

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

**Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts
Industriālās elektronikas un elektrotehnoloģiju katedra**

Andrejs Mors-Jaroslavcevs

Elektrotehnoloģiju datorvadības doktora studiju programma

Intelektuālā elektrotransporta vadības sistēmu modelēšana ar imūnajiem algoritmiem

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs:

Dr. Sc. ing., profesors

A. Ļevčenkovs

Rīga – 2013

UDK 656.2:004.89(043.2)
Mo 650 i

Mors-Jaroslavcevs A. Intelektuālā elektrotransporta vadības sistēmu modelēšana ar imūnajiem algoritmiem. Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU, 2013.-32 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU EEF Industriālās elektronikas un elektrotehnoloģiju katedras 2013. gada 31. jūlija lēmumu, protokols Nr. 72.



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

ISBN 978-9934-10-499-2

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.gada „_” . _____ Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un Elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, ___ auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.hab.sc.ing. Imants Matīss
Latvijas Zinātņu akadēmija

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

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

APSTIPRINĀJUMS

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

A. Mors-Jaroslavcevs (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, piecas nodaļas, secinājumus, izmantotās literatūras sarakstu, divus pielikumus, 54 attēlus, tabulas, kopā 169 lappuses. Literatūras sarakstā ir norādes uz 71 literatūras avotu.

Saturs

TĒMAS AKTUALITĀTE	5
DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI.....	5
DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE	5
GALVENIE REZULTĀTI.....	6
DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS	6
PĒTĪJUMU LĪDZEKĻI UN METODES.....	6
DARBA APROBĀCIJA	6
AUTORA PUBLIKĀCIJAS	7
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA	8
1. UZDEVUMA NOSTĀDNE	8
2. LITERATŪRAS APSKATS.....	11
3. IEBŪVĒTĀS SISTĒMAS UN ALGORITMU IZSTRĀDE	14
4. LABORATORIJAS EKSPERIMENTI AR IMŪNAJIEM ALGORITMIEM ..	16
5. EKSPERIMENTS AR IEBŪVĒTAJĀM IEKĀRTĀM	23
PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	28
LITERATŪRA.....	29

TĒMAS AKTUALITĀTE

Mūsdienās cilvēcisks faktors spēlē nozīmīgu lomu transporta vadības sistēmā, tai skaitā dzelzceļa transportā ar elektrisko piedziņu un elektriskās signalizācijas sistēmās dzelzceļa pārbrauktuvēs. Dažos gadījumos esošās drošības sistēmas ir spējīgas novērst negadījumus. Negadījumi pārbrauktuvēs notiek visā pasaulē. Jebkurā valstī, kur ir dzelzceļš, ir notikuši satiksmes negadījumi ar nāves gadījumiem vai ievainotajiem, līdz ar to dzelzceļa drošības paaugstināšana ir aktuāla tēma tautsaimniecībā.

Mākslīgas imūnās sistēmas (MIS) ir modernas metodes, kuras balstās uz bioloģiskās imūnās sistēmas pamatprincipiem, un kuras orientētas uz sistēmas iekšējo aizsardzību. Šīs metodes ir realizējamas ar elektrotehnoloģiju datorvadības līdzekļiem — programmējamām iebūvētajām iekārtām, un ļaus novērst negadījumus dzelzceļā, samazinot cilvēciskā faktora ietekmi. Mākslīgai imūnajai sistēmai jāizstrādā speciāli algoritmi, lai savlaicīgi brīdinātu cilvēkus par bīstamo situāciju, piedāvāt situācijas izlabošanas risinājumus un automātiski apturēt kustības procesu, lai novērstu sadursmi.

DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Darba mērķis ir izstrādāt vadības algoritmu intelektuālai ritošā sastāva drošības vadības sistēmai ar iebūvētajām iekārtām, kura ļautu novērst elektriskā dzelzceļa transporta sadursmes ar citiem objektiem.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti sekojošie uzdevumi:

- Klasificēt un salīdzināt mākslīgā intelekta sistēmas un evolucionāros algoritmus;
- Izpētīt mākslīgo imūno sistēmu iespējas un darbības principus;
- Definēt apskatāmos iespējamus traucējumus elektriskā dzelzceļa transporta kustības laikā;
- Izstrādāt intelektuālās ritošā sastāva drošības vadības sistēmas uzbūves struktūru un darbības algoritmu;
- Izstrādāt imūnos algoritmus izpildei uz datora un uz controlleriem;
- Izvēlēties darba uzdevumiem atbilstošus controlleru papildu moduļus un datu devējus;
- Realizēt datu plūsmu starp controlleriem un vadības centra datoriem, kā arī šīs plūsmas ierakstīšanu datu bāzē;
- Salīdzināt piedāvājamo iebūvēto iekārtu ieviešanas un ekspluatācijas izmaksas;
- Veikt eksperimentus laboratorijā un reālos apstākļos;
- Analizēt eksperimentu rezultātus.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

- Izstrādāts dzelzceļa transporta vadīšanas modelis ar imūno algoritmu izmantošanu sadursmju novēršanai;
- Izstrādāta intelektuālās ritošā sastāva drošības vadības sistēmas uzbūves struktūra un darbības algoritms;
- Izstrādāts imūnais algoritms dzelzceļa transporta drošības daudzkritēriju uzdevuma risināšanai;
- Izstrādāts dzelzceļa transporta sistēmas funkcionālās mijiedarbības modelis, kurš apraksta transporta atsevišķo elementu mijiedarbību un ļauj modelēt transporta sistēmas raksturojošos procesus, tai skaitā arī elektromehānisko procesu intelektuālo vadību.

