ražotais kontrollers Arduino UNO R3 ar šādiem tehniskajiem parametriem:

- izmantojamais mikroprocesors - ATmega328
- vadības spriegums - 5V

- vadības spriegums max -20V
- digitālās ieeju/izeju skaits - 14
- analogo ieeju skaits - 6
- līdzstrāvas stiprums ieeju/izeju kontaktos - 40 mA
- atmiņas apjoms - 32 KB
- SRAM2 KB (ATmega328)
- EEPROM1 KB (ATmega328)
- takts skaitītāja frekvence - 16 MHz

Kā GPS signāla uztvērējs izvēlēts ražotāja VINCOTECH A1080-B globālās pozicionēšanas modulis ar atbilstošu antenu ar šādiem tehniskajiem parametriem:

- kanālu skaits – 20
- darbības frekvence – 1575 MHz
- jūtība - -159dBm
- precizitāte - <10m
- TTFF – 0,1s
- izmantojamais protokols - NMEA un SIRF III
- vadības spriegums - 3,3V/23mA
- darba temperatūra - no – 30°C līdz +80°C

Kā GPS uztvērēja antena izvēlēta ar šādiem tehniskajiem parametriem:

- darbības frekvence - GPS 1575.42 MHz
- pretestība - 50 Omi
- polarizācija – RHCP
- pastiprinājums - 24-26dBi
- kropļojumi - <1,5 dB
- barošanas spriegums – 3...5V
- savienojums - UFL
- darba temperatūra – no -40°C līdz +85°C

Kā GSM/GPRS raidītājs izvēlēts Sagem Hilo GSM/GPRS modulis un atbilstoša GSM raidītāja antena ar šādiem tehniskajiem parametriem

- GSM frekvence – standarta GSM 900/1800 MHz
- balss kodēšana - HR, EFR, FR, AMR

- saskarne - 07.10 MUX interface
- darba spriegums – 3,5V/200 mA

Kā displejs izvēlēts ražotāja Seed Studio Serial LCD1602 displejs ar šādiem tehniskajiem parametriem:

- matrica - Hitachi HD44780
- mikroprocesors - AT89S52
- protokols – UART
- barošanas spriegums – 5V DC (VCC un GND)
- izšķirtspēja -16x2
- informācijas attēlošana – simboli
- vadība - ar pieslēgumvietām RX un TX

Izgatavotais iebūvētās iekārtas prototips attēlots Att. 3.1.



Att. 3.1. Iebūvētās iekārtas prototips

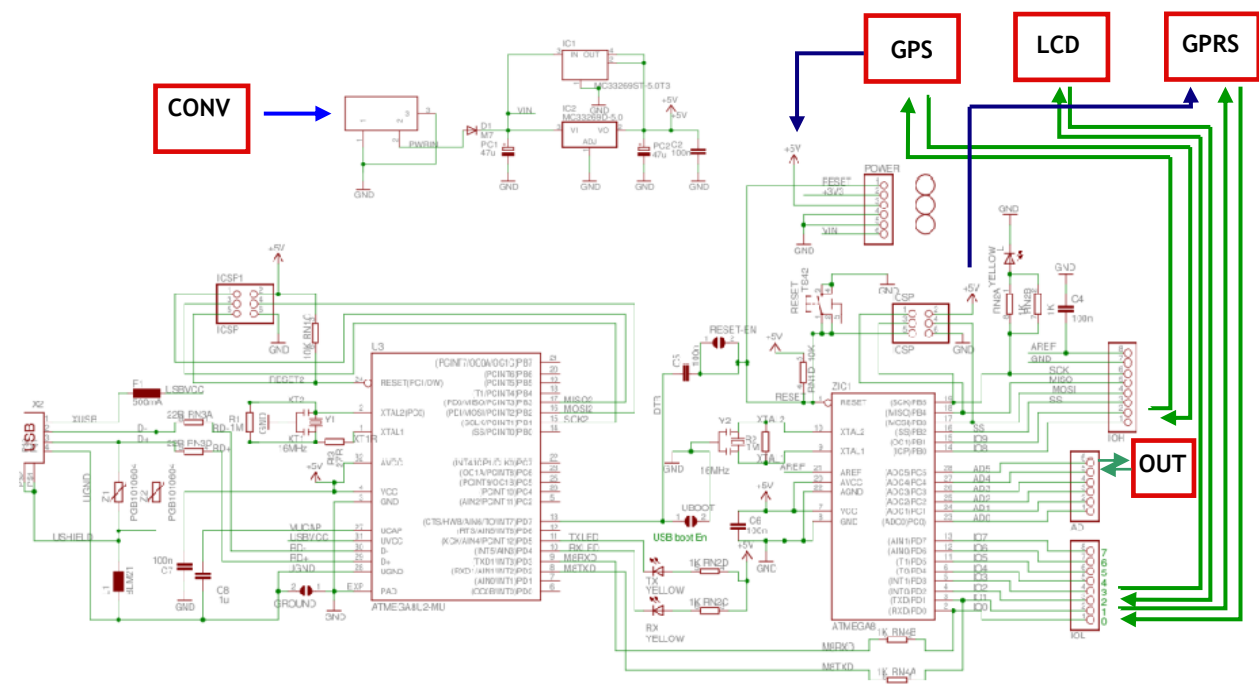
Att. 3.2 parādīts iebūvētās iekārtas komponentu izvietojums korpusā.



Att. 3.2. Iebūvētās iekārtas komponentu izvietojums

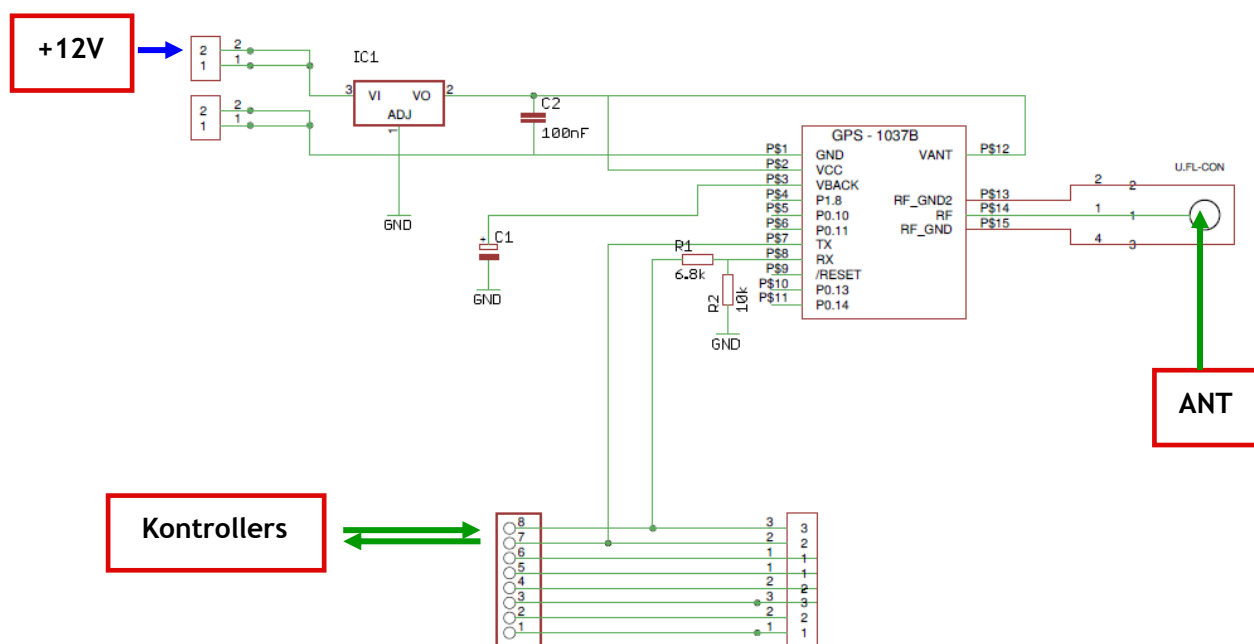
Visu iebūvētās iekārtas komponentu montāžas elektriskā shēma parādīta attēlā Att.

3.3



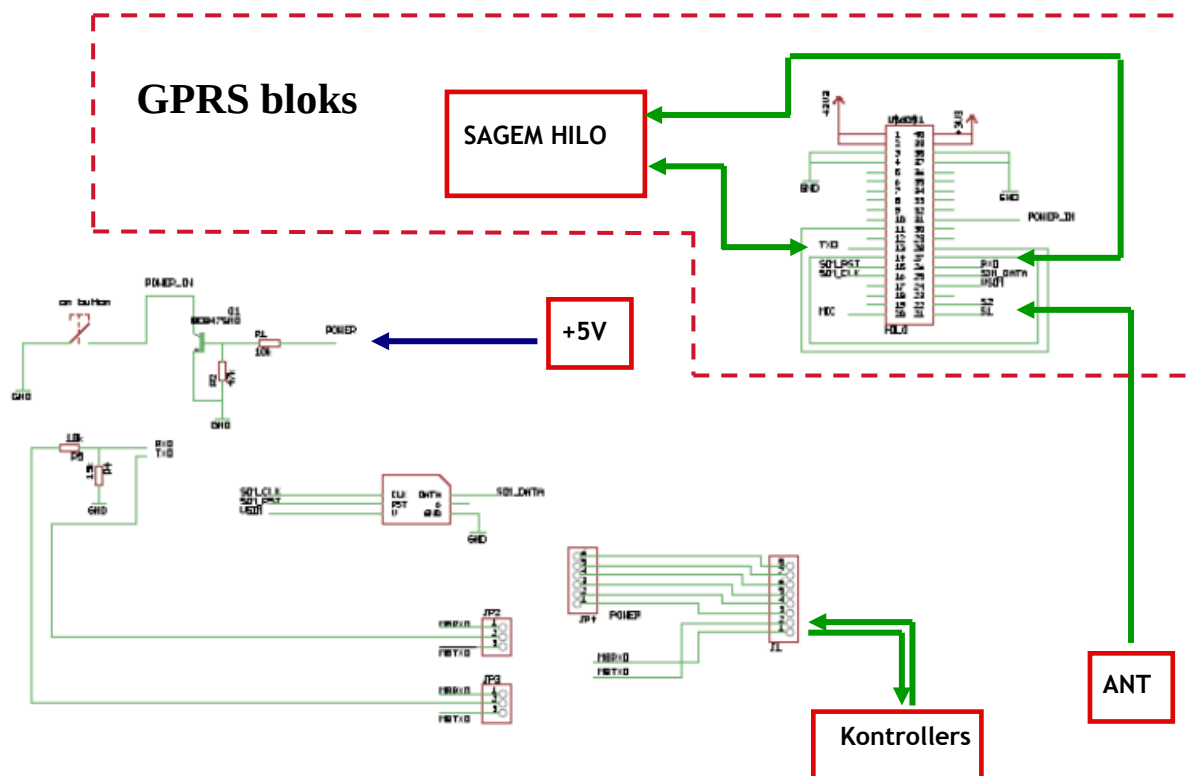
Att. 3.3. Iebūvētās iekārtas komponentu montāžas shēma

GPS bloka VINCODECH A1080-B elektriskā shēma un pieslēgvieta savienojumam ar kontrolleri parādīta Att. 3.4



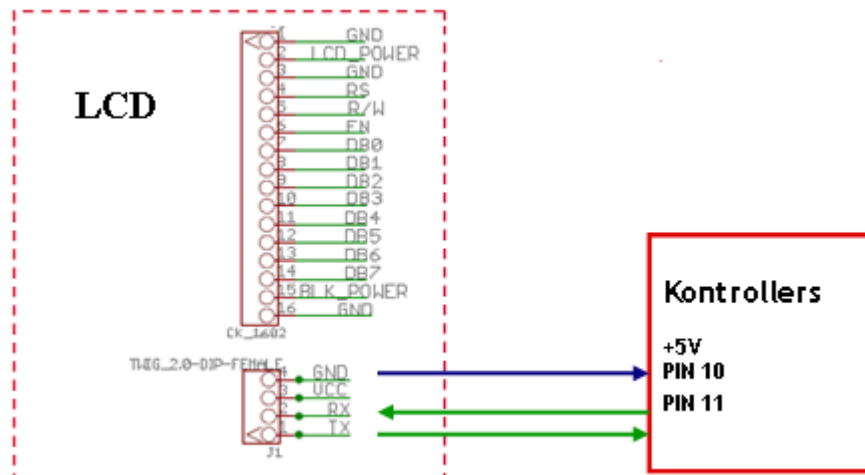
Att. 3.4. VINCOTECH A1080-B elektriskā shēma

Sagem Hilo GSM un GPRS moduļu elektriskā shēma un pieslēgvietas savienojumam ar kontrolleri parādīta Att. 3.5



Att. 3.5. Sagem Hilo GSM un GPRS bloku elektriskā shēma

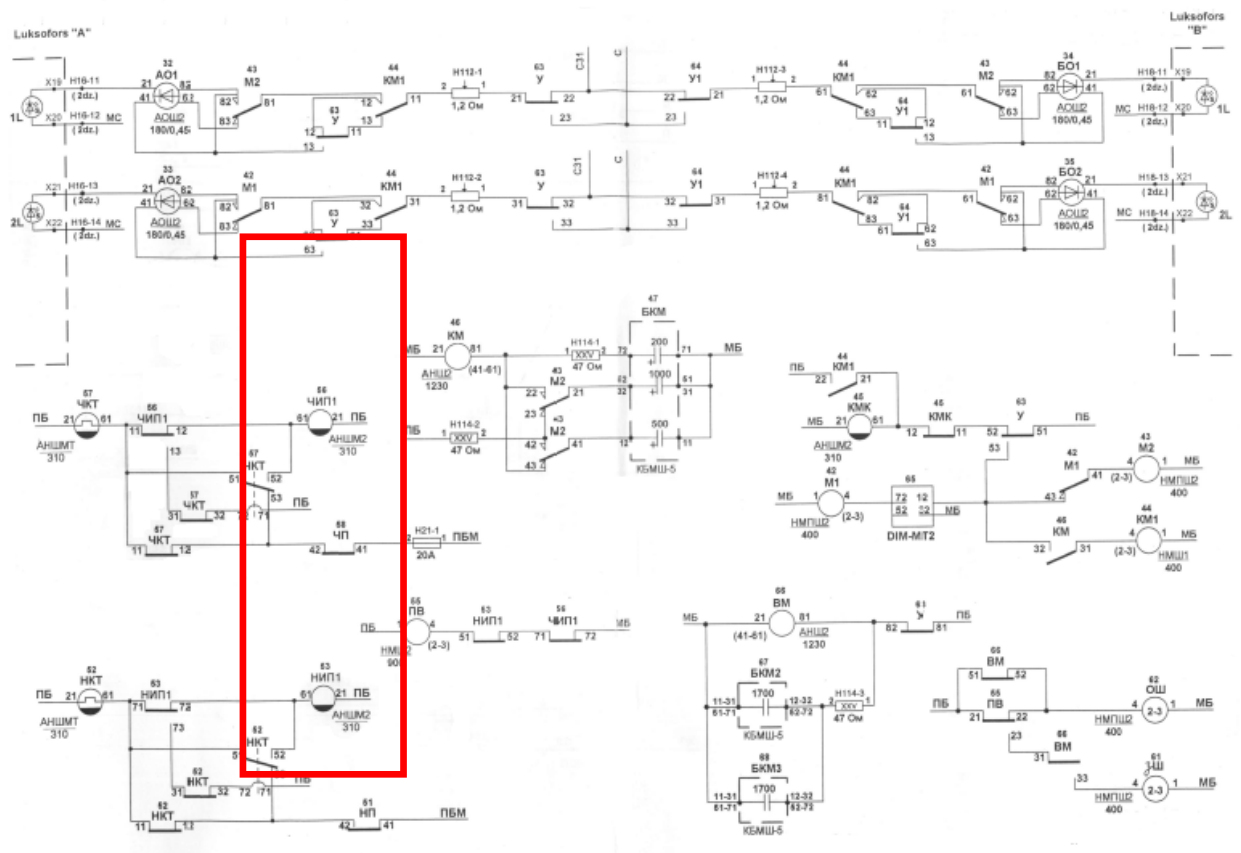
Displeja Seeed Studio Serial LCD1602 elektriskā shēma un pieslēgvietas savienojumam ar kontrolleri parādītas Att. 3.6



Att. 3.6. Displeja Seed Studio elektriskā shēma

3.2.2. Pārbrauktuves vadīšana ar iebūvēto iekārtu

Pārbrauktuves aizvēršanu nodrošina sadales skapja ŠRU-M shēmā esošie pāra un nepāra virzienos atrodošos pārbrauktuves barjeru aizvēršanas slēdži ČИП1 un NИП1 kuri parādīti Att. 3.7



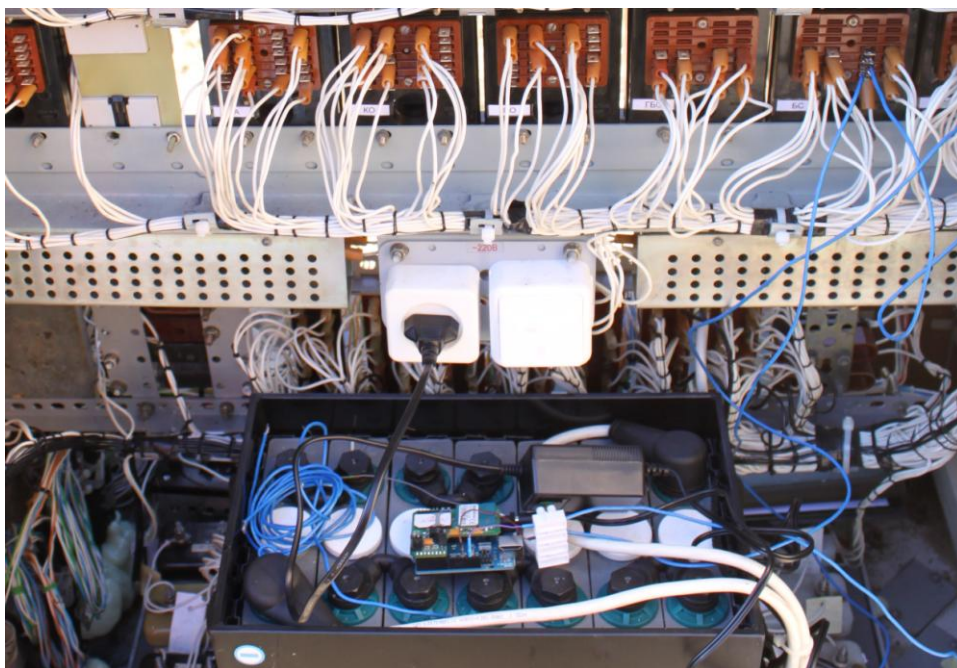
Att. 3.7. Pārbrauktuves vadības iekārtas shēma

The image contains two electrical wiring diagrams for a relay-based alarm system. Both diagrams show a transformer (AHUMT 310) connected to a power source (+12 V) and a bell (lekkārta). The relay (RELEJS) is connected to the power source and the bell. The diagrams illustrate the wiring for the relay and the bell, including the transformer and the power source.