GALVENIE REZULTĀTI

- Izstrādātas metodes un līdzekļi dzelzceļa transporta sadursmju ar citiem objektiem novēršanai;
- Izstrādāti lokomotīves, kā arī luksoforu un pārbrauktuves releju skapju iebūvēto iekārtu prototipi un to programmas transporta drošības intelektuālajai vadībai, izmantojot datus par transporta līdzekļu pozīciju un ātrumu un vadības releju stāvokli;
- Eksperimentos pārbaudīta algoritmu un iekārtu darbība laboratorijā un reālajos apstākļos;
- Aprakstītas datora un kontrolleru programmas un kontrolleru pieslēgšana pie dzelzceļa objektiem.

DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS

Promocijas darbā izstrādātie algoritmi un piedāvātā dzelzceļa transporta drošības vadības sistēmas uzbūve var tikt pielietotas dzelzceļa transporta vienību drošības vadības uzlabošanai. Pielietojot izstrādātos algoritmus, ir iespējams novērst sadursmes starp dzelzceļa transportu un citiem objektiem, kā arī novērst aizliedzošo signālu neievērošanas sekas.

PĒTĪJUMU LĪDZEKĻI UN METODES

Sistēmas elementu aprakstā tiek pielietota kopu teorija, sistēmas un procesu analīze, evolucionāro algoritmu teorija, mākslīgās imūnās sistēmas; modelēšanas rezultātu novērtēšanai — statistiskās analīzes metodes. Kontrolera un modeļa izstrādē tika izmantoti programmējamie mikrokontrolleri un objektorientēta programmēšana.

DARBA APROBĀCIJA

1. 50. RTU Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 14.-15. oktobris, 2009. Referāts
2. 8th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering“, Pērnavā, Igaunija, 11.-16. janvāris, 2010. Referāts
3. RTU „Inovāciju un jauno tehnoloģiju konference“, Rīga, Latvija, 2010. g. 24. septembrī. Stenda referāts
4. RTU 51. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 2010. g. 14. oktobrī. 2 referāti
5. „Transport Systems Telematics 2010“, Katowice, Polija, 2010.g. 19.–24. oktobrī.
6. „VDE Congress 2010: E-Mobility“, Leipciga, Vācija, 2010. g. 8.–9. novembrī. Stenda referāts
7. „2010 Second Global Congress on Intelligent Systems“, Vuhana, Ķīna, 2010. g. 13.–19. decembrī. Referāts un sekcijas vadīšana
8. „10th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering“, Pērnavā, Igaunija, 2011. g. 10.–15. janvārī. Referāts
9. „Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS) 2011“, Lietuva, Panevezys, 2011. g. 5. maijā. Referāts
10. 52. RTU Starptautiskā zinātniskā konference, Latvija, Rīga, 2011. g. 14. oktobrī. 2 referāti
11. Transport Means 2011, Kauņa, Lietuva, 2011. g. 20. oktobrī. 2 referāti

12. TELFOR 2011, Belgrada, Serbija, 2011. g. 22–24. novembrī. Referāts
13. RTU Inovāciju un jauno tehnoloģiju konference, Rīga, Latvija, 2012. g. 3. aprīlī. Stenda referāts
14. ITELMS 2012, Paņeveža, Lietuva, 2012. g. 4. maijā. Referāts
15. International Symposium of Electrical Engineering, Ronīši, Latvija, 2012. g. 25. maijā. Referāts
16. 25th European Conference on Operational Research, Viļņa, Lietuva, 2012. g. 8.–11. jūlijā. Referāts
17. 53. RTU Starptautiskā zinātniskā konference, Latvija, Rīga, 2012. g. 10. oktobrī. Referāts
18. ITELMS 2013, Paņeveža, Lietuva, 2013. g. 23. maijā. Referāts

AUTORA PUBLIKĀCIJAS

1. Mors-Jaroslavcevs A. Electric Engine Diagnostics Using Artificial Immune Systems // 50. RTU Starptautiskās zinātniskās konferences materiāli, Latvija, Rīga, 14.–15. oktobris, 2009
2. Mors-Jaroslavcevs A., Ļevčenkova A. Modeling of Artificial Immune Systems for Railway Electric Transport Control // Proceedings of 8th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering“, Igaunija, Pärnu, 11.–16. janvāris, 2010
3. Mors-Jaroslavcevs A., Ļevčenkova A. Immune negative selection algorithm for railway electric vehicle fault detection system // 51. RTU Starptautiskās zinātniskās konferences materiāli, Latvija, Rīga, 14.–15. oktobris, 2010.
4. Mors-Jaroslavcevs A., Ļevčenkova A., Ribickis L. Modeling of hybrid railway electric vehicle safety control system using artificial immune systems // Proceedings of VDE Congress 2010, Vācija, Leipzig, 8.–9. novembris, 2010.
5. Mors-Jaroslavcevs A., Ļevčenkova A., Ribickis L. Structure of automated railway electric vehicle safety control system // Proceedings of GCIS 2010, Ķīna, Wuhan, 16.–17. decembris, 2010.
6. A. Mor-Yaroslavtsev, A. Levchenkov. Modeling the integration of expert systems into railway electric transport safety control. 10th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering“, Pärnu, Estonia, 10.–15. janvāris, 2011
7. Mors-Jaroslavcevs A., Ļevčenkova A. Combining immune algorithms for an intelligent rolling stock safety system // 52. RTU Starptautiskās zinātniskās konferences materiāli, Latvija, Rīga, 14. oktobris, 2011
8. Mors-Jaroslavcevs A., Ļevčenkova A. Railway electric vehicle diagnostics with an algorithm for self-nonsel discrimination in artificial immune systems // Proceedings of Transport Means 2011, Kauņa, Lietuva, 20. oktobris, 2011
9. Mors-Jaroslavcevs A., Ļevčenkova A. Intelligent Embedded Rolling Stock Safety Devices Using an Immune Clonal Selection Algorithm // Proceedings of Transport Means 2011, Kauņa, Lietuva, 20. oktobris, 2011
10. Mor-Yaroslavtsev A., Levchenkov A. Rolling Stock Location Data Analysis Using an Immune Algorithm on an Intelligent Embedded Device // Proceedings of TELFOR 2011, Belgrade, Serbia, 22–24. novembris, 2011
11. Levchenkov A., Gorobetz M., Mor-Yaroslavtsev A. Evolutionary Algorithms in Embedded Intelligent Devices Using Satellite Navigation for Railway Transport// Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway, Xavier Perpinya (Ed.), ISBN: 978-953-51-0448-3, InTech, 2012