Top Diagram: The transformer (AHUMT 310) has terminals 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100. The relay (RELEJS) is connected to the power source (+12 V) and the bell (lekkārta). The transformer (AHUMT 310) is connected to the power source (+12 V) and the bell (lekkārta).

Bottom Diagram: The transformer (AHUMT 310) has terminals 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100. The relay (RELEJS) is connected to the power source (+12 V) and the bell (lekkārta). The transformer (AHUMT 310) is connected to the power source (+12 V) and the bell (lekkārta).

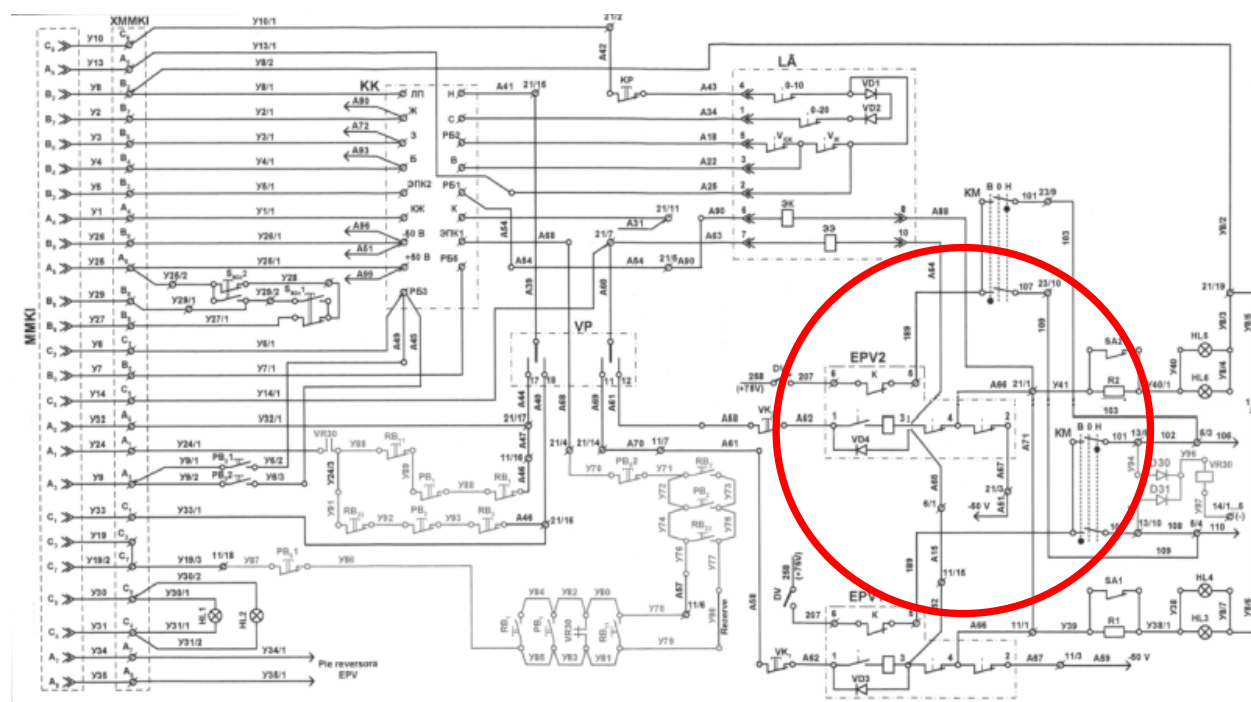
Iebūvētās iekārtas pieslēgšana pie pārbrauktuves vadības slēdžiem sadales skapī
ŠRU - M parādīta Att. 3.9



83

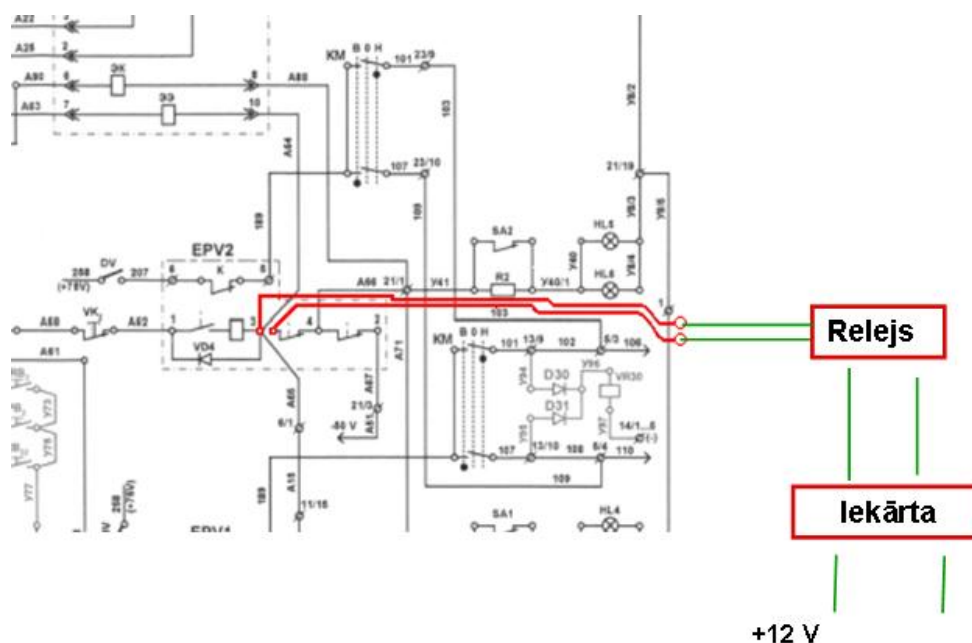
3.2.3. Lokomotīves avārijas bremzēšanas iekārtas vadīšana ar iebūvēto iekārtu

Att. 3.10 ir parādīts tas lokomotīves E62 elektriskās shēmas ķēdes posms, ar kura palīdzību tiek aktivizēta avārijas bremzēšana.



Att. 3.10. Lokomotīves E62 elektriskās shēmas ķēdes posms

Pārtraucot šo ķēdi un pievienojot iebūvēto iekārtu kā parādīts Att. 3.11 ir iespējams sadursmes iespējamībai sasniedzot kritisko robežu un saņemot par šīs robežas sasniegšanu atbilstošu signālu no vadības centra, aktivizēt vilciena avārijas bremzēšanu bez vilciena mašīnista iejaukšanās. Šī iebūvētās iekārtas funkcija tika eksperimentāli izmēģināta poligona apstākļos dzelzceļa posmā Lāčupe-Bolderāja, tika sasniegts teicams rezultāts par ko liecina izmēģinājuma protokols un arī iegūtais patents [59].

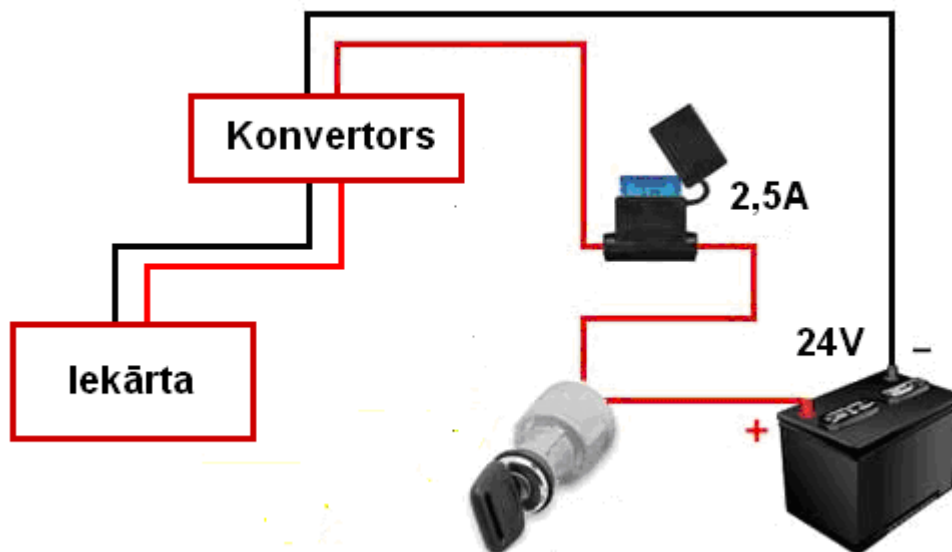


Att. 3.11. Vilciena avārijas bremzēšanas aktivizēšanas elektriskā shēma

3.2.4. Iekārtas uzstādīšana autobusu vadībai

Tā kā ceļu transporta līdzekļiem automātiska iedarbošanās uz vadības iekārtām nav iespējama pat tādā gadījumā, ja sadursmes varbūtība ir ļoti augsta, iebūvētā iekārta vadītājam displejā paziņos rekomendējoša rakstura informāciju par nepieciešamību samazināt ātrumu vai apstāties un pagaidīt, līdz drošības kritēriji ļaus turpināt kustību ar iepriekšējo ātrumu. Lēmumu, kā realizēt kontroles centra pārraidītās drošības rekomendācijas ielu transporta līdzekļiem, pieņems pats transporta līdzekļa vadītājs, vadoties no savas pieredzes un atkarībā no konkrētās situācijas apstākļiem.

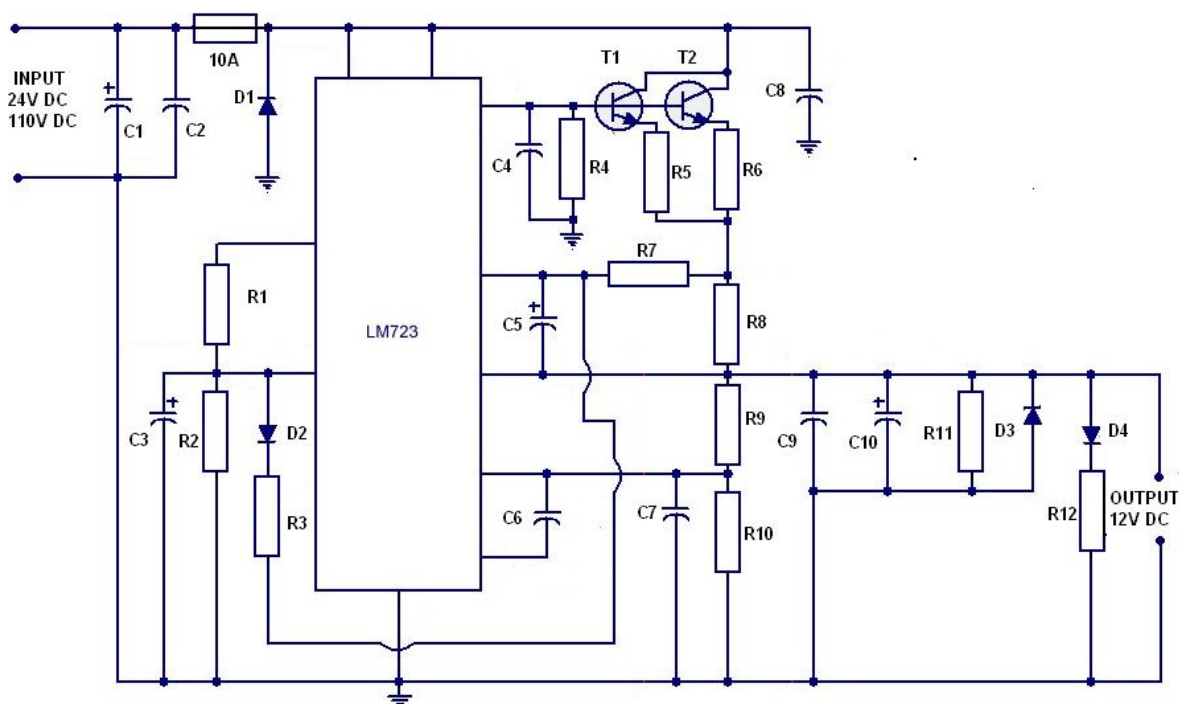
Tā kā nav nepieciešamības iedarboties uz transporta līdzekļa vadības iekārtām, tad iekārtai ceļu transporta līdzekļos ir nepieciešams tikai pieslēgumvieta pie borta elektriskā tīkla iekārtas barošanas nodrošināšanai ar 12V spriegumu. Autobusus borta spriegums ir 24V un tāpēc iekārta ir jāpieslēdz izmantojot konvertoru tā, kā parādīts Att. 3.12. Lai izvairītos no iespējamās dažādu parazītstrāvu ietekmes uz ierīces darbaspējām ieteicams abus polus ierīcei pievienot ar atsevišķu vadu.



Att. 3.12. Iekārtas pievienošana autobusa borta tīklam

3.2.5. Konvertora elektriskā shēma

Tā kā controllerim barošanas spriegums vidēji ir 12V iekārtas uzstādīšanai autobusos ar 24V borta spriegumu un dzelzceļa transportā ar 110V spriegumu ir nepieciešami sprieguma konvertori. Sprieguma konvertora elektriskā shēma izmantojot ražotāja Texas Instruments ražoto sprieguma regulatoru LM723 ir parādīta Att. 3.13



Att. 3.13. Sprieguma konvertora elektriskā shēma

3.3. Secinājumi par trešo nodaļu

Promocijas darba trešajā nodaļā ir izstrādāts universāls iebūvējamās iekārtas prototips, kurš var tikt uzstādīts gan auto, gan sliežu transporta vienību, gan dzelzceļa pārbrauktuvi vadīšanai.

Galvenie ieguvumi iebūvēto iekārtu izmantošanai:

1. dzelzceļa pārbrauktuvi uzstādītās iebūvētās iekārtas dod iespēju pārbrauktuves aizvērt un atvērt tajos laika momentos, kad vilciena pirmais un pēdējais vagonšķērso kritisko robežu, tādējādi samazinot barjeru atrašanos slēgtā stāvoklī un samazināt autotransporta vienību dīkstāves laiku pie slēgtām pārbrauktuviem.
2. uzstādot šādas iebūvētās iekārtas transporta līdzekļos to vadītājiem ir iespējams saņemt uz iekārtu displejiem rekomendācijas droša kustības ātruma izvēlei un, sadursmes varbūtībai sasniedzot kritisko vērtību, dzelzceļa transportā iebūvētās iekārtas spēj iedarbināt lokomotīvu avārijas bremzēšanas sistēmu bez mašīnista darbības.
3. tādējādi izmantojot iebūvētās iekārtas ir iespējams ar sarakstu teorijas algoritmiem atrisināt daudzkritēriju kustības organizācijas uzdevumu saskaņā ar izstrādāto mērķa funkciju.

4. SABIEDRISKĀ TRANSPORTA DATORMODELĒŠANAS EKSPERIMENTU REZULTĀTI

4.1. Situācijas raksturojums

Promocijas darba ceturtajā nodaļā tiek pētītas izstrādāto algoritmu pielietošanas iespējas pilsētas transporta vadībai.

Nodaļā definēti divi uzdevumi un izveidoti divi datormodeļi darbā izstrādātas mērķa funkcijas un algoritmu pārbaudei.

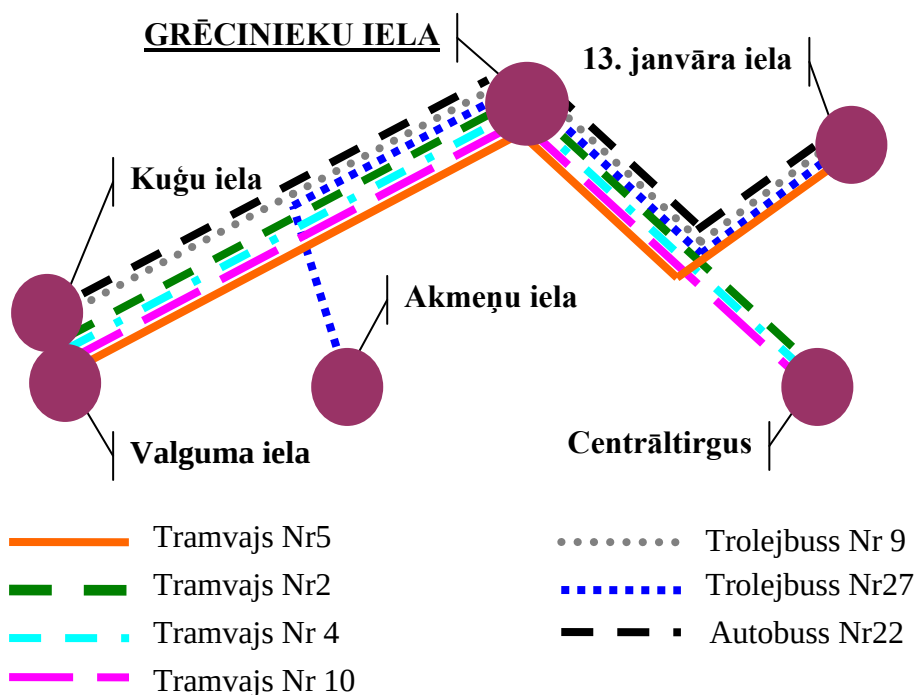
Pirmais uzdevums un datormodelis paredzēts pilsētas elektrotransporta kustības vadības algoritmu darbības pārbaudei ar mērķi izveidot tādu sarakstu, kas minimizētu elektroenerģijas patēriņu un dažādu elektrotransporta vienību sarakstu pārklāšanos pieturā.

Otrais uzdevums un datormodelis veltīts mērķa funkcijas pielietošanai tāda saraksta izveidošanai, kas uzlabotu dzelzceļa un ceļu transporta vienību kustību un paaugstinātu drošību dzelzceļa pārbraukuvju šķērsošanai.

Modeļi ir vienkāršotas reāli eksistējošas Rīgas pilsētas transporta sistēmas ar noteiktu pieturu, maršrutu, pārbraukuvju, sliežu un autotransporta vienību skaitu un kustības sarakstiem. Transporta sistēmas fragmentu vadība tiek modelēta saskaņā ar izstrādātajiem algoritmiem veicot vairākas eksperimentu sērijas. Datoreksperimentu rezultāti tiks novērtēti ar statistisko metožu palīdzību promocijas darba nākamajā nodaļā.

4.2. Datormodelis pilsētas elektrotransporta kustības vadības algoritmu darbības pārbaudei

Datoreksperimentam pilsētas transporta vadīšanai kā paraugs ir izvēlēts reāli eksistējošs Rīgas pilsētas sabiedriskā transporta sistēmas fragments. Tiek apskatīta sistēma ar trim pieturām un septiņiem dažādiem maršrutiem. Visiem šiem maršrutiem ir kopīga pietura „Grēcinieku iela”, turklāt šinī pieturā apstājas dažāda tipa sabiedriskais transports. Datormodeļa shēma parādīta Att. 4.1.



Att. 4.1. Sabiedriskā transporta sistēmas fragments

Šāds maršrutu izvietojums Rīgas pilsētā ievērojami apgrūtina transporta vienību kustības plānošanu. Tas uzskatāmi parādīts sabiedriskā transporta līdzekļu kustības sarakstā pieturai „Grēcinieku iela” saskaņā ar kuru vairākiem transporta līdzekļiem ir jāpienāk pieturā vienlaicīgi, kā redzams Tab. 1.

Tab. 1. Pilsētas transporta kustības saraksts

	plkst17:00			plkst 18:00				plkst 19:00			
0				0				0	Tram 5		
1	Tram 5			1				1			
2				2				2	Trol 27		
3				3	Tram 4			3	Tram 4		
4	Tram 4	Aut 22		4	Trol 27	Aut 22		4	Tram 2	Trol 9	
5				5				5			
6	Trol 27			6	Tram 5	Trol 9		6			
7				7	Tram 4			7			
8	Trol 9			8				8			
9	Tram 4			9				9	Tram 4		
10	Tram 10			10	Tram 10			10	Tram 10		
11	Trol 9			11				11			
12				12	Tram 4			12	Tram 5		
13				13				13	Trol 27		
14	Tram 2	Aut 22	Tram 4	14				14	Aut 22		
15	Tram 5			15	Trol 27	Tram 2		15			
16				16				16	Tram 4		
17	Trol 27			17				17			
18				18	Tram 4			18			
19	Tram 4			19	Aut 22			19			
20				20	Tram 5			20			

Datoreksperimentam tiek definēti sekojoši maršruti JL:

JL(Tram2) = <Centraltirgus, Grecinieku, Valguma>

JL(Tram4) = <Centraltirgus, Grecinieku, Valguma>

JL(Tram5) = <13.janvara, Grecinieku, Valguma>

JL(Tram10) = <Centraltirgus, Grecinieku, Valguma>

JL(Trol9) = <13.janvara, Grecinieku, Kugu>

JL(Trol27) = <13.janvara, Grecinieku, Akmenu>

JL(Aut22)=<13.janvara,Grecinieku, Kugu>

Katras operācijas laiks tiek pieņemts $d = 1 \text{ min}$

Katram maršrutam tiek definēts konstants braukšanas laiks starp pieturām:

TL(Tram2) = <4, 3>

TL(Tram4) = <4, 3>

TL(Tram5) = <3, 3>

TL(Tram10) = <4, 3>

TL(Trol9) = <3, 3>

TL(Trol27) = <3, 4>

TL(Aut22) = <3, 4>

Katram maršrutam ir definēts transporta līdzekļu skaits un laika intervāls starp transporta līdzekļu ierašanās pieturā momentiem:

Tram2 – 15 minūtes – 11 vienības

Tram4 – 5 minūtes – 35 vienības

Tram5 – 12 minūtes – 14 vienības

Tram10 - 12 minūtes – 14 vienības

Trol9 – 13 minūtes – 13 vienības

Trol27 – 9 minūtes – 19 vienības

Aut22 – 11 minūtes – 16 vienības

Izmantojot evolucionāros algoritmus datoreksperimentā tiek aprēķināts labākais saraksts laika periodam 180min no 17:00 līdz 20:00. Šis laika periods izvēlēts kā visnoslogotākais visas diennakts laikā.

4.3. Datormodelis pārbrauktuves šķērsošanas algoritmu darbības pārbaudei

Datoreksperimenta veikšanai tiek izvēlēts un analizēts Rīgas pilsētas transporta sistēmas fragments ar trijām dzelzceļa pārbrauktuvēm. Šo pārbrauktuļu koordinātes dotas tabulā Tab. 2

Tab. 2. Pārbrauktuļu koordinātes

Pārbrauktuve	Lat	Lon
Zolitūdes iela	56.950428	23.997957
Tilta iela	56.995931	24.130798
Matīsa iela	56.947221	24.154447
Liepājas iela	56.928925	24.063393

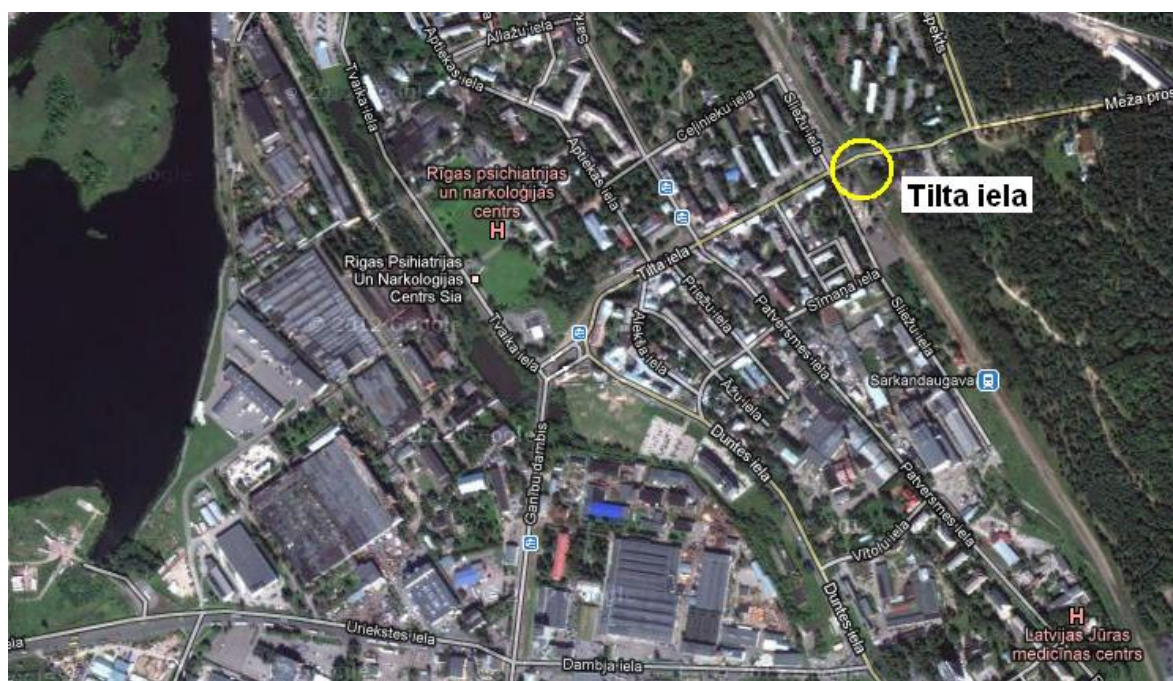
Šo pārbrauktuļu atrašanās vieta Latvijas kartē parādīta Rīgas pilsētas satelīta attēlos Att. 4.2, Att. 4.3, Att. 4.4 un Att. 4.5



Att. 4.2. Liepājas ielas dzelzceļa pārbrauktuve



Att. 4.3. Zolitūdes ielas dzelzceļa pārbrauktuve



Att. 4.4. Tīla ielas dzelzceļa pārbrauktuve



Att. 4.5. Matīsa ielas dzelzceļa pārbrauktuve

Analizējot uzņēmuma „Rīgas satiksme” organizēto sabiedriskā transporta satiksmi Rīgas pilsētā ir konstatēti un Tab. 3. apkopoti šādi autobusu un mikroautobusu maršruti, kuri šķērso šīs pārbrauktuves

Tab. 3. Pārbrauktuves šķērsojošie transporta maršruti

Pārbrauktuve	Autobuss	Mikroautobuss
Zolitūdes iela	4z;46	247;242;263
Tilta iela	2;11;24	200;224
Matīsa iela	-	263
Liepājas iela	44;8;7	220

Attālumi no ceļu transporta līdzekļu maršrutu galapunktiem līdz attiecīgajām pārbrauktuvēm doti tabulā Tab. 4

Tab. 4. Attālumi no maršrutu galapunktiem līdz pārbrauktuvēm

Pārbrauktuve Zolitūdes ielā	Maršruts	Attālums km
No Abrenes ielas	4z	10,5
No Zolitūdes	4z	3,3
No Ziepniekkalna	46	15,4
No Zolitūdes	46	1,8
No Bolderājas	247	16,8
No Ziepniekkalna	247	14,2
No Centra	242	11,3
No Imantas	242	2,1
No Mežciema	263	20,2
No Šampētera	263	3,9
Pārbrauktuve Matīsa ielā		
No Mežciema	263	8,0
No Šampētera	263	15,6
Pārbrauktuve Liepājas ielā		
No Ziepniekkalna	44	7,5
No Zolitūdes	44	5,7
No Zolitūdes	8	5,7
No Stacijas laukuma	8	4,6
No Abrenes ielas	7	5,5
No Stīpniekiem	7	3,9
No Pļavniekiem	220	15,3
No Upesgrīvas ielas	220	1,9
Pārbrauktuve Tilta ielā		
No Abrenes ielas	2	7,3
No Vecmīlgrāvja	2	9,5
No Abrenes ielas	11	7,3
No Sužiem	11	15,1
No Abrenes ielas	24	7,3
No Mangaļsalas	24	17,5
No Centra	200	6,5
No Vecdaugavas	200	11,3
No Centra	224	7,3
No Mangaļsalas	224	17,5

Attālumi no dzelzeļa pieturām līdz attiecīgajām pārbrauktuvēm apkopoti tabulā Tab. 5

Tab. 5. Attālumi no dzelzceļa pieturas līdz pārbrauktuvei

Pārbrauktuve	Pietura	Attālums km
Zolitūdes iela	Zasulauks	3,5
	Babīte	2,7
	Priedaine	7,2
Tilta iela	Mangaļi	2,7
	Sarkandaugava	0,35
Matīsa iela	Rīga	2,7
	Zemitāni	2,4
Liepājas iela	Torņakalns	1,9
	Zasulauks	1,5

Algoritmu darbības pārbaudei ir izstrādāts sekojošs pilsētas transporta sistēmas modelis. Tiek definētas:

Pārbrauktuviņu kopas – $\{p_1^2, p_2^2, p_3^2\}$

Autobusu kopas – $\{u_1^3, u_2^3, ..., u_6^3\}$

Vilcienu kopas – $\{u_1^1, u_2^1, ..., u_4^1\}$

Autobusu pieturu kopas – $\{p_1^5, p_2^5, ..., p_6^5\}$

Vilcienu pieturu kopas – $\{p_1^3, p_2^3\}$

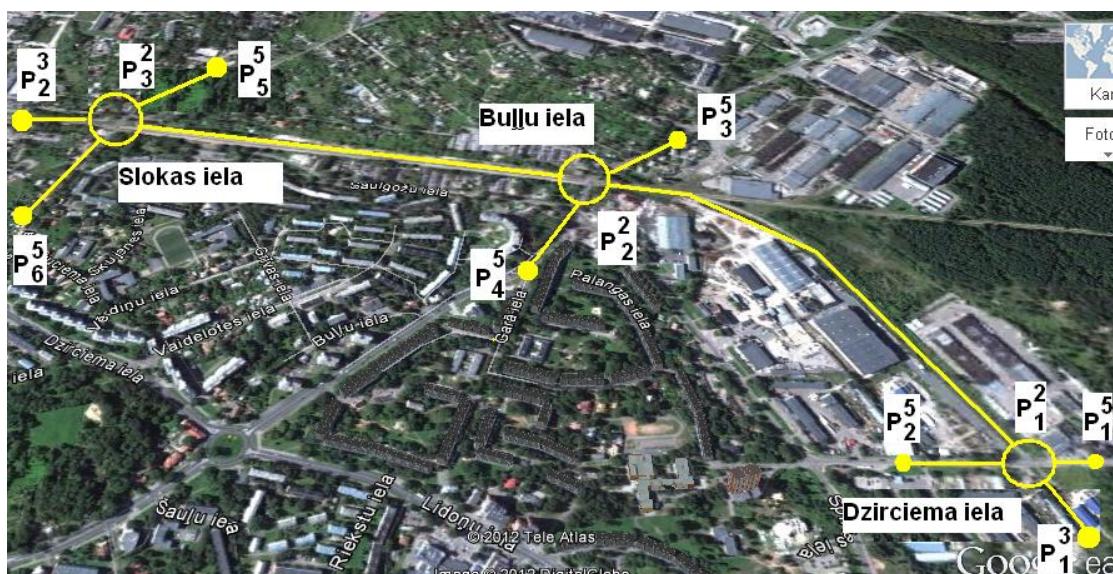
Autobusu kustības sarakstu kopas – $\{\sigma_1^{u3}, \sigma_2^{u3}, ..., \sigma_6^{u3}\}$

Vilcienu kustības sarakstu kopas – $\{\sigma_1^{u1}, \sigma_2^{u1}, ..., \sigma_4^{u1}\}$

Autobusu kustības maršrutu kopas – $\{R_1^{u3}, R_2^{u3}, ..., R_6^{u3}\}$

Vilcienu maršrutu kopas – $\{R_1^{u1}, R_2^{u1}\}$

Datormodeļa shematiskais attēlojums ir Att. 4.6



Att. 4.6. Datormodeļa shematiskais attēlojums

Attālumi starp datormodeļa punktiem apkopoti tabulā Tab. 6

Tab. 6. Attālumi starp datormodeļa raksturīgajiem punktiem

Punkts	X (m)	Y (m)
p_1^3	0	0
p_2^3	4500	4000
p_1^2	1000	1000
p_2^2	2000	2000
p_3^2	4000	3000
p_1^5	1500	0
p_2^5	0	1500
p_3^5	2500	1000
p_4^5	1500	2500
p_5^5	3500	2000
p_6^5	2500	3500

Transporta līdzekļu kustības maršruti apkopoti Tab. 7

Tab. 7. Kustības maršruti

Maršruta nosaukums	Maršruta punkti
R_1^{u1}	$\langle p_1^3, p_1^2, p_2^2, p_3^2, p_2^3 \rangle$
R_2^{u1}	$\langle p_2^3, p_3^2, p_2^2, p_1^2, p_1^3 \rangle$
R_1^{u3}	$\langle p_1^5, p_1^2, p_2^5 \rangle$
R_2^{u3}	$\langle p_2^5, p_1^2, p_1^5 \rangle$
R_3^{u3}	$\langle p_3^5, p_2^2, p_4^5 \rangle$
R_4^{u3}	$\langle p_4^5, p_2^2, p_3^5 \rangle$
R_5^{u3}	$\langle p_5^5, p_3^2, p_6^5 \rangle$
R_6^{u3}	$\langle p_6^5, p_3^2, p_5^5 \rangle$

Transporta līdzekļu kustības sarakstu nobīdes pēc simulācijas uzsākšanas un kustības ātrumi apkopoti tabulā Tab. 8

Tab. 8. Transporta līdzekļu mainīgie parametri

Transports	Kustības saraksts s	Ātrums km/h
u_1^1	60	80+/-5
u_2^1	60	80+/-5
u_1^2	0	40+/-10
u_2^2	0	40+/-10
u_3^2	0	40+/-10
u_4^2	0	40+/-10
u_5^2	0	40+/-10
u_6^2	0	40+/-10

Att. 4.7. Datormodeļa programmas fragments ir parādīts Att. 4.6.

```

2 $point[0] = new point("alpha", 0,0);
3 $point[1] = new level_crossing("LC1", 1000,1000, 37, 80);
4 $point[2] = new level_crossing("LC2", 2000,2000, 40, 100);
5 $point[3] = new level_crossing("LC3", 4000,3000, 37, 80);
6 $point[4] = new point("beta", 4500,4000);
7 $point[5] = new point("A", 1500,0);
8 $point[6] = new point("B", 0,1500);
9 $point[7] = new point("C", 2500,1000);
10 $point[8] = new point("D", 1500,2500);
11 $point[9] = new point("E", 3500,2000);
12 $point[10] = new point("F", 2500,3500);
13
14 $route1 = Array($point[0], $point[1], $point[2], $point[3], $point[4]);
15 $route2 = Array($point[4], $point[3], $point[2], $point[1], $point[0]);
16 $route3 = Array($point[5], $point[1], $point[6]);
17 $route4 = Array($point[6], $point[1], $point[5]);
18 $route5 = Array($point[7], $point[2], $point[8]);
19 $route6 = Array($point[8], $point[2], $point[7]);
20 $route7 = Array($point[9], $point[3], $point[10]);
21 $route8 = Array($point[10], $point[3], $point[9]);
22
23 $busschedule = Array(0,0,0,0,0,0,200,300,300,200,200,300);
24 $trainschedule = Array(60,60,300,300,400,350);
25
26 $bus[0] = new bus("bus1", 40, $route3, $busschedule[0]);
27 $bus[1] = new bus("bus2", 40, $route4, $busschedule[1]);
28 $bus[2] = new bus("bus3", 40, $route5, $busschedule[2]);
29 $bus[3] = new bus("bus4", 40, $route6, $busschedule[3]);
30 $bus[4] = new bus("bus5", 40, $route7, $busschedule[4]);

```

Att. 4.7. Datormodeļa programmas fragments

4.4. Imūnā algoritma pielietojums mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanai

Ar izstrādāto datormodeli tiek veiktas vairākas eksperimentu sērijas. Katrā sērijā tiek veikti 30 eksperimenti ar dažādiem imūno algoritmu raksturojošajiem parametriem. Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt, kā šo parametru maiņa iespaido iegūto rezultātu.

Pirmajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; populācijas izmērs no 10 līdz 50, atmiņas izmērs no 5 līdz 10, klonu skaits no 20 līdz 60, attēlošanas precizitāte 4 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla +/- 5 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem +/- 10 km/h un vilcieniem +/- 5 km/h.

Tab. 9. apkopoti imūnā algoritma pielietošanas eksperimenta pirmās sērijas izvēlēto parametru fragments.

Tab. 9. Izvēlētie imūnā algoritma parametri 1.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Msize	Nclons	Precision	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	5	20	4	-5	5	10	5
2	20	5	20	4	-5	5	10	5
3	30	5	20	4	-5	5	10	5
4	40	5	20	4	-5	5	10	5
5	50	5	20	4	-5	5	10	5
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Pilns parametru apkopojums dots pielikumā Tab. 26

Otrajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; populācijas izmērs no 10 līdz 50, atmiņas izmērs no 5 līdz 10, klonu skaits no 20 līdz 60, attēlošanas precizitāte 5 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla +/-5 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem +/- 10 km/h un vilcieniem +/-5 km/h. Pielikumā Tab. 27. apkopoti imūnā algoritma pielietošanas eksperimenta otrās sērijas parametri.

Trešajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; populācijas izmērs no 10 līdz 50, atmiņas izmērs no 5 līdz 10, klonu skaits no 20 līdz 60, attēlošanas precizitāte 4 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla +/-10 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem +/- 10 km/h un vilcieniem +/-5 km/h. Pielikumā Tab. 28 apkopoti imūnā algoritma pielietošanas eksperimenta trešās sērijas parametri.

Ceturtajā eksperimentu sērijā tiek noteikti šādi parametri; populācijas izmērs no 10 līdz 50, atmiņas izmērs no 5 līdz 10, klonu skaits no 20 līdz 60, attēlošanas precizitāte 5 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla +/-10 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem +/- 10 km/h un vilcieniem +/-5 km/h. Pielikumā Tab. 29. apkopoti imūnā algoritma pielietošanas eksperimenta ceturtais sērijas parametri.

Piektajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; populācijas izmērs no 10 līdz 50, atmiņas izmērs no 5 līdz 10, klonu skaits no 20 līdz 60, attēlošanas precizitāte 4 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla +/-5 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem +/- 15 km/h un vilcieniem +/-10 km/h. Pielikumā Tab. 30. apkopoti imūnā algoritma pielietošanas eksperimenta piektās sērijas parametri.

Sestajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; populācijas izmērs no 10 līdz 50, atmiņas izmērs no 5 līdz 10, klonu skaits no 20 līdz 60, attēlošanas precizitāte 5 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla +/-5 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem +/- 15 km/h un vilcieniem +/-10 km/h. Pielikumā Tab. 31. apkopoti imūnā algoritma pielietošanas eksperimenta sestās sērijas parametri.

Septītajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; populācijas izmērs no 10 līdz 50, atmiņas izmērs no 5 līdz 10, klonu skaits no 20 līdz 60, attēlošanas precizitāte 4 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla +/-10 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem +/- 15 km/h un vilcieniem +/-10 km/h. Pielikumā Tab. 32. apkopoti imūnā algoritma pielietošanas eksperimenta septītās sērijas parametri.

Astotajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; populācijas izmērs no 10 līdz 50, atmiņas izmērs no 5 līdz 10, klonu skaits no 20 līdz 60, attēlošanas precizitāte 5 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla +/-10 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem +/- 15 km/h un vilcieniem +/-10 km/h. Pielikumā Tab. 33. apkopoti imūnā algoritma pielietošanas eksperimenta astotās sērijas rezultāti.

4.5. Ģenētiskā algoritma pielietojums mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanai

Ar izstrādāto datormodeli tiek veiktas vairākas eksperimentu sērijas izmantojot ģenētisko algoritmu. Katrā sērijā tiek veikti 30 eksperimenti ar dažādiem algoritmu raksturojošajiem parametriem. Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt, kā parametru maiņa iespaido iegūto rezultātu.

Pirmajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; krustošanas koeficients no 0,8 līdz 0,6, mutācijas koeficients no 0,01 līdz 0,04, attēlošanas precizitāte 4 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla +/-5 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem +/- 10 km/h un vilcieniem +/-5 km/h. Tab. 10. apkopoti ģenētiskā algoritma pielietošanas eksperimenta pirmās sērijas izvēlēto parametru fragments.

Tab. 10. Izvēlētie ģenētiskā algoritma parametri 1.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Non-elite	Mutation	Bits	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	0,8	0,01	4	-5	5	10	5
2	20	0,8	0,01	4	-5	5	10	5
3	30	0,8	0,01	4	-5	5	10	5
4	40	0,8	0,01	4	-5	5	10	5
5	50	0,8	0,01	4	-5	5	10	5
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Pilns parametru apkopojums dots pielikumā Tab. 34

Otrajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; krustošanas koeficients no 0,8 līdz 0,6, mutācijas koeficients no 0,01 līdz 0,04, attēlošanas precizitāte 5 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla +/-5 min, pieļaujamā ātruma

novirze autobusiem ± 10 km/h un vilcieniem ± 5 km/h. Pielikumā Tab. 35. apkopoti ģenētiskā algoritma pielietošanas eksperimenta otrās sērijas parametri.

Trešajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; krustošanas koeficients no 0,8 līdz 0,6, mutācijas koeficients no 0,01 līdz 0,04, attēlošanas precizitāte 5 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla ± 10 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem ± 10 km/h un vilcieniem ± 5 km/h. Pielikumā Tab. 36. apkopoti ģenētiskā algoritma pielietošanas eksperimenta trešās sērijas parametri.

Ceturtajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; krustošanas koeficients no 0,8 līdz 0,6, mutācijas koeficients no 0,01 līdz 0,04, attēlošanas precizitāte 6 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla ± 10 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem ± 10 km/h un vilcieniem ± 5 km/h. Pielikumā Tab. 37. apkopoti ģenētiskā algoritma pielietošanas eksperimenta ceturtais sērijas parametri.

Piektajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; krustošanas koeficients no 0,8 līdz 0,6, mutācijas koeficients no 0,01 līdz 0,04, attēlošanas precizitāte 4 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla ± 5 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem ± 15 km/h un vilcieniem ± 10 km/h. Pielikumā Tab. 38. apkopoti ģenētiskā algoritma pielietošanas eksperimenta piektās sērijas parametri.

Sestajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; krustošanas koeficients no 0,8 līdz 0,6, mutācijas koeficients no 0,01 līdz 0,04, attēlošanas precizitāte 5 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla ± 5 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem ± 15 km/h un vilcieniem ± 10 km/h. Pielikumā Tab. 39. apkopoti ģenētiskā algoritma pielietošanas eksperimenta sestās sērijas parametri.

Septītajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; krustošanas koeficients no 0,8 līdz 0,6, mutācijas koeficients no 0,01 līdz 0,04, attēlošanas precizitāte 5 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla ± 10 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem ± 15 km/h un vilcieniem ± 10 km/h. Pielikumā Tab. 40. apkopoti ģenētiskā algoritma pielietošanas eksperimenta septītās sērijas parametri.

Astotajai eksperimentu sērijai tiek noteikti šādi parametri; krustošanas koeficients no 0,8 līdz 0,6, mutācijas koeficients no 0,01 līdz 0,04, attēlošanas precizitāte 6 biti, pieļaujamā nobīde jaunizveidotajam sarakstam no oriģināla ± 10 min, pieļaujamā ātruma novirze autobusiem ± 15 km/h un vilcieniem ± 10 km/h. Pielikumā Tab. 41. apkopoti ģenētiskā algoritma pielietošanas eksperimenta astotās sērijas parametri.

4.6. Datormodelī iegūtie rezultāti

4.6.1. Pilsētas transporta datormodelēšanas rezultāti

Datormodelēšanas rezultātā iegūti 240 jauni kustības saraksti, no tiem 120 saraksti iegūti ar imūnā algoritma un 120 saraksti – ar ģenētiskā algoritma pielietošanu.

Katrs jauns saraksts iegūts veicot noteiktas oriģinālā saraksta elementu nobīdes.

Katrs jauns saraksts novērtēts pēc pieciem kritērijiem- mērķa funkcijas vērtību, sarakstu pārklāšanās varbūtību, elektroenerģijas papildus patēriņu, kopējo novirzi no oriģinālā saraksta un patērēto mašīnlaiku.

4.6.2. Dzelzceļa un autotransporta datormodelēšanas rezultāti

Datormodelēšanas rezultātā iegūti 1440 jauni kustības saraksti, no tiem 720 saraksti iegūti ar imūnā algoritma un 720 saraksti – ar ģenētiskā algoritma pielietošanu, pieņemot, ka pieļaujamā ātruma novirze autobusiem ± 10 km/h un vilcieniem ± 5 km/h.

Iegūti arī 1440 jauni kustības saraksti, 720 - ar imūnā algoritma un 720 saraksti – ar ģenētiskā algoritma pielietošanu, mainot pieļaujamo ātruma novirzi autobusiem ± 15 km/h un vilcieniem ± 10 km/h robežās.

Katrs jauns saraksts iegūts veicot noteiktas oriģinālā saraksta elementu nobīdes un novērtēts pēc sešiem kritērijiem- mērķa funkcijas vērtību, sadursmes varbūtību, visu pārbrauktuvju kopējo laiku aizvērtā stāvoklī, visu autotransporta vienību dīkstāves laiku, kopējo novirzi no oriģinālā saraksta un patērēto mašīnlaiku.

4.7. Secinājumi par ceturto nodaļu

Promocijas darba ceturtajā nodaļā ir izvēlēta reāli eksistējoša Rīgas pilsētas sabiedriskā transporta sistēma un tās dati izmantoti situāciju modelēšanai. Maršrutu analīze liecina par to, ka Rīgas pilsētā dzelzceļa pārbrauktuves šķērso vairāki sabiedriskā autotransporta maršruti un tāpēc ir mērķtiecīgi novērtēt šo dažādo transporta veidu plūsmu mijiedarbību to krustojšanās punktos. Tāpat ir konstatēts fakts, ka atsevišķos transporta sistēmas posmos ir novērojama kustības sarakstu pārklāšanās un ir nepieciešama šo kustības sarakstu korekcija, lai novērstu vienlaicīgu transporta vienību ierašanos pieturā, bremzēšanu ar sekojošu paātrināšanos, kas savukārt ir iemesls palielinātam elektroenerģijas patēriņam.

Eksperimentu sērijās, mainot:

- mērījumu nolasīšanas precizitāti (mainās robežās no 4 līdz 5 biti)
- pieļaujamo nobīdi no sākotnējā saraksta (mainās robežās no -5 līdz +5 min)
- pieļaujamo autobusu ātruma nobīdi (mainās robežās no -10 līdz +10 km/h)
- pieļaujamo vilcienu ātruma nobīdi (mainās robežās no -5 līdz +5 km/h)

un evolucionāro algoritmu raksturojošos parametrus:

- populācijas izmēru (mainās robežās no 10 līdz 50)
- elites izmēru (mainās robežās no 0,6 līdz 0,8)
- mutācijas koeficientu (mainās robežās no 0,01 līdz 0,04)
- atmiņas bibliotēkas izmēru (mainās robežās no 5 līdz 10)
- klonu skaitu (mainās robežās no 20 līdz 60)

tiek iegūti datu komplekti vēlākai novērtēšanai un analīzei.

Lai uzkrātu datus analīzei un novērtēšanai ar statistiskajām novērtēšanas metodēm mainot dažādus evolucionāro algoritmu raksturojošos parametrus ir veiktas katram algoritmam 8 eksperimentu sērijas pa 30 eksperimentiem katrā sērijā. Kopā ir veikti 2880 eksperimenti.

Ceturtajā nodaļā veikto eksperimentu rezultāti tiks izmantoti algoritmu jaunizveidoto kustības sarakstu novērtēšanai ar statistiskās novērtēšanas metodēm piektajā nodaļā.

5. EKSPERIMENTU REZULTĀTU NOVĒRTĒJUMS IZMANTOJOT HIPOTĒŽU STATISTISKĀS NOVĒRTĒŠANAS METODI

5.1. Situācijas raksturojums

Promocijas darba piektajā nodaļā tiek analizēti un novērtēti iepriekšējā sadaļā iegūtie eksperimentu rezultāti. Saskaņā ar mērķa funkcijas kritērijiem tiek analizētas ģenētiskā un imūnā algoritmu piedāvātās kustības sarakstu izmaiņas gan katram kritērijam atsevišķi, gan mērķa funkcijai kopumā. Sarakstu izmaiņas pilsētas elektrotransporta kustības vadības uzdevumam un dzelzceļa pārbrauktuviņu šķērsošanas uzdevumam tiek novērtētas ar hipotēžu pārbaudi izmantojot statistiskās novērtēšanas metodes pēc z-kritērija, hī-kvadrāta kritērija un Kolmogorova-Smirnova kritērija.

5.2. Hipotēžu pārbaudes iespējamās kļūdas

Hipotēžu pārbaudē pieņemot lēmumu var būt šādas situācijas [9]

- noraidīta nepareiza nulles hipotēze H_0
- nav noraidīta pareiza nulles hipotēze H_0
- noraidīta pareiza nulles hipotēze H_0
- nav noraidīta nepareiza nulles hipotēze H_0

Tā kā statistiskās hipotēzes pārbauda izmantojot izlases datus, nav izslēgti kļūdaini secinājumi. Ir iespējami divi kļūdu veidi:

- pareizas nulles hipotēzes noraidīšanas varbūtība, pirmā veida kļūda α
- nepareizas nulles hipotēzes nenoraidīšanas varbūtība, otrā veida kļūda β

Promocijas darbā hipotēzes pārbaude notiek pēc pirmā veida kļūdas α

Izlases apjoma pārbaudei tiek izmantota sekojoša formula

$$\bar{x} - z_{\alpha} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + z_{\alpha} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5.2.1)$$

Z-testa vērtējumam izmanto vienaspusēju pārbaudi pēc šādas formulas

$$H_0 : \mu \leq \mu_0, \quad H_1 : \mu > \mu_0 \quad z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}} > z_{2\alpha} \quad (5.2.2)$$

5.3. Eksperimentu rezultātu novērtēšana un statistisko hipotēžu pārbaude

Promocijas darbā, lai salīdzinātu divus algoritmus, tiek izmantota statistiskā hipotēžu pārbaude. Tiek salīdzināti sākotnējais kustības saraksts ar ģenētiskā algoritma piedāvāto rezultātu un sākotnējais kustības saraksts ar imūnā algoritma piedāvāto kustības sarakstu transporta plūsmas vadībai.

Pārbaudei tiek izvirzītas sekojošas hipotēzes:

nulles hipotēzes:

- 1) H01: Ģenētiskā algoritma piedāvātais saraksts ir labāks par esošo sarakstu;
- 2) H02: Imūnā algoritma piedāvātais saraksts ir labāks par esošo sarakstu;

un alternatīvās hipotēzes:

- 1) H11: Ģenētiskā algoritma piedāvātais saraksts nav labāks par esošo sarakstu;
- 2) H12: Imūnā algoritma piedāvātais saraksts nav labāks par esošo sarakstu.

5.3.1. Elektroenerģijas patēriņa uzdevums

Katrai eksperimentu sērijai tiek aprēķinātas vidējās kritēriju vērtības un standartnovirzes gan ar imūno algoritmu (IA) gan ar ģenētisko algoritmu (GA) iegūtajiem sarakstiem.

Oriģinālā saraksta un pārbaudāmo algoritmu vidējās kritēriju vērtības parādītas Tab. 11.

Tab. 11. Rezultāta kritēriju vidējās vērtības

Kritērijs	Oriģinālais	IA	GA
Mērķa funkcijas vērtība	0.246489	0.19643	0.15277
Pārklāšanās varbūtība	0.99987	0.95468	0.74253
Papildus patērētā enerģija Kwh	17.89	0.077	0.17
Sarakstu nobīde min	0	296.425	214.08
Patērēts mašīnlaiks s		2454.48	1895.86

Pielietojot imūno algoritmu datoreksperimentā iegūtās kritēriju vidējās vērtības un standartnovirzes apkopotas Tab. 12.

Tab. 12. Imūnā algoritma kritēriju vidējās vērtības un standartnovirzes

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcijas vērtība	0.19643	0.01752
Pārklāšanās varbūtība	0.95468	0.08751
Papildus patērētā enerģija Kwh	0.077	0.007
Sarakstu nobīde min	296.42	0.13
Patērētais mašīnlaiks min	2454.48	377.54

Imūnā algoritma pielietojuma rezultātu statistikas Z-testa vērtējums elektroenerģijas patēriņa uzdevumam apkopots Tab. 13

Tab. 13. Imūnā algoritma statistikas Z-testa vērtējums

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.189 ; 0.2039)	0.2465	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Pārklāšanās varbūtība	99.90%	(0.9175 ; 0.9919)	17.8905	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Elektroenerģija	99.90%	(0.0741 ; 0.0801)	0.9999	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Pielietojot ģenētisko algoritmu datoreksperimentā iegūtās kritēriju vidējās vērtības apkopotas Tab. 14

Tab. 14. Ģenētiskā algoritma kritēriju vidējās vērtības

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcijas vērtība	0.15277	0.00472
Pārklāšanās varbūtība	0.74253	0.02359
Papildus patērētā enerģija Kwh	0.17	0.015
Sarakstu nobīde min	214.08	2.83
Patērētais mašīnlaiks min	1895.86	33.90

Ģenētiskā algoritma pielietojuma rezultātu statistikas Z-testa vērtējums elektroenerģijas patēriņa uzdevumam apkopots Tab. 15

Tab. 15. Ģenētiskā algoritma statistikas Z-testa vērtējums

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.1508 ; 0.1548)	0.2465	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Pārklāšanās varbūtība	99.90%	(0.7325 ; 0.7526)	17.8905	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Elektroenerģija	99.90%	(0.165 ; 0.1784)	0.9999	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%

5.3.2. Pārbrauktuves šķērsošanas uzdevums

Katrai eksperimentu sērijai tiek aprēķinātas vidējās kritēriju vērtības un standartnovirzes gan ar imūno algoritmu (IA) gan ar ģenētisko algoritmu (GA) iegūtiem sarakstiem.

Sākotnēja saraksta kritēriju vērtības un pārbaudamo algoritmu vidējās kritēriju vērtības 1. eksperimentu sērijai parādītas Tab. 16.

Tab. 16. Vidējās kritēriju vērtības

1. eksperimentu sērijas dati

Kritērijs	Oriģinālais	IA	GA
Mērķa funkcija	0,527894	0,05551	0,05369
Sadursmes varbūtība	0,946267	0,00021	0,00059
Laiks slēgtā stāvoklī sek	621,8705	326,609	334,317
Dīkstāves laiks sek	89,15601	0	0,15157
Novirze min	0	31,7778	25,7278
Mašīnlaiks sek	0	241,756	188,644

Visas eksperimentu sērijās iegūtās vidējās kritēriju vērtības apkopotas pielikumā Tab. 42.

Turpinājumā tiek veikts ar imūnā un ģenētiskā algoritma palīdzību astoņās eksperimentu sērijās piedāvāto sarakstu novērtēšana pēc mērķa funkcijas kritērijiem un

izvirzīto hipotēžu pārbaude. Turpmāk nodaļa tiks apskatīta 1. eksperimentu sērijas rezultātu analīze. Imūnā algoritma piedāvātā saraksta vērtības apkopotas Tab. 17.

Tab. 17. Imūnā algoritma saraksta vērtības 1.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.05550	0.00096
Sadursmes varbūtība	0.00020	1.56 E-005
Laiks aizvērtā stāvoklī, sek	326.60	4.33
Dīkstāves laiks, sek	0	0
Saraksta nobīde min	31.77	0.43
Mašīnlaiks, sek	241.75	17.88

Imūnā algoritma statistikas Z-testa vērtējums apkopots Tab. 18

Tab. 18. Imūnā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 1.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0549 ; 0.0561)	0.5279	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0002 ; 0.0002)	0.9463	H0 nevar tikt noraidīta ar vartiktību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī min	99.90%	(324.0072 ; 329.2107)	621.87	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks min	99.90%	(0 ; 0)	89.15	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Ģenētiskā algoritma piedāvātā saraksta vērtības apkopotas Tab. 19

Tab. 19. Ģenētiskā algoritma saraksta vērtības 1.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.05368	0.00174
Sadursmes varbūtība	0.00059	4.42 E-005
Laiks slēgtā stāvoklī sek	334.31	8.40
Dīkstāves laiks sek	0.15	0.01
Novirze min	25.72	0.57
Mašīnlaiks sek	188.64	16.76

Ģenētiskā algoritma statistikas Z-testa vērtējums apkopots Tab. 20

Tab. 20. Ģenētiskā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 1.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0526 ; 0.0547)	0.5279	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0006 ; 0.0006)	0.9463	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī min	99.90%	(329.2689 ; 339.3646)	621.87	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks min	99.90%	(0.1448 ; 0.1584)	89.15	H0 nevar tikt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Pārējās eksperimentu sērijās iegūto sarakstu vērtību un Z-testa vērtējuma tabulas apkopotas pielikumā no Tab. 43 līdz Tab. 70.