12. Mor-Yaroslavtsev A., Levchenkov A. Self-learning algorithms for an embedded device using location data on a rolling stock // Proceedings of ITELMS 2012, Panevėžys, Lithuania, 4. maijs, 2012
13. Potapovs A., Mor-Yaroslavtsev A., Levchenkov A., Gorobetz M. Smooth Braking of Train Using Adaptive Control Algorithms on Embedded Devices // 53. RTU Starptautiskās zinātniskās konferences materiāli, Latvija, Rīga, 10. oktobris, 2012.

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA

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

Promocijas darba pirmajā nodaļā formulēta uzdevuma nostādne, analizēts esošais dzelzceļa elektrot transports, izveidots sistēmas matemātiskais modelis, definēti iespējamie traucējumi tā kustībā.

Promocijas darba otrajā nodaļā apskatīti un izanalizēti literatūrā pazīstamie evolucionārie algoritmi, tai skaitā ģenētiskie algoritmi, imūnie algoritmi un neironu tīkli. Nodaļā arī aprakstītas zināmas iebūvētās iekārtas un pozicionēšanas iekārtas.

Promocijas darba trešajā nodaļā aprakstīti izstrādātie algoritmi dzelzceļa transporta un autotransporta sadursmju novēršanai, definēta daudzkritēriju optimizācijas mērķa funkcija, kā arī imūno algoritmu realizācijas iespējas uz iebūvētajām iekārtām.

Promocijas darba ceturtajā nodaļā aprakstīti autora veiktie datoreksperimenti ar evolucionārajiem algoritmiem, veikta statistiskā hipotēžu pārbaude, salīdzinātas trīs mākslīga intelekta metodes sadursmes novēršanas uzdevuma risināšanai un pierādīta imūno algoritmu efektivitāte.

Promocijas darba piektajā nodaļā aprakstīti eksperimenti ar izstrādātajiem iekārtu prototipiem, analizēti un novērtēti eksperimentu rezultāti.

1. UZDEVUMA NOSTĀDNE

Ceļa laikā ritošā sastāva mašīnists var sastapties ar nevēlamām situācijām un ar nepieciešamību pieņemt lēmumus, kā tās risināt. Situācijas var būt, piemēram, šādas:

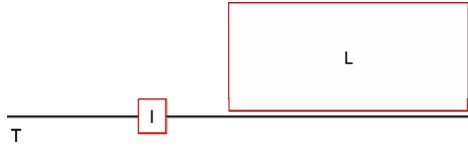
- 25 sekundes pirms vilciena ierašanās uz pārbrauktuves uz tās joprojām atrodas pēdējā mašīna no plūsmas; drošības noteikumi paredz pārbrauktuves pilnīgu atbrīvošanu 35 sekundes pirms vilciena ierašanās;
- Gājējs šķērso sliežu ceļu pilsētās zonā;
- Starp sliedēm guļ samērā liels, bet zems un kustībai nedraudošs koka gabals; u.c.

Katrai no šīm situācijām atbilst citāda reakcija vai bezdarbība. Mašīnistam varbūt būs jāpiebremzē, ekstrēmi jābremzē, jāpaātrinās, vai jāturpina vienmērīgu kustību, un jebkurā gadījumā jāziņo par situāciju vadības centram un citiem mašīnistiem.

Vēlamā rezultāta kritēriji:

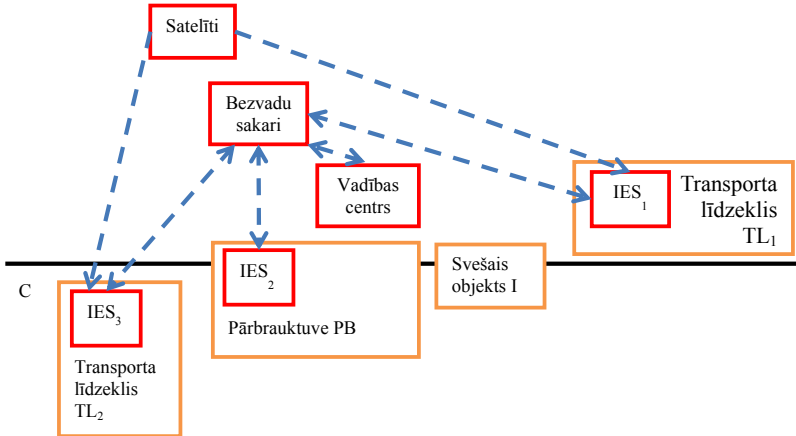
- Nav upuru;
- Ritošais sastāvs minimāli novirzās no saraksta.