5.4. Ģenētiskā un imūnā algoritma salīdzinājums pēc eksperimentu datiem

Lai salīdzinātu un pārbaudītu, kurš no diviem algoritmiem, imūnais vai ģenētiskais, ir labāks, vispirms ir jāpārbauda vai algoritmu darbības rezultātā iegūtās datu izlases empīriskās sadalījumu funkcijas ir vienādas. Tādējādi var noteikt labāko algoritmu pēc tiem kritērijiem, kuru sadalījumu funkcijas nav vienādas.

5.4.1. Pilsētas elektrotransporta uzdevuma algoritmu salīdzinājums

Pilsētas elektrotransporta uzdevumam tiek izvirzītas hipotēzes, kuru pārbaudei arī tiek izvēlēts izmantot Hī kvadrāta testu un Kolmogorova-Smirnova testu:

- H01: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultāti ir vienādi pēc mērķa funkcijas kritērija

KS-tests:

$\lambda = 4.002$

H0 ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

H₁ kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 133.86$$

$$df = 2$$

H₀ ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

- H02: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultāti ir vienādi pēc sarakstu pārklāšanās kritērija

KS-tests:

$$\lambda = 4.002$$

H₀ ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

H₁ kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 133.86$$

$$df = 2$$

H₀ ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

- H03: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultāti ir vienādi pēc patērētās elektroenerģijas kritērija

KS-tests:

$$\lambda = 0.5809$$

H₀ nevar būt noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,945

H₁ kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 14.903$$

$$df = 4$$

H₀ nevar būt noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,95

- H04: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultāti ir vienādi pēc saraksta nobīdes

KS-tests:

$$\lambda = 3.614$$

H₀ ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

H₁ kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 65.16$$

$$df = 3$$

H₀ ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

- H05: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultāti ir vienādi pēc mašīnlaika

KS-tests:

$$\lambda = 0.903$$

H₀ var būt noraidīta ar varbūtību 0,726

H₁ kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 52.56$$

$$df = 3$$

H₀ ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

Veicot algoritmu pārbaudi ar Hī-kvadrāta un Kolmogorova-Smirnova testiem var secināt, ka algoritmi pilsētas elektrotransporta uzdevumam ir salīdzināmi pēc visiem kritērijiem, izņemot elektroenerģijas patēriņa kritēriju, jo abi algoritmi piedāvā vienādus risinājumus un tādēļ tie netiek salīdzināti.

Algoritmu salīdzināšanai aprēķinātās pilsētas elektrotransporta uzdevuma kritēriju vidējās vērtības ir apkopotas tabulā Tab. 21

Tab. 21. Elektrotransporta uzdevuma kritēriju vērtības

Kritērija vidējā vērtība	IA	GA	GA salīdzinājums ar IA
Mērķa funkcijas vērtība	0.19643	0.15277	22,23%
Pārklāšanās varbūtība	0.95468	0.74253	22,22%
Sarakstu nobīde min	296.425	214.08	27,78%
Patērētais mašīnlaiks sek	2454.48	1895.86	22,76%

5.4.2. Pārbrauktuves šķērsošanas uzdevuma algoritmu salīdzinājums

Pārbrauktuves šķērsošanas uzdevumam tiek izvirzītas hipotēzes, kuru pārbaudei arī tiek izvēlēts izmantot Hī kvadrāta testu un Kolmogorova-Smirnova testu:

- H01: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultātu sadalījuma funkcijas ir vienādas pēc mērķa funkcijas kritērija

KS-tests:

$$\lambda = 0.98759669006241$$

H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 0.3777

Hī kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 276.98115304192$$

$$df = 24$$

H0 ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

- H02: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultāti rezultātu sadalījuma funkcijas ir vienādas pēc sadursmes varbūtības kritērija

KS-tests:

$$\lambda = 0.2608$$

H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,99

Hī kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 9.403$$

$$df = 6$$

H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 0,95

- H03: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultātu sadalījuma funkcijas ir vienādas pēc vienlaicīguma kritērija

KS-tests:

$$\lambda = 2.0125$$

H0 ir noraidīta ar varbūtību 0.999

Hī kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 241.683$$

$$df = 22$$

H0 ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

- H04: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultātu sadalījuma funkcijas ir vienādas pēc dīkstāves laika kritērija

KS-tests:

$$\lambda = 0.0745$$

H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,99

Hī kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 3.511$$

$$df = 3$$

H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,95

- H05: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultātu sadalījuma funkcijas ir vienādas pēc saraksta nobīdes kritērija

KS-tests:

$$\lambda = 1.8634$$

H0 ir noraidīta ar varbūtību 0,9974

Hī kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 384.528$$

$$df = 26$$

H0 ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

- H06: Imūnā un ģenētiskā algoritmu rezultātu sadalījuma funkcijas ir vienādas pēc mašīnlaika

KS-tests:

$$\lambda = 2.1988$$

H0 ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

Hī kvadrāta tests:

$$\chi^2 = 376.011$$

$$df = 25$$

H0 ir noraidīta ar varbūtību lielāku par 0,999

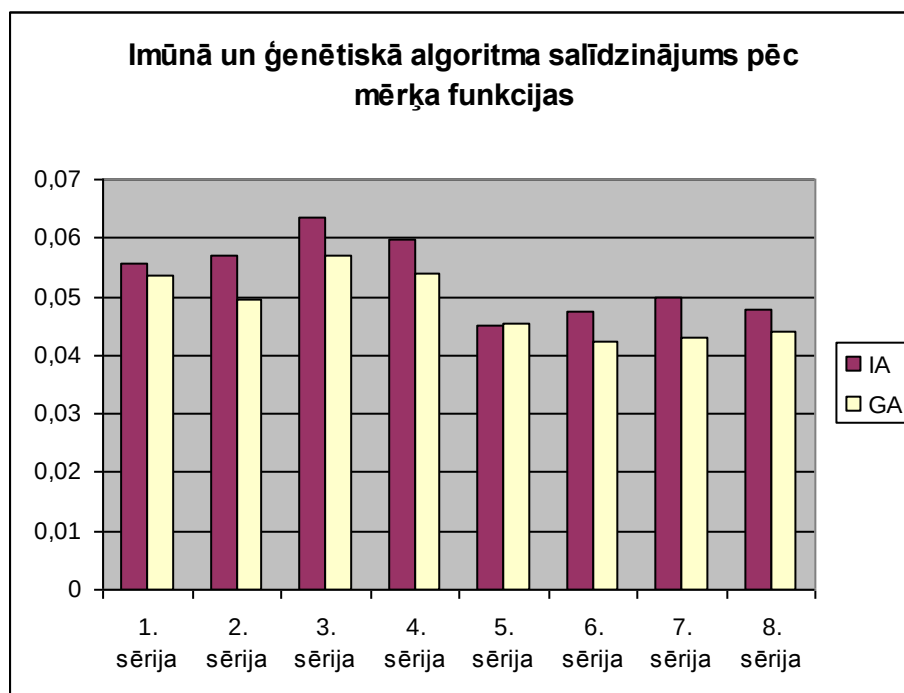
Veicot algoritmu pārbaudi ar Hī-kvadrāta un Kolmogorova-Smirnova testiem var secināt, ka algoritmi pārbrauktuves šķērsošanas uzdevumam ir salīdzināmi pēc mērķa funkcijas kritērija, pēc vienlaicīguma, pēc saraksta nobīdes un pēc patērētā mašīnlaika, jo pēc šiem kritērijiem algoritmu rezultāti atšķiras. Pēc sadursmes varbūtības un pēc dīkstāves kritērija abi algoritmi piedāvā vienādus risinājumus un tādēļ tie netiek salīdzināti.

Algoritmu salīdzināšanai aprēķinātās pārbrauktuves šķērsošanas uzdevuma kritēriju vidējās vērtības ir apkopotas tabulās un attēlos:

- pēc mērķa funkcijas kopējās vērtības Tab. 22. Att. 5.1

Tab. 22. Mērķa funkcijas vērtības

	IA	GA	GA salīdzinājums ar IA
1. sērija	0,05550	0,05368	3,27%
2. sērija	0,05708	0,04951	13,26%
3. sērija	0,06354	0,05709	10,15%
4. sērija	0,05990	0,05406	9,75%
5. sērija	0,04496	0,04556	-1,32%
6. sērija	0,04749	0,04243	10,64%
7. sērija	0,04988	0,04312	13,54%
8. sērija	0,04772	0,04397	7,86%
Vidējā vērtība			8,40%

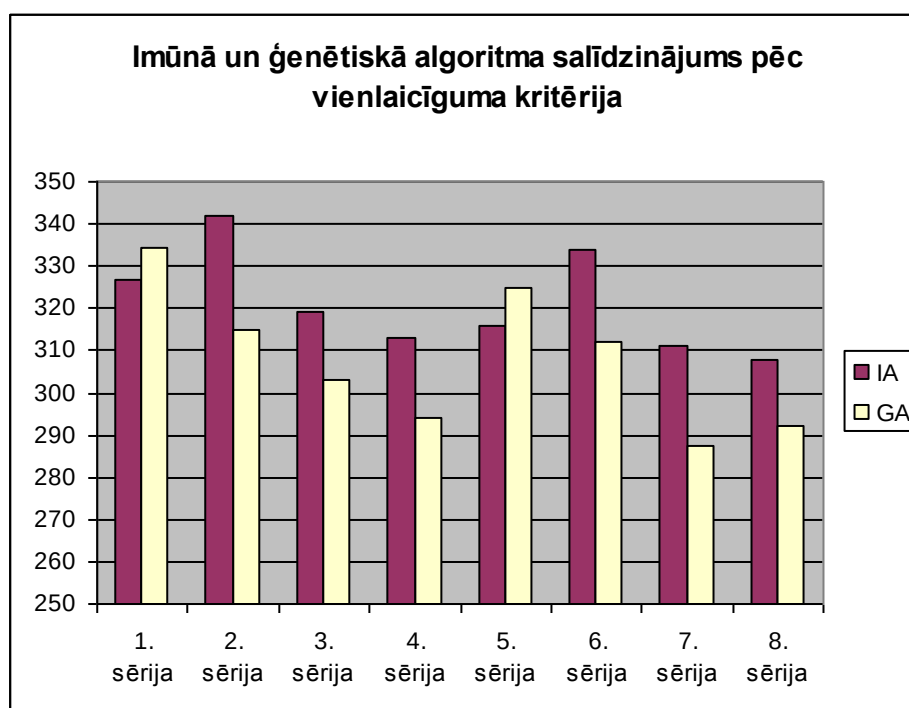


Att. 5.1. Algoritmu salīdzinājums pēc mērķa funkcijas kopējās vērtības

- pēc vienlaicīguma kritērija vērtības Tab. 23 Att. 5.2

Tab. 23. Vienlaicīguma kritērija vērtības

	IA	GA	GA salīdzinājums ar IA
1. sērija	326,60	334,31	-2,36%
2. sērija	342,01	315,15	7,85%
3. sērija	319,28	303,29	5,01%
4. sērija	313,19	294,29	6,03%
5. sērija	315,94	324,96	-2,86%
6. sērija	333,72	312,03	6,50%
7. sērija	311,14	287,26	7,67%
8. sērija	307,70	292,02	5,09%
Vidējā vērtība			4,12%

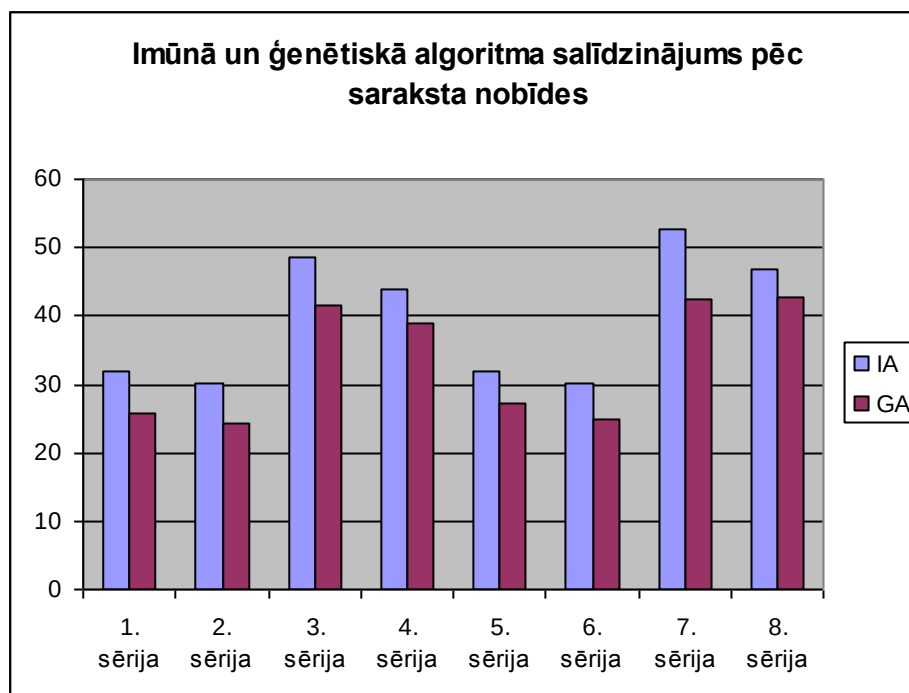


Att. 5.2. Algoritmu salīdzinājums pēc vienlaicīguma kritērija vērtības

- pēc sarakstu nobīdes kritērija vērtības Tab. 24 Att. 5.3

Tab. 24. Sarakstu nobīdes vērtības

	IA	GA	GA salīdzinājums ar IA
1. sērija	31,77	25,72	19,04%
2. sērija	30,04	24,40	18,77%
3. sērija	48,52	41,68	14,08%
4. sērija	43,76	38,96	10,96%
5. sērija	31,96	27,12	15,15%
6. sērija	30,23	24,84	17,84%
7. sērija	52,65	42,56	19,16%
8. sērija	46,91	42,67	9,04%
Vidējā vērtība			15,50%

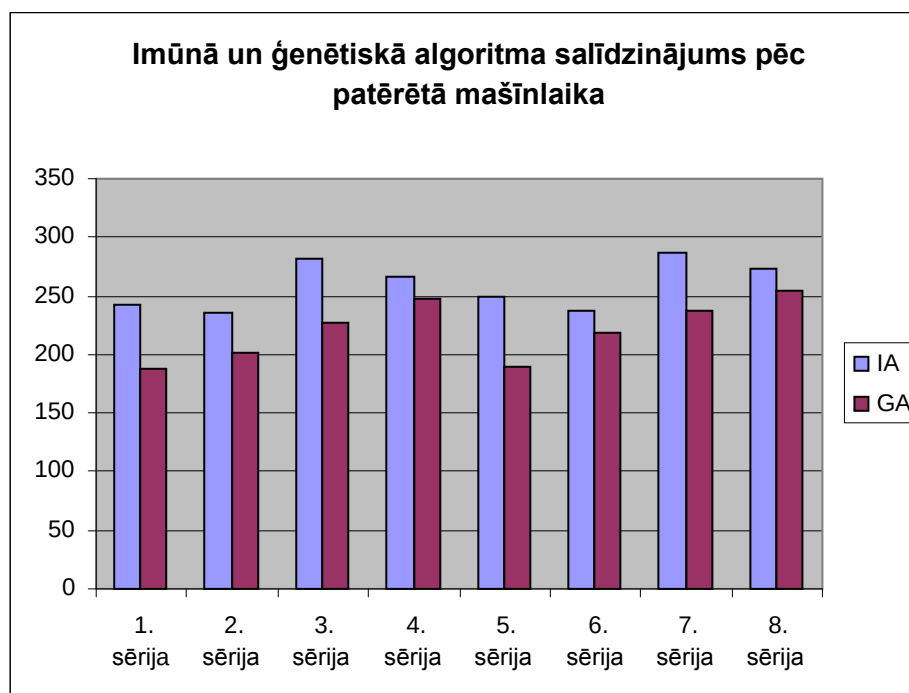


Att. 5.3. Algoritmu salīdzinājums pēc sarakstu nobīdes kritērija vērtības

- pēc patērētā mašīnlaika Tab. 25 Att. 5.4

Tab. 25. Patērētā mašīnlaika vērtības

	IA	GA	GA salīdzinājums ar IA
1. sērija	241,76	188,64	21,97%
2. sērija	235,91	201,94	14,40%
3. sērija	282,51	226,83	19,71%
4. sērija	265,94	247,97	6,76%
5. sērija	249,14	189,99	23,74%
6. sērija	237,88	219,17	7,86%
7. sērija	286,29	237,84	16,92%
8. sērija	273,74	255,15	6,79%
Vidējā vērtība			14,77%



Att. 5.4. Algoritmu salīdzinājums pēc patērētā mašīnlaika

5.5. Secinājumi par piekto nodaļu

Analizējot eksperimentu sērijās iegūto rezultātu pārbaudi ar hipotēžu pārbaudes metodi var secināt, ka 100% eksperimentu sērijās risinot gan pārbrauktuves šķērsošanas, gan pilsētas elektrotransporta enerģijas patēriņa uzdevumus apstiprinājās H01 un H02 hipotēzes – ģenētiskā un imūnā algoritma piedāvātie kustību saraksti ir labāki par esošo kustības sarakstu pēc visiem mērķa funkcijas kritērijiem.