Šādas situācijas piemērs ir uz 1.1. att., kur L ir lokomotīve un I ir nepiederošais objekts uz sliedēm.



1.1. att. Nevēlamās situācijas piemērs ar svešo objektu uz sliedēm

Autors piedāvā intelektuālo ritošā sastāva drošības vadības sistēmas funkcionālās uzbūves shēmu (1.2. att.).



1.2. att. Ritošā sastāva drošības vadības sistēmas funkcionālās uzbūves shēma

Transporta līdzeklī L un pārbrauktuvē PB atrodas iebūvētās iekārtas IES, kuras sastāv no bezvadu sakaru ierīcēm M, pozīcijas uztvērējiem G, datu apstrādes moduļiem AIS, imūno detektoru datubāzēm DBD un vadības elementu datubāzēm DBC [autora publikācija 10].

Svešo objektu I uztver sensori S un dati tiek pārraidīti uz tuvāko sakaru staciju CT, kura nodod signālu tālāk uz vadības centru CC un tuvāko lokomotīvu bezvadu sakaru ierīcēm M. Ar tādas pašas ierīces palīdzību lokomotīve L saņem datus par tuvāko ritošo sastāvu pozīciju un stāvokli, ceļa sekcijas profilu un maksimālo atļauto ātrumu.

Pozīcijas uztvērējs G uz L saņem signālus no satelītiem ST un nodod datus apstrādes modulim AIS, kurš sadarbojas ar imūno detektoru datu bāzi DBD un vadības elementu datu bāzi DBC. Atkarībā no vadības elementu evolūcijas rezultāta modulis pieņem lēmumu un izpilda to, nosūtot vadības signālu vai signalizējot mašīnistam.

Apskatāmā sistēma tiek ierobežota ar diviem transporta līdzekļiem un infrastruktūras objektu (luksofors, pārbrauktuve) [autora publikācija 12].

Ar $U \in \mathcal{R}$ apzīmēsim problēmas lauku, kurš ietver visas iespējamās parametru lielumu kopas (“situācijas”),

P — drošo situāciju kopa,

$S(t)$ — tekošā situācija, kura mainās ar laiku t ,

$D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ — detektoru kopa, kura ir pirmatnējās apmācības procedūras rezultāts,

$C = \{C_{D1(t)}, C_{D1(2)}, \dots, C_{D1(p)}, C_{D2(t)}, \dots, C_{Dn(p)}\}$ — saistīto ar detektoriem vadības elementu kopa,

$E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ — sastapto situāciju kopa,

$W = \{W_{EID1}, W_{EID2}, \dots, W_{EIDn}, W_{E2D1}, \dots, W_{EmDn}\}$ — detektoru svaru kopa dažādās situācijās.

Attālums starp diviem punktiem uz zemeslodes:

$$d = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\text{lat}_A - \text{lat}_B}{2} \right) + \cos(\text{lat}_A) \times \cos(\text{lat}_B) \times \sin^2 \left(\frac{\text{lon}_A - \text{lon}_B}{2} \right)} \right) \quad (1.1)$$

$IES = \{\text{ies}_1, \text{ies}_2, \dots, \text{ies}_n\}$, $\text{ies}_1, \dots \in TL$, $\text{ies}_2 \in PB$

Iebūvēto sistēmu darbības īpatnības:

- Darbs reālā laikā $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$
 - Izmēru samazināšana $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$; $v_i = x_i \times y_i \times z_i$; $V^* — \min V$
 - Agra prototipu testēšana $T_{\text{test1}} < T_{\text{test2}}$
 - Enerģijas patēriņa samazināšana $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$; $E^* — \min E$
 - Izmaksu samazināšana $IZ = \{iz_1, iz_2, \dots, iz_n\}$; $IZ^* — \min IZ$
 - Saskaņotība un datu ievade
 - Jaudas un atmiņas ierobežojumi $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$; $P^* — \min P$; $AT = \{at_1, at_2, \dots, at_n\}$; $AT^* — \min AT$
 - Programmatūras–aparātūras duālisms
-
- A_n — izvēlētais algoritms;
 - $T_{A_n} \rightarrow \min$ — algoritma izpildes laiks;
 - $Pr_{A_n} \rightarrow \min$ — algoritma darbības rezultātā nenovērsto sadursmju daļa;
 - $E_{A_n} \rightarrow \min$ — algoritma izpildes laikā patērētās enerģijas lielums;
 - $V_B = (x_B \times y_B \times z_B) \rightarrow \min$ — iekārtas dimensijas;
 - $ST_B \rightarrow \min$ — iekārtas darbības traucējumi;
 - $IP_B \rightarrow \min$ — iekārtas ieviešanas un izmantošanas izmaksas.
-
- Hipotēze — imūnais algoritms izpildīsies visātrāk, novēršot tikpat daudz vai vairāk sadursmes, kā citi, un patērējot vismazāk enerģijas.