Pēc abu evolucionāro algoritmu izstrādāto sarakstu novērtējuma vidējo vērtību salīdzināšanas var secināt, ka ģenētiskā algoritma piedāvātais saraksts pārbrauktuves šķērsošanas uzdevumam ir labāks par imūnā algoritma piedāvāto sarakstu vidēji par:

- 8,40% pēc mērķa funkcijas kritērija
- 4,12% pēc vienlaicīguma kritērija
- 15,5% pēc saraksta nobīdes kritērija
- 14,77% pēc patērētā mašīnlaika kritērija

Analizējot pilsētas elektrotransporta uzdevuma datus var secināt, ka ģenētiskā algoritma piedāvātais saraksts ir labāks par imūnā algoritma piedāvāto sarakstu vidēji par:

- 22,2% pēc mērķa funkcijas kritērija
- 22,2% pēc sarakstu pārklāšanās kritērija
- 27,78% pēc saraksta nobīdes kritērija
- 22,76% pēc patērētā mašīnlaika kritērija

SECINĀJUMI

Analizējot iegūtos rezultātus var secināt, ka promocijas darba mērķis ir sasniegts. Promocijas darba izstrādes gaitā ir veikts sekojošais:

1. Analizēta literatūrā aprakstītā informācija par transporta sistēmu vadīšanu, sistēmas modelēšanu un intelektuālo iebūvēto iekārtu izmantošanu transporta sistēmas datu plūsmu vadīšanai.
2. Izstrādāts transporta sistēmas objektu vadības matemātiskais modelis, definēti un aprakstīti konstantie un mainīgie sistēmas elementi
3. Izpētītas sarakstu teorijas un evolucionāro algoritmu pielietošanas iespējas daudzstadiju paralēlo un secīgo transporta uzdevumu risināšanai
4. Definēti pieci galvenie pilsētas transporta sistēmas vadību ietekmējošie kritēriji un kopējā mērķa funkcija drošai transporta sistēmas vadīšanai
5. Izstrādāts algoritms mērķa funkcijas katra kritērija, kā arī kopējās mērķa funkcijas vērtības aprēķināšanai
6. Izstrādātie algoritmi mērķa funkcijas atsevišķo kritēriju vērtības aprēķināšanai ir universāli un var tikt savstarpēji variēti atkarībā no uzstādītā uzdevuma
7. Izstrādāta iebūvētā iekārta izmantojot programmējamus loģiskos kontrollerus transporta sistēmas katras atsevišķās vienības vadīšanai
8. Izstrādāts transporta sistēmas datormodelis dažāda tipa transporta plūsmu vadības modelēšanai
9. Veiktas vairākas datoreksperimenta sērijas algoritmu aprobācijai
10. Veikta datoreksperimenta rezultātu analīze un hipotēžu pārbaude
11. Veikta dažādu algoritmu salīdzināšana ņemot vērā to veidoto sarakstu ietekmi uz drošuma pakāpi un dīkstāves samazināšanu

Promocijas darba laikā veiktie eksperimenti un iegūtie rezultāti ļauj izdarīt sekojošus secinājumus:

1. Izstrādāto transporta sistēmas vadības algoritmu pielietošana transporta vadības datormodelī dod iespēju:
 - nodrošinot secīgu transporta vienību ierašanos pieturās un novēršot to kustības sarakstu pārklāšanos, samazināt pilsētas elektrotransporta pārtērēto elektroenerģiju

- par 99,32 % salīdzinot ar to elektroenerģijas daudzumu, kuru elektrotransports izlieto pie esošā saraksta ar pārklāšanos
- veicot kustības sarakstos izmaiņas un mainot autobusu un vilcienu kustības ātrumu ir iespējams palielināt dzelzceļa pārbrauktuvju caurlaides spēju par 49,46 % un dod iespēju samazināt transporta dīkstāves laiku pie pārbrauktuvēm par 99,96%, t.i. nodrošināt autotransportam pārbrauktuvju šķērsošanu praktiski bez apstāšanās
 - būtiski samazināt sliežu un autotransporta sadursmju varbūtību no pašreizējās vērtības 0,946267 līdz 0,00028
2. Sarakstu teorija un evolucionārie algoritmi ir piemēroti transporta sistēmas vadības uzdevumu risināšanai, jo 100% apstiprinās hipotēze par to, ka ģenētiskā un imūnā algoritma piedāvātie kustības saraksti ir labāki par esošajiem kustības sarakstiem
 3. Iebūvēto iekārtu izmantošana transporta līdzekļu vadītājiem sniedz rekomendējoša rakstura informāciju par iespējamo sadursmes varbūtību un piemērotāku kustības ātruma izvēli, kā arī sadursmes varbūtībai sasniedzot kritisko robežu spēj bez cilvēka iejaukšanās iedarbināt avārijas bremzēšanas sistēmu dzelzceļa transportā
 4. Pēc abu evolucionāro algoritmu izstrādāto sarakstu novērtējuma vidējo vērtību salīdzināšanas var secināt, ka ģenētiskā algoritma piedāvātais saraksts pārbrauktuves šķērsošanas uzdevumam ir labāks par imūnā algoritma piedāvāto sarakstu vidēji par:
 - 8,40% pēc mērķa funkcijas kritērija
 - 4,12% pēc vienlaicīguma kritērija
 - 15,5% pēc saraksta nobīdes kritērija
 - 14,77% pēc patērētā mašīnlaika kritērija
 5. Analizējot pilsētas elektrotransporta uzdevuma datus var secināt, ka ģenētiskā algoritma piedāvātais saraksts ir labāks par imūnā algoritma piedāvāto sarakstu vidēji par:
 - 22,2% pēc mērķa funkcijas kritērija
 - 22,2% pēc sarakstu pārklāšanās kritērija
 - 27,78% pēc saraksta nobīdes kritērija
 - 22,76% pēc patērētā mašīnlaika kritērija
 6. Salīdzinot evolucionāros algoritmus var secināt, ka ģenētiskais algoritms piedāvā labākus sarakstus nekā imūnais algoritms pēc visiem mērķa funkcijas kritērijiem

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Alps I., Gorobecs M., Ļevčenko A., Ribickis L. "Sarakstu teorijas modelēšana intelektuālajās elektriskā transporta sistēmās" // RTU zinātnisko rakstu krājums „Enerģētika un Elektrotehnika” sērija 4, sējums 23, Latvija, Rīga, 2008, 184 -194 lpp.
2. Alps I., Gorobetz 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, 28-37 lpp.
3. Alps I., Gorobetz 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, 92 – 99 lpp.
4. Alps I., Potapov A., Gorobetz 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, 155 – 160 lpp.
5. Alps I., Gorobetz 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, 129-136 lpp.
6. Alps I., Gorobetz 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, 109 – 115 lpp.
7. Alps I., Gorobetz 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, ??? lpp.
8. Alps I., Gorobetz 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, 99-108 lpp.

9. Arhipova I., Bāliņa S., „Statistika ekonomikā”, mācību līdzeklis, Datorzinību centrs, Rīga, 2008, 352 lpp
10. Beinarts I. Izplūdušās loģikas kontrolleru algoritmu izpēte pasažieru transporta salona siltuma komforta vadībai. Promocijas darbs. Rīga, RTU, 2011, 171 lpp
11. Berežņojs A. Transporta plūsmas modeļu vadošo parametru ietekmes uz pilsētas ceļu kustības vadības efektivitāti izpēte. Promocijas darbs. Rīga, TSI, 2008. 256 lpp.
12. Borisovs A. Mākslīgā intelekta metodes. Rīgas Tehniskā universitāte. Automātikas un skaitļošanas tehnikas fakultāte. Rīga, RTU, 1993, 75 lpp.
13. Bazaras Ž., Bagdonas V. “Problem of the Train Traffic Schedule Optimal Addition”// Proceedings of the 9th International Conference “Transport Means”. Kaunas: Technologija, 2005, 274–277 lpp.
14. Borisov, A. N. Genetic algorithms, genetic programming, genetic machine learning, lecture slides. Transport and Telecommunications Inst. Riga, TTI, 2004, 251 lpp.
15. Barth, A. Franke U. „Tracking oncoming and turning vehicles at intersections” //In proceedings of international IEEE 13 conference, Lille, France, 2010, 861 – 868 lpp.
16. Bracciali A. “Wayside Train monitoring Systems: A State-of-the-Art and Running Safety Implications”//In proceedings of the First International Conference on Railway Technology: research, Development and Maintenance. LasPalmas de Gran Canaria, Spain 18-20 April 2012, 231-247 lpp.
17. Brooks G. N. and White C. R. An Algorithm for Finding Optimal or Near Optimal Solutions to the Production Scheduling Problem// J. Ind. Eng. 16.1965, 34 - 40 lpp.
18. Burstall R. M. A heuristic method for a jobscheduling problem// Oper. Res. Quart. Stanford, UK, 1966, 291 - 304 lpp.
19. Cīrulis J. „Matemātiskā loģika un kopu teorija”, Zvaigzne ABC, 2008, 278 lpp
20. Conway R.W, Maxwell W.L., Miller L.W. “Theory of Scheduling” Dover, published by Addison-Wesley Publishing company, Mineola N.Y. 11501, USA, 2003
21. Chen J. and Mahfouf M. „A Population Adaptive Based Immune Algorithm for Solving Multi-objective Optimization Problems”, Lecture Notes in Computer Science, 2006
22. Directive 2010/40/EU of the European parliament and of the council of 7 July 2010, Strasbourg, France, 13 lpp
23. "ERTMS Level 1: Trackside on the Zaragoza-Huesca project". Official website Alstom.com. September 2004
24. European Railway Agency, Railway Safety Performance in the European Union 2010, Espace International, 299 Boulevard de Leeds, Lille, France, 64 lpp

25. Gorobecs Mihails Ģenētisko algoritmu izpēte elektriskā transporta optimālai vadībai. Promocijas darbs. Rīga, RTU, 2008, 189lpp
26. Gromule V. Autoostas pakalpojumu kvalitātes monitoringa sistēma pasažieru loģistikā centra koncepcijas realizācijai multimodālā transporta sistēmā. Promocijas darbs. Rīga : TSI, 2010, 158 lpp
27. Grundspenķis, J., Ievads intelektuālās sistēmās, RTU, 1993, 158lpp.
28. Garey M.R. and Johnson D. S. „Computers and Intractability: A guide to the Theory of NP-Completeness”. Bell Laboratories Murray Hill, New Jersey, USA,1979, 145 lpp
29. Gen M., Cheng R. “Genetic algorithms and engineering design” John Wiley & Sons, New York, USA, 1997, 79 lpp.
30. Gao J. and Fang L. „A Novel Artificial Immune System for Multiobjective Optimization Problems”, Lecture Notes in Computer Science, 2009
31. 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
32. 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, 321-328 lpp.
33. 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, 186-192 lpp.
34. 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, 171-180 lpp.
35. 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, 1-13p
36. Gorobetz M. Electronic Intelligent Agents for Control of Mechatronics System. //In: Rīgas Tehniskās universitātes raksti. Enerģētika un Elektrotehnika. Sērija 4, sējums 20. 2007. 178-189. lpp.

37. 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
38. 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, 25-27 June 2008, 215-219 p
39. 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, 3-6 June 2008, 207-212 p.
40. Gorobetz M., P.Balckars, A. Levchenkov, L.Ribickis. 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, 4-5 June 2008, 279-289 p.
41. Gorobetz M., Research of Genetic Algorithms For Optimal Control of Electric Transport. Doctorate work, 2008, 189 lpp.
42. Gorobetz M., Alps I., Levchenkov A. "Mathematical Formulation of Public Electric Transport Scheduling Task for Artificial Immune Systems" //In proceedings of RTU 50th International Scientific Conference “Power and Electrical Engineering” Latvia, Riga 2009, 159 – 164 lpp
43. 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, Jelgava, Latvia, 81-87 p.
44. Graham Ronald, Combinatorial Scheduling theory Mathematics Today: Twelve Informal Essays, Springer-Verlag, N.Y. (1978), 183-211
45. GSM-R Frequency workshop. Information published on 19 May 2009 in the UIC electronic newsletter "UIC eNews" Nr 143.
46. Guan-Chun L., Chung-Huei C. ”A multi-modal immune algorithm for the job-shop scheduling problem” proceedings of Elsiever information sciences 179, 2009.
47. Haikin S, Van Veen B. “Signals and Systems. Second edition”, John Veelay and Sons (Asia) Pte.Ltd 2004, 559 lpp.
48. Haouari M. and Ladhari T. A branch and bound based local search for the flowshop problem. Journal of the Operational Research Society, 2003

49. Holzmann F. Improving Road Safety. Adaptive Cooperation between Driver and Assistant. Springer. Berlin.2008
50. Ishibuchi H., Yoshida T., and Murata T. Balance between genetic search and local search in memetic algorithms for multiobjective permutation flowshop scheduling. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2003
51. Jagdish K.Patel, Campbell B.Read “Handbook of The Normal Distribution”, Southern Methodist University, Dallas, US, 1972, 94 lpp.
52. Klūga A. “Satelītu rādionavigācijas sistēmas” 2010
53. Krievs O., Ribickis L. Izplūdušās loģikas kontroleri elektropiedziņas vadības sistēmās // RTU 42.SZTK materiālu krājums. Rīga, RTU, 2001, 28 lpp.
54. Krūmiņš O. Intelīgento transporta sistēmu izveides principi un realizācijas iespējas. Promocijas darbs. Rīga: RTU, 2010 - 171 lpp.
55. Krūmiņš O., Ribickis L., Raņķis I. Transporta automātiskās kustības sistēmas – tramvaja modelis. RTU zinātnisko rakstu krājums “Enerģētika un elektrotehnika.”, 4. sērija, 15. sējums, Rīga, 2005, 57.- 64. lpp.
56. Kuņicina N. Programmu aģentu modelēšanas metožu izstrāde elektropiegādes un transporta loģistikas sistēmās. Promocijas darbs. RTU, 2004 113lpp
57. Larry Henley Jackson County Herald-Tribune, September 16, 2009
58. Ļevčenko A., Gorobecs M., Ribickis L. Vizuālorientētas programmēšanas pamati industriālajā elektronikā. Rīga RTU 2010, 522lpp
59. Ļevčenko A., Gorobecs M., Raņķis I., Ribickis L., Balckars P, Potapovs A., Alps I., Korago I., Vinokurovs V. Patents “Iekārta drošai autotransporta pārbrauktuvju šķērsošanai izmantojot satelītu navigācijas sistēmas” Rīga, Latvija, P-11-102
60. Levchenkov A.. M. Gorobetz, Multiple Criteria Decision-Making Using Genetic Algorithms for Transportation Systems. //In Proceedings of International Conference on Multiple Criteria Decision-Making, January 7-12, 2008, Auckland, New Zealand, 41 p.
61. Luger G. F. Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving, Williams, 2003, 863. p
62. Merkurjevs J. Sistēmu imitācijas modelēšanas tehnoloģija, Rīga: RTU, 2008, 120 lpp.
63. Musilek P., Lau A., Reformat M., Wayard-Scott L. “Immune programming” proceedings of Elsiever information sciences 179, 2006
64. Petuhova Natālija. Temporālie datu modeļi dzelzceļa transporta informācijas sistēmās. Promocijas darbs. Rīga: TSI, 2010. - 164 lpp.

65. Pinedo Michael. Scheduling theory, algorithms, and systems. Integre Technical Publishing Co., Inc. 2001
66. Raņķis I., Bražis V. Elektrotehnoloģiskās iekārtas. – Rīga, Rīgas Tehniskā universitāte, 2005. – 108 lpp.
67. Ribickis L., Ļevčenkova A., Gorobecs M. Sistēmu teorijas pamati industriālās elektronikas modelēšanā. - Rīga: RTU, 2008. – 100 lpp.
68. Ribickis L., Ļevčenkova A., Kuņicina N., Gorobecs M.. Ievads dinamisko procesu modelēšanā mehatronikas sistēmās. Mācību grāmata. Rīga, RTU, 2006
69. Ribickis L., Raņķis I., Bražis V. Elektrotransporta rekuperācijas iespējas Rīgas pilsētā. Rīgas Domes zin.-tehn. konferences materiāli, 2001. – 4. lpp.
70. 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.
71. 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
72. Ribickis L., Rankis I. Electrical drives static characteristics and methods of speed control. – Rīga, Rīgas Tehniskā universitāte, 1995. – 107 lpp.
73. 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 – 1239 - 1244 p.
74. Takahaši A. Ģenētiskie algoritmi sarežģītu funkciju optimizācijā :promocijas darbs inženierzinātņu doktora (Dr.sc.ing.) zin. grāda iegūšanai. Rīgas Tehniskā universitāte. Datorzinātnes un informācijas tehnoloģiju fak. Datorvadības, automātikas un datortehnikas inst. Rīga : RTU, 2004. 218 lpp.
75. Russel S. J., Norvig P. Artificial Intelligence. A Modern Approach, 2nd edition. Prentice Hall, 2006
76. Russel S. J. Neural Smithing: Supervised Learning in Feedforward Artificial Neural Networks, MIT Press Cambridge, MA, USA 1998
77. "Railway Gazette: UK's first ETCS Level 2 signalling goes live". Retrieved 2010.11.07
78. Tapan P. Bagchi „Multiobjective scheduling by genetic algorithms” Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, USA, 1999, 358 lpp
79. Tejinder, S. „MegProp system for city rail-roads”// in proceedings of international IEEE 13 conference 2010 Page(s): 901 – 906

80. Thompson S., Stevens A., Maxwell A., Wood K, Guidelines for safe and effective vehicle routing, TRL Reports.2006
81. T'kindt V. and Billaut J.C. Multicriteria Scheduling – Theory, Models and Algorithms. SpringerVerlag, 2002
82. Tsuchida, A. Bhuiyan, M.S. Oguri, K. Estimation of drivers' drowsiness level using a Neural Network Based 'Error Correcting Output Coding' method //in proceedings of international IEEE 13 conference 2010 Page(s): 1887 – 1892
83. Uteševs Igors. Elektriskā sliežu transporta iebūvētās bezvadu bremzēšanas iekārtas vadības algoritmu izstrāde, izmantojot pozicionēšanas informācijas sistēmas. Promocijas darbs. Rīga: RTU, 2010 - 139 lpp.
84. Yamada T. A pruning pattern list approach to the permutation flowshop scheduling problem. Essays and Surveys in Metaheuristics.2002.
85. Yong Z. and Sannomiya N. An improvement of genetic algorithms by search pace reductions in solving largescale flowshop problems. EEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, 121C(6): 10101016, 2001
86. Ying and CJ.Liao. An ant colony system for permutation flowshop sequencing. Computers and Operational Research, 2004
87. Бурдюк В. Я., Шкурба В. В. Теория расписаний. Задачи и методы решений// Кибернетика 1971- N 1- С. 89 - 102.
88. Гордон В. С., Танаев В. С. О минимаксных задачах теории расписаний с одним прибором// Изв. АН БССР. Сер. физ.- матем.-1983.- N 3.- С. 3 9.
89. Ильницкий, Александр Леонидович Алгоритмы решения многоресурсных задач теории расписаний и их применение Kijeva 1985, 136 lpp
90. Корякин Р.А. „Вероятностный анализ алгоритмов построения кратчайших расписаний для многостадийных систем” 2005 Новосибирск, 98lpp
91. Кучумов Р. В. Автоматизация оперативного управления движением поездов на железнодорожных станциях. Диссертация. Санкт-Петербург, 2009 - 252 с.
92. Комплексное локомотивное устройство безопасности. Инструкция по техническому обслуживанию. 36260-00-00 ИО (УТВ. МПС РФ 26.04.1999 N ЦТ-ЦШ-659)
93. Лазарев, Александр Алексеевич „Методы и алгоритмы решения задач теории расписаний для одного и нескольких приборов и их применение для задач комбинаторной оптимизации”, Москва, 2007, 426lpp

94. Маслов, Михаил Геннадьевич „Разработка моделей и алгоритмов составления расписаний в системах административно-организационного управления” 2004 Москва 217lpp
95. Матвеев С.И., Коугия В.А. Высокоточные цифровые модели пути и спутниковая навигация железнодорожного транспорта. 2005. — 290 с.ISBN 5-89035-227-X
96. Мохонько В. П. Микропроцессорная система обеспечения безопасности функционирования железнодорожных переездов. Диссертация. Самара, 2000 - 42 с.
97. Рыков, Иван Александрович Алгоритмы с оценками качества для задач календарного планирования, упаковки и выбора подмножества векторов, 2009
98. Танаев В. С. Некоторые оптимизируемые функции одностадийного производства// ДАН БССР 9.- 1965.- N 1.- С. 11 14.
99. Танаев В. С., Гордон В. С., Шафранский Я. М. Теория расписаний. Одностадийные системы.- М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984,- 384 с
100. Танаев В. С., Сотсков Ю. Н., Струевич В. А. Теория расписаний. Многостадийные системы.-М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 328 с.
101. Танаев В. С., Левин Г. М. Об оптимальном поведении систем с частично ограниченной памятью// Изв. АН БССР, сер. физ.- мат. наук.- 1967.- N 3.- С. 82 88.

PIELIKUMS

Tab. 26. Izvēlētie imūnā algoritma parametri 1.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Msize	Nclons	Precision	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	5	20	4	-5	5	10	5
2	20	5	20	4	-5	5	10	5
3	30	5	20	4	-5	5	10	5
4	40	5	20	4	-5	5	10	5
5	50	5	20	4	-5	5	10	5
6	10	5	40	4	-5	5	10	5
7	20	5	40	4	-5	5	10	5
8	30	5	40	4	-5	5	10	5
9	40	5	40	4	-5	5	10	5
10	50	5	40	4	-5	5	10	5
11	10	5	60	4	-5	5	10	5
12	20	5	60	4	-5	5	10	5
13	30	5	60	4	-5	5	10	5
14	40	5	60	4	-5	5	10	5
15	50	5	60	4	-5	5	10	5
16	10	10	20	4	-5	5	10	5
17	20	10	20	4	-5	5	10	5
18	30	10	20	4	-5	5	10	5
19	40	10	20	4	-5	5	10	5
20	50	10	20	4	-5	5	10	5
21	10	10	40	4	-5	5	10	5
22	20	10	40	4	-5	5	10	5
23	30	10	40	4	-5	5	10	5
24	40	10	40	4	-5	5	10	5
25	50	10	40	4	-5	5	10	5
26	10	10	60	4	-5	5	10	5
27	20	10	60	4	-5	5	10	5
28	30	10	60	4	-5	5	10	5
29	40	10	60	4	-5	5	10	5
30	50	10	60	4	-5	5	10	5

Tab. 27. Izvēlētie imūnā algoritma parametri 2.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Msize	Nclons	Precision	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	5	20	5	-5	5	10	5
2	20	5	20	5	-5	5	10	5
3	30	5	20	5	-5	5	10	5
4	40	5	20	5	-5	5	10	5
5	50	5	20	5	-5	5	10	5
6	10	5	40	5	-5	5	10	5
7	20	5	40	5	-5	5	10	5
8	30	5	40	5	-5	5	10	5
9	40	5	40	5	-5	5	10	5
10	50	5	40	5	-5	5	10	5
11	10	5	60	5	-5	5	10	5
12	20	5	60	5	-5	5	10	5
13	30	5	60	5	-5	5	10	5
14	40	5	60	5	-5	5	10	5
15	50	5	60	5	-5	5	10	5
16	10	10	20	5	-5	5	10	5
17	20	10	20	5	-5	5	10	5
18	30	10	20	5	-5	5	10	5
19	40	10	20	5	-5	5	10	5
20	50	10	20	5	-5	5	10	5
21	10	10	40	5	-5	5	10	5
22	20	10	40	5	-5	5	10	5
23	30	10	40	5	-5	5	10	5
24	40	10	40	5	-5	5	10	5
25	50	10	40	5	-5	5	10	5
26	10	10	60	5	-5	5	10	5
27	20	10	60	5	-5	5	10	5
28	30	10	60	5	-5	5	10	5
29	40	10	60	5	-5	5	10	5
30	50	10	60	5	-5	5	10	5

Tab. 28. Izvēlētie imūnā algoritma parametri 3.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Msize	Nclons	Precision	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	5	20	4	-10	10	10	5
2	20	5	20	4	-10	10	10	5
3	30	5	20	4	-10	10	10	5
4	40	5	20	4	-10	10	10	5
5	50	5	20	4	-10	10	10	5
6	10	5	40	4	-10	10	10	5
7	20	5	40	4	-10	10	10	5
8	30	5	40	4	-10	10	10	5
9	40	5	40	4	-10	10	10	5
10	50	5	40	4	-10	10	10	5
11	10	5	60	4	-10	10	10	5
12	20	5	60	4	-10	10	10	5
13	30	5	60	4	-10	10	10	5
14	40	5	60	4	-10	10	10	5
15	50	5	60	4	-10	10	10	5
16	10	10	20	4	-10	10	10	5
17	20	10	20	4	-10	10	10	5
18	30	10	20	4	-10	10	10	5
19	40	10	20	4	-10	10	10	5
20	50	10	20	4	-10	10	10	5
21	10	10	40	4	-10	10	10	5
22	20	10	40	4	-10	10	10	5
23	30	10	40	4	-10	10	10	5
24	40	10	40	4	-10	10	10	5
25	50	10	40	4	-10	10	10	5
26	10	10	60	4	-10	10	10	5
27	20	10	60	4	-10	10	10	5
28	30	10	60	4	-10	10	10	5
29	40	10	60	4	-10	10	10	5
30	50	10	60	4	-10	10	10	5

Tab. 29. Izvēlētie imūnā algoritma parametri 4.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Msize	Nclons	Precision	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	5	20	5	-10	10	10	5
2	20	5	20	5	-10	10	10	5
3	30	5	20	5	-10	10	10	5
4	40	5	20	5	-10	10	10	5
5	50	5	20	5	-10	10	10	5
6	10	5	40	5	-10	10	10	5
7	20	5	40	5	-10	10	10	5
8	30	5	40	5	-10	10	10	5
9	40	5	40	5	-10	10	10	5
10	50	5	40	5	-10	10	10	5
11	10	5	60	5	-10	10	10	5
12	20	5	60	5	-10	10	10	5
13	30	5	60	5	-10	10	10	5
14	40	5	60	5	-10	10	10	5
15	50	5	60	5	-10	10	10	5
16	10	10	20	5	-10	10	10	5
17	20	10	20	5	-10	10	10	5
18	30	10	20	5	-10	10	10	5
19	40	10	20	5	-10	10	10	5
20	50	10	20	5	-10	10	10	5
21	10	10	40	5	-10	10	10	5
22	20	10	40	5	-10	10	10	5
23	30	10	40	5	-10	10	10	5
24	40	10	40	5	-10	10	10	5
25	50	10	40	5	-10	10	10	5
26	10	10	60	5	-10	10	10	5
27	20	10	60	5	-10	10	10	5
28	30	10	60	5	-10	10	10	5
29	40	10	60	5	-10	10	10	5
30	50	10	60	5	-10	10	10	5

Tab. 30. Izvēlētie imūnā algoritma parametri 5.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Msize	Nclons	Precision	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	5	20	4	-5	5	15	10
2	20	5	20	4	-5	5	15	10
3	30	5	20	4	-5	5	15	10
4	40	5	20	4	-5	5	15	10
5	50	5	20	4	-5	5	15	10
6	10	5	40	4	-5	5	15	10
7	20	5	40	4	-5	5	15	10
8	30	5	40	4	-5	5	15	10
9	40	5	40	4	-5	5	15	10
10	50	5	40	4	-5	5	15	10
11	10	5	60	4	-5	5	15	10
12	20	5	60	4	-5	5	15	10
13	30	5	60	4	-5	5	15	10
14	40	5	60	4	-5	5	15	10
15	50	5	60	4	-5	5	15	10
16	10	10	20	4	-5	5	15	10
17	20	10	20	4	-5	5	15	10
18	30	10	20	4	-5	5	15	10
19	40	10	20	4	-5	5	15	10
20	50	10	20	4	-5	5	15	10
21	10	10	40	4	-5	5	15	10
22	20	10	40	4	-5	5	15	10
23	30	10	40	4	-5	5	15	10
24	40	10	40	4	-5	5	15	10
25	50	10	40	4	-5	5	15	10
26	10	10	60	4	-5	5	15	10
27	20	10	60	4	-5	5	15	10
28	30	10	60	4	-5	5	15	10
29	40	10	60	4	-5	5	15	10
30	50	10	60	4	-5	5	15	10

Tab. 31. Izvēlētie imūnā algoritma parametri 6.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Msize	Nclons	Precision	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	5	20	5	-5	5	15	10
2	20	5	20	5	-5	5	15	10
3	30	5	20	5	-5	5	15	10
4	40	5	20	5	-5	5	15	10
5	50	5	20	5	-5	5	15	10
6	10	5	40	5	-5	5	15	10
7	20	5	40	5	-5	5	15	10
8	30	5	40	5	-5	5	15	10
9	40	5	40	5	-5	5	15	10
10	50	5	40	5	-5	5	15	10
11	10	5	60	5	-5	5	15	10
12	20	5	60	5	-5	5	15	10
13	30	5	60	5	-5	5	15	10
14	40	5	60	5	-5	5	15	10
15	50	5	60	5	-5	5	15	10
16	10	10	20	5	-5	5	15	10
17	20	10	20	5	-5	5	15	10
18	30	10	20	5	-5	5	15	10
19	40	10	20	5	-5	5	15	10
20	50	10	20	5	-5	5	15	10
21	10	10	40	5	-5	5	15	10
22	20	10	40	5	-5	5	15	10
23	30	10	40	5	-5	5	15	10
24	40	10	40	5	-5	5	15	10
25	50	10	40	5	-5	5	15	10
26	10	10	60	5	-5	5	15	10
27	20	10	60	5	-5	5	15	10
28	30	10	60	5	-5	5	15	10
29	40	10	60	5	-5	5	15	10
30	50	10	60	5	-5	5	15	10

Tab. 32. Izvēlētie imūnā algoritma parametri 7.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Msize	Nclons	Precision	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	5	20	4	-10	10	15	10
2	20	5	20	4	-10	10	15	10
3	30	5	20	4	-10	10	15	10
4	40	5	20	4	-10	10	15	10
5	50	5	20	4	-10	10	15	10
6	10	5	40	4	-10	10	15	10
7	20	5	40	4	-10	10	15	10
8	30	5	40	4	-10	10	15	10
9	40	5	40	4	-10	10	15	10
10	50	5	40	4	-10	10	15	10
11	10	5	60	4	-10	10	15	10
12	20	5	60	4	-10	10	15	10
13	30	5	60	4	-10	10	15	10
14	40	5	60	4	-10	10	15	10
15	50	5	60	4	-10	10	15	10
16	10	10	20	4	-10	10	15	10
17	20	10	20	4	-10	10	15	10
18	30	10	20	4	-10	10	15	10
19	40	10	20	4	-10	10	15	10
20	50	10	20	4	-10	10	15	10
21	10	10	40	4	-10	10	15	10
22	20	10	40	4	-10	10	15	10
23	30	10	40	4	-10	10	15	10
24	40	10	40	4	-10	10	15	10
25	50	10	40	4	-10	10	15	10
26	10	10	60	4	-10	10	15	10
27	20	10	60	4	-10	10	15	10
28	30	10	60	4	-10	10	15	10
29	40	10	60	4	-10	10	15	10
30	50	10	60	4	-10	10	15	10

Tab. 33. Izvēlētie imūnā algoritma parametri 8.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Msize	Nclons	Precision	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	5	20	5	-10	10	15	10
2	20	5	20	5	-10	10	15	10
3	30	5	20	5	-10	10	15	10
4	40	5	20	5	-10	10	15	10
5	50	5	20	5	-10	10	15	10
6	10	5	40	5	-10	10	15	10
7	20	5	40	5	-10	10	15	10
8	30	5	40	5	-10	10	15	10
9	40	5	40	5	-10	10	15	10
10	50	5	40	5	-10	10	15	10
11	10	5	60	5	-10	10	15	10
12	20	5	60	5	-10	10	15	10
13	30	5	60	5	-10	10	15	10
14	40	5	60	5	-10	10	15	10
15	50	5	60	5	-10	10	15	10
16	10	10	20	5	-10	10	15	10
17	20	10	20	5	-10	10	15	10
18	30	10	20	5	-10	10	15	10
19	40	10	20	5	-10	10	15	10
20	50	10	20	5	-10	10	15	10
21	10	10	40	5	-10	10	15	10
22	20	10	40	5	-10	10	15	10
23	30	10	40	5	-10	10	15	10
24	40	10	40	5	-10	10	15	10
25	50	10	40	5	-10	10	15	10
26	10	10	60	5	-10	10	15	10
27	20	10	60	5	-10	10	15	10
28	30	10	60	5	-10	10	15	10
29	40	10	60	5	-10	10	15	10
30	50	10	60	5	-10	10	15	10

Tab. 34. Izvēlētie ģenētiskā algoritma parametri 1.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Non- elite	Mutation	Bits	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	0,8	0,01	4	-5	5	10	5
2	20	0,8	0,01	4	-5	5	10	5
3	30	0,8	0,01	4	-5	5	10	5
4	40	0,8	0,01	4	-5	5	10	5
5	50	0,8	0,01	4	-5	5	10	5
6	10	0,8	0,02	4	-5	5	10	5
7	20	0,8	0,02	4	-5	5	10	5
8	30	0,8	0,02	4	-5	5	10	5
9	40	0,8	0,02	4	-5	5	10	5
10	50	0,8	0,02	4	-5	5	10	5
11	10	0,8	0,04	4	-5	5	10	5
12	20	0,8	0,04	4	-5	5	10	5
13	30	0,8	0,04	4	-5	5	10	5
14	40	0,8	0,04	4	-5	5	10	5
15	50	0,8	0,04	4	-5	5	10	5
16	10	0,6	0,01	4	-5	5	10	5
17	20	0,6	0,01	4	-5	5	10	5
18	30	0,6	0,01	4	-5	5	10	5
19	40	0,6	0,01	4	-5	5	10	5
20	50	0,6	0,01	4	-5	5	10	5
21	10	0,6	0,02	4	-5	5	10	5
22	20	0,6	0,02	4	-5	5	10	5
23	30	0,6	0,02	4	-5	5	10	5
24	40	0,6	0,02	4	-5	5	10	5
25	50	0,6	0,02	4	-5	5	10	5
26	10	0,6	0,04	4	-5	5	10	5
27	20	0,6	0,04	4	-5	5	10	5
28	30	0,6	0,04	4	-5	5	10	5
29	40	0,6	0,04	4	-5	5	10	5
30	50	0,6	0,04	4	-5	5	10	5

Tab. 35. Izvēlētie ģenētiskā algoritma parametri 2.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Non-elite	Mutation	Bits	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	0,8	0,01	5	-5	5	10	5
2	20	0,8	0,01	5	-5	5	10	5
3	30	0,8	0,01	5	-5	5	10	5
4	40	0,8	0,01	5	-5	5	10	5
5	50	0,8	0,01	5	-5	5	10	5
6	10	0,8	0,02	5	-5	5	10	5
7	20	0,8	0,02	5	-5	5	10	5
8	30	0,8	0,02	5	-5	5	10	5
9	40	0,8	0,02	5	-5	5	10	5
10	50	0,8	0,02	5	-5	5	10	5
11	10	0,8	0,04	5	-5	5	10	5
12	20	0,8	0,04	5	-5	5	10	5
13	30	0,8	0,04	5	-5	5	10	5
14	40	0,8	0,04	5	-5	5	10	5
15	50	0,8	0,04	5	-5	5	10	5
16	10	0,6	0,01	5	-5	5	10	5
17	20	0,6	0,01	5	-5	5	10	5
18	30	0,6	0,01	5	-5	5	10	5
19	40	0,6	0,01	5	-5	5	10	5
20	50	0,6	0,01	5	-5	5	10	5
21	10	0,6	0,02	5	-5	5	10	5
22	20	0,6	0,02	5	-5	5	10	5
23	30	0,6	0,02	5	-5	5	10	5
24	40	0,6	0,02	5	-5	5	10	5
25	50	0,6	0,02	5	-5	5	10	5
26	10	0,6	0,04	5	-5	5	10	5
27	20	0,6	0,04	5	-5	5	10	5
28	30	0,6	0,04	5	-5	5	10	5
29	40	0,6	0,04	5	-5	5	10	5
30	50	0,6	0,04	5	-5	5	10	5

Tab. 36. Izvēlētie ģenētiskā algoritma parametri 3.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Non-elite	Mutation	Bits	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	0,8	0,01	5	-10	10	10	5
2	20	0,8	0,01	5	-10	10	10	5
3	30	0,8	0,01	5	-10	10	10	5
4	40	0,8	0,01	5	-10	10	10	5
5	50	0,8	0,01	5	-10	10	10	5
6	10	0,8	0,02	5	-10	10	10	5
7	20	0,8	0,02	5	-10	10	10	5
8	30	0,8	0,02	5	-10	10	10	5
9	40	0,8	0,02	5	-10	10	10	5
10	50	0,8	0,02	5	-10	10	10	5
11	10	0,8	0,04	5	-10	10	10	5
12	20	0,8	0,04	5	-10	10	10	5
13	30	0,8	0,04	5	-10	10	10	5
14	40	0,8	0,04	5	-10	10	10	5
15	50	0,8	0,04	5	-10	10	10	5
16	10	0,6	0,01	5	-10	10	10	5
17	20	0,6	0,01	5	-10	10	10	5
18	30	0,6	0,01	5	-10	10	10	5
19	40	0,6	0,01	5	-10	10	10	5
20	50	0,6	0,01	5	-10	10	10	5
21	10	0,6	0,02	5	-10	10	10	5
22	20	0,6	0,02	5	-10	10	10	5
23	30	0,6	0,02	5	-10	10	10	5
24	40	0,6	0,02	5	-10	10	10	5
25	50	0,6	0,02	5	-10	10	10	5
26	10	0,6	0,04	5	-10	10	10	5
27	20	0,6	0,04	5	-10	10	10	5
28	30	0,6	0,04	5	-10	10	10	5
29	40	0,6	0,04	5	-10	10	10	5
30	50	0,6	0,04	5	-10	10	10	5

Tab. 37. Izvēlētie ģenētiskā algoritma parametri 4.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Non- elite	Mutation	Bits	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	0,8	0,01	6	-10	10	10	5
2	20	0,8	0,01	6	-10	10	10	5
3	30	0,8	0,01	6	-10	10	10	5
4	40	0,8	0,01	6	-10	10	10	5
5	50	0,8	0,01	6	-10	10	10	5
6	10	0,8	0,02	6	-10	10	10	5
7	20	0,8	0,02	6	-10	10	10	5
8	30	0,8	0,02	6	-10	10	10	5
9	40	0,8	0,02	6	-10	10	10	5
10	50	0,8	0,02	6	-10	10	10	5
11	10	0,8	0,04	6	-10	10	10	5
12	20	0,8	0,04	6	-10	10	10	5
13	30	0,8	0,04	6	-10	10	10	5
14	40	0,8	0,04	6	-10	10	10	5
15	50	0,8	0,04	6	-10	10	10	5
16	10	0,6	0,01	6	-10	10	10	5
17	20	0,6	0,01	6	-10	10	10	5
18	30	0,6	0,01	6	-10	10	10	5
19	40	0,6	0,01	6	-10	10	10	5
20	50	0,6	0,01	6	-10	10	10	5
21	10	0,6	0,02	6	-10	10	10	5
22	20	0,6	0,02	6	-10	10	10	5
23	30	0,6	0,02	6	-10	10	10	5
24	40	0,6	0,02	6	-10	10	10	5
25	50	0,6	0,02	6	-10	10	10	5
26	10	0,6	0,04	6	-10	10	10	5
27	20	0,6	0,04	6	-10	10	10	5
28	30	0,6	0,04	6	-10	10	10	5
29	40	0,6	0,04	6	-10	10	10	5
30	50	0,6	0,04	6	-10	10	10	5