Mērķa funkcija: $F(T_{A_n}, Pr_{A_n}, E_{A_n}, V_B, ST_B, IP_B) \rightarrow \min$

Autora piedāvātais intelektuālās ritošā sastāva drošības vadības sistēmas darbības algoritms [autora publikācija 7]:

1. aizpildīt detektoru datubāzi DBD ar inicializācijas datiem D ar negatīvās selekcijas algoritma apmācības procedūras palīdzību [autora publikācija 3];
2. reālā laikā izpildīt imūnā negatīvās selekcijas algoritma detekcijas procedūru;
3. atrast iespējamās situācijas identifikatorus (visvairāk aktivizētos detektorus);
4. nozīmēt katram identifikatoram svaru, balstoties uz tā „attālumu” līdz situācijai;
5. izvēlēties no vadības elementu datubāzes DBC detektoriem atbilstošo elementu kopu C [autora publikācija 9];
6. veikt C kopas evolūciju ar imūnā klonālā algoritma palīdzību [autora publikācija 9];
7. izpildīt atrasto optimālo risinājumu;
8. ziņot par situāciju un risinājumu vadības centram CC;
9. turpināt no 2. soļa.

Viens no veidiem, kā realizēt šādu drošības vadības sistēmu, ir līdzīgi hibrīdai iebrukumu atklāšanas sistēmai, divās fāzēs — anomālijas esamības fakta noteikšana un tās tipa noteikšana priekš tālākās secinājumu veikšanas. Apskatāmajā sistēmā antigēni ir

ienākošie no sensoriem dati, piemēram, ātrums, paātrinājums, spriegums, rotācijas frekvence, darba temperatūra u.c.

2. LITERATŪRAS APSKATS

Mākslīgās imūnās sistēmas (MIS) izmanto evolucionāro datu apstrādes paradigmu, kuras pamatā ir bioloģiskās IS. Tās atšķiras no skaitļojamās imunoloģijas, kura modelē bioloģiskās IS [autora publikācija 2].

Imūnie algoritmi galvenokārt tiek izmantoti anomāliju atpazīšanai, datu vākšanai un analizēšanai. No skaitļošanas skatpunkta IS interesantākās īpašības ir pašapmācības spēja, dažādības uzturēšana un imūnā atmiņa.

Problēma tiek atveidota kā antigēns un risinājuma kandidāti kā antiķermeņi, kuri ir nejauši izveidoti no pieejamo risinājumu vai gēnu bibliotēkas. Afinitātes jeb antigēna un antiķermeņa piesaistīšanās pakāpes novērtējums ir līdzīgs komplementaritātei bioloģiskajās IS un nosaka katra individuāla antiķermeņa likteni, kā arī visa algoritma izbeigšanu.

Individuālie antiķermeņi tiek aizvietoti, klonēti un mainīti līdz ir sasniegta apmierinoša afinitātes pakāpe. Risinājumu populācijas daļējā aizvietošana ar jaunajiem nejauši izveidotajiem kandidātiem uztur dažādību, kura ļauj risināt plašāku uzdevumu klāstu. Kandidāta klonēšanas vai mainīšanas varbūtība ir atkarīga no tā afinitātes.

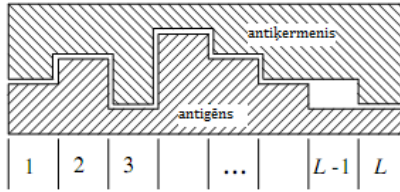
Būtiskākās imūno algoritmu īpatnības ir:

- Dažādības uzturēšana;
- Atmiņa par iepriekšējiem lēmumiem;
- Pirms tam nezināmu, bet līdzīgo elementu atpazīšana;
- Mērogojamība;
- Trokšņu noraidīšana;
- Klasificēšanas iespējas.

Kā tika minēts, MIS var izmantot dažādos datu analizēšanas uzdevumos. Piemēram, ceļojošā komivojažiera uzdevumā katru apmeklējamo pilsētu var apzīmēt kā antigēnu un to kopa iteratīvi tiek kombinēta ar antiķermeņu tīklu, simulējot antigēnu iebrukšanu organismā, braucot caur pilsētām nejaušā kārtībā.

Tīklu iebrukumu atklāšana ir saistīta ar neautorizētu pieeju datorsistēmām, pieslēgtām pie tīkliem un uzdevumu risina, izmantojot anomāliju vai nepareizas izmantošanas šablonu atklāšanu. Anomāliju atpazīšanas sistēmas uzbūvē normālas sistēmas darbības modeli un tad uzskata novirzes no šī modeļa par potenciāliem iebrukumiem, bet nepareizas lietošanas atklāšanas sistēmas meklē zināmo iebrukumu iebrukumus pēc to signatūru sakrītības. Anomāliju noteikšanas sistēmu galvenā priekšrocība ir iespēja atklāt jaunu uzbrukumu šablonus, priekš kuriem vēl nav izveidota signatūra, bet galvenais trūkums ir samērā liels aplami pozitīvo signālu lielums. Šāda pieeja ir tuva imūnajai, un ieviešot atmiņu, šādas sistēmas varētu arī sniegt informāciju par uzbrukuma sekām un iespējamām nākamajām darbībām, nevis tikai ziņot par iebrukumu.

MIS ir modelētas pēc bioloģiskajām IS un tajās arī tiek izmantoti termini “antigēni” un “antiķermeņi”. Tos var modelēt, izmantojot formas-telpas koncepciju (1.3. att.). Forma-telpa S ļauj kvantitatīvi definēt antigēnus, receptorus un to mijiedarbību [autora publikācija 1].



2.3. att. Antigēna un antiķermeņa formas-telpas modelis.

Līdzīgi hromosomām evolucionārajos algoritmos, elementa formu nosaka simbolu virkne m , kurā ir tā koordinātas:

$$m = \{m_1, m_2, \dots, m_L\} \in S^L \quad (2.1),$$

Kur S ir parasti definēts reālo skaitļu laukā — $S^L \in L$. Atkarībā no risināmā uzdevuma to var definēt arī uz veselo vai bināro skaitļu kopas — $m \in Z^L$ vai $m \in \{0, 1\}^L$.

Antigēna-antiķermeņa pāra afinitāte ir saistīta ar attālumu starp tiem formā-telpā S un to var novērtēt, izmantojot jebkuru attāluma mēru starp divām atribūtu virknēm. Piemēram, attālumu starp antigēnu Ag un antiķermeni Ab var definēt, izmantojot Minkovska kopējo attāluma mērījumu klasi:

$$D_M(Ag, Ab) = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^L |Ag_i - Ab_i|^p} \quad (2.2).$$

Mainot parametra p lielumu, var iegūt piemērotu attāluma mērījumu.

Negatīvā selekcija ir paradigma, kura apraksta T-limfocītu evolūciju, kurā tie ir nejauši ģenerēti un tiek apmācīti visu elementu atpazīšanai, izņemot „saimnieka” specifiskās “savējās” struktūras. Negatīvās selekcijas algoritmiem vajag mācību piemērus tikai no vienas klases (savējie jeb normālie), tāpēc tie ir īpaši piemēroti tādu uzdevumu risināšanai, kā jaunumu, anomāliju vai izmaiņu atklāšana, t.sk. arī dzinējos un citās iekārtās.

Vispārējais algoritms:

1. Laukā U definēt kopu S , kuru vajadzēs kontrolēt, un zināmo „savējo” elementu kopu P . Kopa U atbilst visiem iespējamajiem sistēmas stāvokļiem, P — normālajiem stāvokļiem un S — tekošajam stāvoklim, kurš mainās laika gaitā.
2. Izveidot kandidātu detektoru kopu $Ca = \{ca_1, ca_2, \dots, ca_n\}$.
3. Salīdzināt katru kandidātu ca_i ar zināmo elementu kopu P .
4. Ja atbilstība nav atrasta, saglabāt kandidātu gatavo detektoru kopā D . Citādi to ir jāatmet, vai, maksimizējot svešo lielumu lauka pārklājumu ar minimālo detektoru skaitu, virzīt sakrītošo kandidātu prom no tuvākā elementa p_i , tad saglabāt to D .
5. Kontrolēt izmaiņas S , nepārtraukti salīdzinot ar to kopas D elementiem. Ja atrasta sakrītība ar kādu no detektoriem, notikušī izmaiņa visdrīzāk ir bīstama, jo D kopja izveidota tā, lai tās elementi nesakrīt ar pieļaujamiem sistēmas stāvokļiem.

Šī algoritma rezultāts ir detektoru kopa, kura var atpazīt svešos šablonus. Darbības pēc atpazīšanas var būt dažādas, atkarībā no pētāmās problēmas. Piemēram, gadījumā ar transporta drošības vadības sistēmu atkarībā no atrastās situācijas tās varētu būt trauksmes vai avārijas apstāšanās signāla padošana.

Detektorus un notvertos bīstamos apstākļus saglabā imūnajā atmiņā tālākai apstrādei un izziņām par iebrukuma sekām un iespējamām darbībām.

Klonālās selekcijas algoritms [autora publikācija 6]:

1. Izveidot risinājumu kandidātu populāciju P .
2. Noteikt n visvairāk stimulētos indivīdus.
3. Klonēt izvēlētos elementus. Klonu skaits ir augošā funkcija no stimulācijas pakāpes.
4. Nosūtīt klonus variācijas shēmai.
5. Iekļaut uzlabotos klonus populācijā P .
6. Veikt apspiešanu, atmetot no populācijas vismazāk stimulētos elementus.
7. Pievienot jaunus nejauši izveidotus kandidātus, ieviešot dažādību.
8. Atkārtot no otrā soļa, līdz ir sasniegts izbeigšanas noteikums.

Parasti klonēšana ir proporcionāla un variācija otrādi proporcionāla katra kandidāta afinitātei, bet ir arī šī algoritma versija, kura ir tuvāka ģenētiskajam algoritmam [21] un variācijas līmenis ir neatkarīgs un nejaušs.

Saistībā ar promocijas darba tēmu tika apskatīti promocijas darbu kopsavilkumi. Tajos tiek norādīts, ka:

- Gan Latvijas, gan Krievijas dzelzceļa problēma ir novecojušais parks, kurš ir ierindā no 1960.–70. gadiem un tika projektēts ar zemām ražošanas un augstām ekspluatācijas izmaksām.
- Jaunos vibrācijas u.c. datu devējus var montēt standarta temperatūras devēju vietā.
- Dīzeļlokomotīves darbību būtiski ietekmē tās gāzes-gaisa trakta tehniskais stāvoklis.
- Aprēķinot dīzeļlokomotīves darba procesa parametrus, var izmantot Griņevecka–Mazinga, Vtbes un mazo noviržu metodes.
- Tīrgū pastāv tādas borta diagnostikas sistēmas, kā DIANA (Vācija), TORNAD (Francija), ACES un BHP Iron ORE OCCT (Austrālija).
- Tīrgū pastāv ekspertu sistēmas, kuras tiek izmantotas tehniskajā diagnostikā. Piemērs: DELTA (General Electric lokomotīvēs) un SOPHIE (elektrisko ķēžu diagnostika un apmācība)
- Lai noteiktu elektrovilciena visvairāk limitējošos elementus, tiek izmantotas šādas pazīmes:
 - Atteikumu statistika;
 - Remonta vai maiņas darba ietilpīgums;
 - Nozīmīguma svāra koeficients.
- Elektrodzinēja ieskriešanās laiks arī ir diagnostiskā pazīme, kura ļauj atklāt tādas defektus, kā rotora disbalanss.