Tab. 38. Izvēlētie ģenētiskā algoritma parametri 5.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Non-elite	Mutation	Bits	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	0,8	0,01	4	-5	5	15	10
2	20	0,8	0,01	4	-5	5	15	10
3	30	0,8	0,01	4	-5	5	15	10
4	40	0,8	0,01	4	-5	5	15	10
5	50	0,8	0,01	4	-5	5	15	10
6	10	0,8	0,02	4	-5	5	15	10
7	20	0,8	0,02	4	-5	5	15	10
8	30	0,8	0,02	4	-5	5	15	10
9	40	0,8	0,02	4	-5	5	15	10
10	50	0,8	0,02	4	-5	5	15	10
11	10	0,8	0,04	4	-5	5	15	10
12	20	0,8	0,04	4	-5	5	15	10
13	30	0,8	0,04	4	-5	5	15	10
14	40	0,8	0,04	4	-5	5	15	10
15	50	0,8	0,04	4	-5	5	15	10
16	10	0,6	0,01	4	-5	5	15	10
17	20	0,6	0,01	4	-5	5	15	10
18	30	0,6	0,01	4	-5	5	15	10
19	40	0,6	0,01	4	-5	5	15	10
20	50	0,6	0,01	4	-5	5	15	10
21	10	0,6	0,02	4	-5	5	15	10
22	20	0,6	0,02	4	-5	5	15	10
23	30	0,6	0,02	4	-5	5	15	10
24	40	0,6	0,02	4	-5	5	15	10
25	50	0,6	0,02	4	-5	5	15	10
26	10	0,6	0,04	4	-5	5	15	10
27	20	0,6	0,04	4	-5	5	15	10
28	30	0,6	0,04	4	-5	5	15	10
29	40	0,6	0,04	4	-5	5	15	10
30	50	0,6	0,04	4	-5	5	15	10

Tab. 39. Izvēlētie ģenētiskā algoritma parametri 6.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Non- elite	Mutation	Bits	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	0,8	0,01	5	-5	5	15	10
2	20	0,8	0,01	5	-5	5	15	10
3	30	0,8	0,01	5	-5	5	15	10
4	40	0,8	0,01	5	-5	5	15	10
5	50	0,8	0,01	5	-5	5	15	10
6	10	0,8	0,02	5	-5	5	15	10
7	20	0,8	0,02	5	-5	5	15	10
8	30	0,8	0,02	5	-5	5	15	10
9	40	0,8	0,02	5	-5	5	15	10
10	50	0,8	0,02	5	-5	5	15	10
11	10	0,8	0,04	5	-5	5	15	10
12	20	0,8	0,04	5	-5	5	15	10
13	30	0,8	0,04	5	-5	5	15	10
14	40	0,8	0,04	5	-5	5	15	10
15	50	0,8	0,04	5	-5	5	15	10
16	10	0,6	0,01	5	-5	5	15	10
17	20	0,6	0,01	5	-5	5	15	10
18	30	0,6	0,01	5	-5	5	15	10
19	40	0,6	0,01	5	-5	5	15	10
20	50	0,6	0,01	5	-5	5	15	10
21	10	0,6	0,02	5	-5	5	15	10
22	20	0,6	0,02	5	-5	5	15	10
23	30	0,6	0,02	5	-5	5	15	10
24	40	0,6	0,02	5	-5	5	15	10
25	50	0,6	0,02	5	-5	5	15	10
26	10	0,6	0,04	5	-5	5	15	10
27	20	0,6	0,04	5	-5	5	15	10
28	30	0,6	0,04	5	-5	5	15	10
29	40	0,6	0,04	5	-5	5	15	10
30	50	0,6	0,04	5	-5	5	15	10

Tab. 40. Izvēlētie ģenētiskā algoritma parametri 7.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Non- elite	Mutation	Bits	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	0,8	0,01	5	-10	10	15	10
2	20	0,8	0,01	5	-10	10	15	10
3	30	0,8	0,01	5	-10	10	15	10
4	40	0,8	0,01	5	-10	10	15	10
5	50	0,8	0,01	5	-10	10	15	10
6	10	0,8	0,02	5	-10	10	15	10
7	20	0,8	0,02	5	-10	10	15	10
8	30	0,8	0,02	5	-10	10	15	10
9	40	0,8	0,02	5	-10	10	15	10
10	50	0,8	0,02	5	-10	10	15	10
11	10	0,8	0,04	5	-10	10	15	10
12	20	0,8	0,04	5	-10	10	15	10
13	30	0,8	0,04	5	-10	10	15	10
14	40	0,8	0,04	5	-10	10	15	10
15	50	0,8	0,04	5	-10	10	15	10
16	10	0,6	0,01	5	-10	10	15	10
17	20	0,6	0,01	5	-10	10	15	10
18	30	0,6	0,01	5	-10	10	15	10
19	40	0,6	0,01	5	-10	10	15	10
20	50	0,6	0,01	5	-10	10	15	10
21	10	0,6	0,02	5	-10	10	15	10
22	20	0,6	0,02	5	-10	10	15	10
23	30	0,6	0,02	5	-10	10	15	10
24	40	0,6	0,02	5	-10	10	15	10
25	50	0,6	0,02	5	-10	10	15	10
26	10	0,6	0,04	5	-10	10	15	10
27	20	0,6	0,04	5	-10	10	15	10
28	30	0,6	0,04	5	-10	10	15	10
29	40	0,6	0,04	5	-10	10	15	10
30	50	0,6	0,04	5	-10	10	15	10

Tab. 41. Izvēlētie ģenētiskā algoritma parametri 8.eksperimentu sērijai

Nr.	Psize	Non- elite	Mutation	Bits	xmin	xmax	Vbus stdev	Vtrain stdev
1	10	0,8	0,01	6	-10	10	15	10
2	20	0,8	0,01	6	-10	10	15	10
3	30	0,8	0,01	6	-10	10	15	10
4	40	0,8	0,01	6	-10	10	15	10
5	50	0,8	0,01	6	-10	10	15	10
6	10	0,8	0,02	6	-10	10	15	10
7	20	0,8	0,02	6	-10	10	15	10
8	30	0,8	0,02	6	-10	10	15	10
9	40	0,8	0,02	6	-10	10	15	10
10	50	0,8	0,02	6	-10	10	15	10
11	10	0,8	0,04	6	-10	10	15	10
12	20	0,8	0,04	6	-10	10	15	10
13	30	0,8	0,04	6	-10	10	15	10
14	40	0,8	0,04	6	-10	10	15	10
15	50	0,8	0,04	6	-10	10	15	10
16	10	0,6	0,01	6	-10	10	15	10
17	20	0,6	0,01	6	-10	10	15	10
18	30	0,6	0,01	6	-10	10	15	10
19	40	0,6	0,01	6	-10	10	15	10
20	50	0,6	0,01	6	-10	10	15	10
21	10	0,6	0,02	6	-10	10	15	10
22	20	0,6	0,02	6	-10	10	15	10
23	30	0,6	0,02	6	-10	10	15	10
24	40	0,6	0,02	6	-10	10	15	10
25	50	0,6	0,02	6	-10	10	15	10
26	10	0,6	0,04	6	-10	10	15	10
27	20	0,6	0,04	6	-10	10	15	10
28	30	0,6	0,04	6	-10	10	15	10
29	40	0,6	0,04	6	-10	10	15	10
30	50	0,6	0,04	6	-10	10	15	10

Tab. 42. Vidējās kritēriju vērtības

1. eksperimentu sērijas dati

Kritērijs	Oriģinālais	IA	GA
Mērķa funkcija	0.52789	0.05551	0.05369
Sadursmes varbūtība	0.94626	0.00021	0.00059
Laiks slēgtā stāvoklī min	621.87	326.609	334.317
Dīkstāves laiks min	89.15	0	0.15
Novirze min	0	31.77	25.72
Mašīnlaiks min	0	241.75	188.64

2. eksperimentu sērijas dati

Kritērijs	Oriģinālais	IA	GA
Mērķa funkcija	0.52789	0.05709	0.04952
Sadursmes varbūtība	0.94626	8.5E-05	0.00012
Laiks slēgtā stāvoklī min	621.87	342.01	315.15
Dīkstāves laiks min	89.15	0.03	0.07
Novirze min	0	30.04	24.40
Mašīnlaiks min	0	235.90	201.93

3. eksperimentu sērijas dati

Kritērijs	Oriģinālais	IA	GA
Mērķa funkcija	0.52789	0.0635	0.0571
Sadursmes varbūtība	0.94626	7.6E-05	7.6E-05
Laiks slēgtā stāvoklī min	621.87	319.28	303.29
Dīkstāves laiks min	89.15	0.017	0.036
Novirze min	0	48.52	41.68
Mašīnlaiks min	0	282.50	226.82

4. eksperimentu sērijas dati

Kritērijs	Oriģinālais	IA	GA
Mērķa funkcija	0.52789	0.0599	0.05406
Sadursmes varbūtība	0.94626	0.00014	7.8E-05
Laiks slēgtā stāvoklī min	621.87	313.19	294.29
Dīkstāves laiks min	89.15	0	0
Novirze min	0	43.76	38.96
Mašīnlaiks min	0	265.94	247.96

5. eksperimentu sērijas dati

Kritērijs	Oriģinālais	IA	GA
Mērķa funkcija	0.50409	0.0449	0.0455
Sadursmes varbūtība	0.95004	0.00025	0.00133
Laiks slēgtā stāvoklī min	623	315.94	324.97
Dīkstāves laiks min	52.73	0	0
Novirze min	0	31.96	27.12
Mašīnlaiks min	0	249.14	189.98

6. eksperimentu sērijas dati

Kritērijs	Oriģinālais	IA	GA
Mērķa funkcija	0.50409	0.0474	0.0424
Sadursmes varbūtība	0.95004	0.00035	0.0005
Laiks slēgtā stāvoklī min	623	333.72	312.03
Dīkstāves laiks min	52.73	0	0
Novirze min	0	30.23	24.84
Mašīnlaiks min	0	237.87	219.17

7. eksperimentu sērijas dati

Kritērijs	Oriģinālais	IA	GA
Mērķa funkcija	0.50409	0.0498	0.0431
Sadursmes varbūtība	0.95004	0.00016	0.00022
Laiks slēgtā stāvoklī min	623	311.14	287.26
Dīkstāves laiks min	52.73	0	0
Novirze min	0	52.65	42.56
Mašīnlaiks min	0	286.28	237.84

8. eksperimentu sērijas dati

Kritērijs	Oriģinālais	IA	GA
Mērķa funkcija	0.50409	0.0477	0.0439
Sadursmes varbūtība	0.95004	0.00019	0.00029
Laiks slēgtā stāvoklī min	623	307.7	292.02
Dīkstāves laiks min	52.73	0	0
Novirze min	0	46.91	42.67
Mašīnlaiks min	0	273.74	255.15

Tab. 43. Imūnā algoritma saraksta vērtības 2.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.05708	0.00166
Sadursmes varbūtība	8.42 E-005	6.34 E-006
Laiks aizvērtā stāvoklī min	342.01	8.97
Dīkstāves laiks min	0.03	0
Saraksta nobīde min	30.04	0.30
Mašīnlaiks min	235.90	5.38

Tab. 44. Imūnā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 2.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāma vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0561 ; 0.0581)	0.5279	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0001 ; 0.0001)	0.9463	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(336.6178 ; 347.4044)	621.87	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0.0345 ; 0.0377)	89.15	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 45. Ģenētiskā algoritma saraksta vērtības 2.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.04951	0.00117
Sadursmes varbūtība	0.00011	8.61 E-006
Laiks aizvērtā stāvoklī min	315.15	7.87
Dīkstāves laiks min	0.07	0.005
Saraksta nobīde min	24.40	0.26
Mašīnlaiks min	201.93	7.92

Tab. 46. Ģenētiskā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 2.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0488 ; 0.0502)	0.5279	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0001 ; 0.0001)	0.9463	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(310.4198 ; 319.8853)	621.87	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0.0717 ; 0.0784)	89.15	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 47. Imūnā algoritma saraksta vērtības 3.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.06354	0.00069
Sadursmes varbūtība	7.64 E-005	5.71 E-006
Laiks aizvērtā stāvoklī min	319.28	3.78
Dīkstāves laiks min	0.01	0.001
Saraksta nobīde min	48.52	0.11
Mašīnlaiks min	282.50	1.00

Tab. 48. Imūnā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 3.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0631 ; 0.064)	0.5279	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0001 ; 0.0001)	0.9463	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(317.012 ; 321.5579)	621.87	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0.0166 ; 0.0181)	89.15	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 49. Ģenētiskā algoritma saraksta vērtības 3.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.05709	0.00125
Sadursmes varbūtība	7.56 E-005	5.65 E-006
Laiks aizvērtā stāvoklī min	303.29	4.83
Dīkstāves laiks min	0.03	0.002
Saraksta nobīde min	41.68	0.79
Mašīnlaiks min	226.82	28.71

Tab. 50. Ģenētiskā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 3.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0563 ; 0.0579)	0.5279	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0001 ; 0.0001)	0.9463	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(300.3907 ; 306.1943)	621.87	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0.0345 ; 0.0377)	89.15	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 51. Imūnā algoritma saraksta vērtības 4.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.05990	0.00150
Sadursmes varbūtība	0.00014	1.06 E-005
Laiks aizvērtā stāvoklī min	313.19	9.98
Dīkstāves laiks min	0	0
Saraksta nobīde min	43.76	0.28
Mašīnlaiks min	265.94	7.32

Tab. 52. Imūnā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 4.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.059 ; 0.0608)	0.5279	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0001 ; 0.0001)	0.9463	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(307.1992 ; 319.1926)	621.87	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0 ; 0)	89.15	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 53. Ģenētiskā algoritma saraksta vērtības 4.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.05406	0.00012
Sadursmes varbūtība	7.80 E-005	5.83 E-006
Laiks aizvērtā stāvoklī min	294.29	1.46
Dīkstāves laiks min	0	0
Saraksta nobīde min	38.96	0.22
Mašīnlaiks min	247.96	6.72

Tab. 54. Ģenētiskā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 4.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.054 ; 0.0541)	0.5279	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0001 ; 0.0001)	0.9463	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(293.4156 ; 295.1751)	621.87	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0 ; 0)	89.15	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 55. Imūnā algoritma saraksta vērtības 5.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.04496	0.00144
Sadursmes varbūtība	0.00024	1.58 E-005
Laiks aizvērtā stāvoklī min	315.94	7.00
Dīkstāves laiks min	0	0
Saraksta nobīde min	31.96	0.96
Mašīnlaiks min	249.14	6.04

Tab. 56. Imūnā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 5.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0441 ; 0.0458)	0.5041	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0002 ; 0.0003)	0.95	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(311.7368 ; 320.1464)	623	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0 ; 0)	52.73	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 57. Ģenētiskā algoritma saraksta vērtības 5.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.04556	0.00146
Sadursmes varbūtība	0.00133	9.91678 E-005
Laiks aizvērtā stāvoklī min	324.96	7.67
Dīkstāves laiks min	0	0
Saraksta nobīde min	27.12	0.53
Mašīnlaiks min	189.98	19.73

Tab. 58. Ģenētiskā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 5.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0447 ; 0.0464)	0.5041	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0013 ; 0.0014)	0.95	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(320.3597 ; 329.5799)	623	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0 ; 0)	52.7352	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 59. Imūnā algoritma saraksta vērtības 6.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.04749	0.00169
Sadursmes varbūtība	0.00034	2.34 E-005
Laiks aizvērtā stāvoklī min	333.72	8.32
Dīkstāves laiks min	0	0
Saraksta nobīde min	30.23	1.06
Mašīnlaiks min	237.87	12.19

Tab. 60. Imūnā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 6.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0465 ; 0.0485)	0.5041	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0003 ; 0.0004)	0.95	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(328.7243 ; 338.7309)	623	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0 ; 0)	52.73	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 61. Ģenētiskā algoritma saraksta vērtības 6.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.04243	0.00101
Sadursmes varbūtība	0.00049	1.16 E-005
Laiks aizvērtā stāvoklī min	312.03	6.48
Dīkstāves laiks min	0	0
Saraksta nobīde min	24.84	0.23
Mašīnlaiks min	219.17	1.10

Tab. 62. Ģenētiskā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 6.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0418 ; 0.043)	0.5041	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0005 ; 0.0005)	0.95	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(308.1374 ; 315.9265)	623	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0 ; 0)	52.73	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 63. Imūnā algoritma saraksta vērtības 7.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.04988	0.00082
Sadursmes varbūtība	0.00015	1.17 E-005
Laiks aizvērtā stāvoklī min	311.14	4.20
Dīkstāves laiks min	0	0
Saraksta nobīde min	52.65	0.47
Mašīnlaiks min	286.28	2.59

Tab. 64. Imūnā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 7.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0494 ; 0.0504)	0.5041	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0002 ; 0.0002)	0.95	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(308.619 ; 313.6701)	623	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0 ; 0)	52.73	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 65. Ģenētiskā algoritma saraksta vērtības 7.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.04312	0.00099
Sadursmes varbūtība	0.00022	1.65 E-005
Laiks aizvērtā stāvoklī min	287.26	4.85
Dīkstāves laiks min	0	0
Saraksta nobīde min	42.56	0.64
Mašīnlaiks min	237.84	18.24

Tab. 66. Ģenētiskā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 7.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0425 ; 0.0437)	0.5041	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0002 ; 0.0002)	0.95	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(284.3515 ; 290.1865)	623	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0 ; 0)	52.73	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

8. sērija. Imūnais algoritms

Tab. 67. Imūnā algoritma saraksta vērtības 8.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.04772	0.00074
Sadursmes varbūtība	0.00019	1.44 E-005
Laiks aizvērtā stāvoklī min	307.70	5.07
Dīkstāves laiks min	0	0
Saraksta nobīde min	46.91	0.38
Mašīnlaiks min	273.74	4.72

Tab. 68. Imūnā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 8.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0473 ; 0.0482)	0.5041	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0002 ; 0.0002)	0.95	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(304.6543 ; 310.7461)	623	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0 ; 0)	52.73	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Tab. 69. Ģenētiskā algoritma saraksta vērtības 8.eksperimentu sērija

Kritērijs	Vidējā vērtība	Standartnovirze
Mērķa funkcija	0.04397	0.00064
Sadursmes varbūtība	0.00028	2.15 E-005
Laiks aizvērtā stāvoklī min	292.02	5.21
Dīkstāves laiks min	0	0
Saraksta nobīde min	42.67	0.84
Mašīnlaiks min	255.15	13.59

Tab. 70. Ģenētiskā algoritma statistikas Z-testa vērtējums 8.eksperimentu sērija

Kritērijs	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
Mērķa funkcija	99.90%	(0.0436 ; 0.0444)	0.5041	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Sadursmes varbūtība	99.90%	(0.0003 ; 0.0003)	0.95	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Laiks aizvērtā stāvoklī	99.90%	(288.8966 ; 295.1589)	623	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
Dīkstāves laiks	99.90%	(0 ; 0)	52.73	H0 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%