Diagnostikas objektu stāvokļu veidi:

- Nebojāts — sistēma atbilst visām izvirzītām prasībām, fiksētām normatīvajā dokumentācijā, un visi tās parametri ir noteiktas normas robežās.
- Bojāts — viens vai vairāki sistēmas parametri ir ārpus normas. Šāda sistēma var būt darbspējīga.
- Darbspējīgs — sistēmas pamata parametri iekļaujas normā un tā pareizi izpilda uzdotās funkcijas. Šāda sistēma var būt bojāta.
- Nedarbspējīgs — viens vai vairāki sistēmas pamata parametri ir ārpus normas. Darbspējas zaudēšanu sauc par atteikumu.

Pilna DO iespējamo stāvokļu kopa:

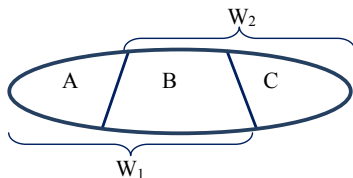
$$W = A \cup B \cup C \quad (2.3)$$

kur A — nebojātu sistēmas stāvokļu kopa; B — bojātu, bet darbspējīgu sistēmas stāvokļu kopa; C — nedarbspējīgu sistēmas stāvokļu kopa.

Darbspējīgu un bojātu sistēmas stāvokļu kopas (5. att.):

$$W_1 = A \cup B, W_2 = B \cup C$$

(2.4).



2.4. att. DO stāvokļu diagramma.

Dzelzceļa automātikas, telemehānikas un sakaru (DzATS) sistēmās pamata parametri ir spriegums, strāva, frekvence, ķēdes pretestība, jauda u.c. DzATS sistēmu uzbūvē svarīgākais uzdevums ir kontrolējamo sistēmu sintēze ar paaugstinātu drošības līmeni. To uzbūve ir saistīta ar liela stāvokļu $S_i \in B$ skaita ieviešanu, pie tam tā tiek veikta tādā veidā, lai visos iespējamākos elementu atteikumu (daļējo atteikumu) gadījumos nebūtu iespējama sistēmas pāreja no A uz C , bet tā paliktu kopā B . Šādā gadījumā sistēma turpina pildīt savas pamata funkcijas, bet rodas iespēja fiksēt un novērst bojājumu.

3. IEBŪVĒTĀS SISTĒMAS UN ALGORITMU IZSTRĀDE

Lokomotīves apstādināšanai ir jāpieslēdzas pie elektropneimatiskā vārsta (EPV) caur iekārtā iebūvējamo releju. Pārtraujot savienojumu, notiek EPV iedarbināšana. Pirmās 6 sekundes tas strādā signalizācijas režīmā un tad ieslēdzas avārijas bremsēšana. Iebūvētās iekārtas barošana notiek no lokomotīves iekšējā līdzstrāvas 12V avota (akumulatorbaterijas). Pieslēguma shēmas ir pielikumos.

Signālu nolasīšana no pārbrauktuves un luksoforu releju skapjiem notiek, pievienojoties pie attiecīgajiem relejiem un pārbaudot spriegumu tajos. Iebūvētās iekārtas barošana notiek no skapjos esošā maiņstrāvas 220V avota caur barošanas adapteri. Pieslēguma shēmas ir pielikumos.

Abos gadījumos barošanai jānodrošina 5–12V / 2A līdzstrāvas avots.

Lai varētu nodrošināt sadursmju novēršanu ar ceļa transporta līdzekļiem, iebūvētajām iekārtām jābūt uzstādītām arī uz tiem, vai arī, kas būtu universālāks risinājums, jāizstrādā iekārtas, kuras atpazīs nepiederošos objektus uz dzelzceļa sliedēm.

Lokomotīves iekārtas aiztures laiks kopš bīstamas situācijas noteikšanas ir 0 s, bet jāņem vērā, ka vēl 7 s paiet, kamēr lokomotīves EPV veic skaņas signālu un iedarbina avārijas bremsēšanu.

Iekārtu ieviešanas izmaksas sastāda to uzbūves un montāžas darbs, savukārt ekspluatācijas izmaksas sastāda enerģijas un datu patēriņš.

Izstrādāts satelītu globālas pozicionēšanas sistēmas (GPS) datu apstrādes algoritms ar iebūvēto iekārtu. Algoritms sastāv no šādiem soļiem:

Inicializēšana. Iekļaut NewSoftwareSerial bibliotēku. Iekļaut TinyGPS bibliotēku. Definēt GPS seriālo portu un tā kontaktus. Palaist seriālo datu apmaiņu ar GPS moduli. Palaist seriālo datu apmaiņu ar datoru caur USB portu.

1. solis. Uzgaidīt 2 sekundes un izvadīt „Data”

2. solis. Ja iegūti jauni dati no GPS pāriet uz 3. soli, citādi pāriet uz 4. soli.

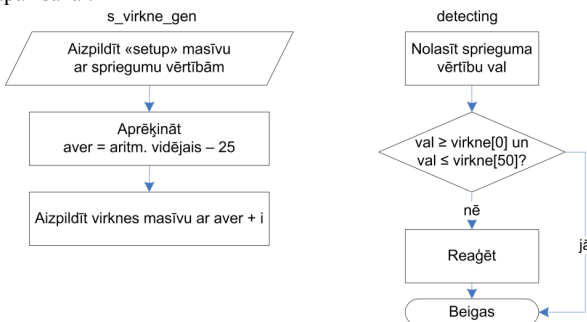
3. solis. Izvadīt „OK”.

4. solis. Palaist GPSdump procedūru GPS datu dekodēšanai un pāriet uz 1. soli.

Darbā izstrādāti un aprakstīti divas palīgprocedūras — GPSdump datu dekodēšanai un feedGPS jauno GPS datu saņemšanai.

Pieslēdzot iekārtu pie datora ir iespējams uzturēt datubāzi un attiecīgo datu ierakstīšanas algoritmu. Šim nolūkam ir nepieciešams MySQL datubāzes serveris un PHP valodas interpretētājs. Saskaņā ar iepriekšrakstīto algoritmu datu bāzē jābūt 7 informācijas laukiem, kas savstarpēji atdalīti ar komatu un pirms tam slēdziens, vai dati ir uzticami („OK”) vai nepareizi („Bad”). Datubāzē dati tiek ierakstīti tikai tad, ja tie ir uzticami un saskaņā ar paredzēto algoritmu satur visas septiņas informācijas vienības.

Eksperimenta kārtā tika realizēts imūnais algoritms vienkāršākā veidā apkārtējās vides stāvokļa maiņas atpazīšanai.



3.1. att. Imūnā algoritma divu funkciju blokshēmas

Dotais prototips reaģē uz apgaismojuma un temperatūras izmaiņām.

Sadaļā piedāvāts arī algoritms neironu tīklam [20], kuru var izmantot, ka vienu no imūnās sistēmas instrumentiem, situācijas uzlabošanai uz pārbrauktuves un transporta kustības optimizēšanai.

Tā kā šajā gadījumā nav zināms vai aprēķinātās neironu tīkla izejas ir pareizas, šādu neironu tīklu nevar apmācīt ar kļūdas apgriezta izplatīšanas algoritmu.

Neironu tīkla apmācībai izstrādāts nejausā secīgā delta likuma pašapmācības algoritms ar mērķa funkciju.

Optimizācijas mērķis definēts kā funkcija ar diviem kritērijiem: vilciena un autobusa sadursmes varbūtība P ar minimizēšanas mērķi un vilciena ātruma izmaiņas $\Sigma\Delta v_i$ ar minimizēšanas mērķi.

Pirmais kritērijs saistīts ar drošību. Situācija uzskatīta par bīstamu, ja autobuss būs uz pārbrauktuves tai pašā laikā, kad tur atrodas vilciens. Ja ir vairāki vilcieni un autobusi, tad tiek izvēlēta maksimālā vērtība no katra i -tā vilciena un katra j -tā autobusa sadursmes varbūtību matricas. Otrais kritērijs saistīts ar vilciena kustības organizācijas specifiku. Vilciena kustības precizitāte labvēlīgi ietekme dzelzceļa darbību, bet vilciena kavēšanās izraisa traucēkļus citiem vilcieniem. Līdz ar to mērķis ir pēc iespējas mazāk mainīt vilciena ātrumu.

Izējot no šiem kritērijiem, situācijas izlabošanas optimizācijas mērķa funkcija F :

$$F(\Delta v) = \begin{cases} P = \max(P_{ij}) \rightarrow \min \\ \sum \Delta v_i \rightarrow \min \end{cases}, \quad (3.1)$$

kur

Δv – transportlīdzekļa ātruma izmaiņas, t.i. risinājums

P – maksimālā sadursmes varbūtība,

P_{ij} – katra i -tā vilciena sadursmes varbūtība ar j -to vilcieni,

Δv_i – i -tā vilciena ātruma izmaiņas.

Izstrādātais algoritms sastāv no šādiem soļiem:
Inicilizācija:

- apmācības kopas elementa indekss $e = 1$,
- izvēlētais neirons korekcijai $s_n = 1$,
- izvēlētais svars korekcijai $s_w = 1$
- pārāpmācīt = false

1. solis. Paņemt elementu $e = \{d_1^e, v_1^e, d_2^e, v_2^e\}$ no apmācības kopas
2. solis. Nolasīt x_{\min} un x_{\max} parametrus, kuri ierobežo neirona tikla izejas
3. solis. Ar tiešo izplatīšanos aprēķināt izejas neironu summatora vērtības:

$$\Sigma_j = \left(\sum_{i=1}^{2n} x_i \cdot w_{ij} \right) + b_j \quad j = \overline{1..n} \quad (3.2)$$

4. solis. Ģenerēt izejas slāņa neirona izejas vērtību pēc pozitīvi un negatīvi piesātinātas lineārās aktivācijas funkcijas:

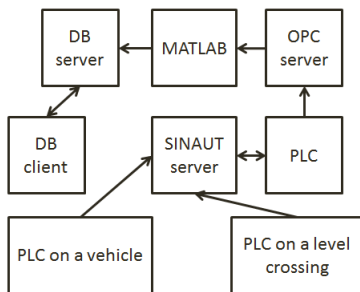
$$\Delta v_j = \begin{cases} x_{\min}, & \Sigma_j \leq x_{\min} \\ \Sigma_j, & x_{\min} < \Sigma_j < x_{\max} \\ x_{\max}, & \Sigma_j \geq x_{\max} \end{cases} \quad (3.3)$$

5. solis. Saglabāt iepriekšējo vērtējumu, ja tāds bija $P^{iep}, \Sigma \Delta v_i^{iep}$.
6. solis. Novērtēt atrasto risinājumu ar mērķa funkciju 3.1. $[P, \Sigma \Delta v] = F(\Delta v)$.
7. solis. Ja $P > P^{lim}$ vai $\Sigma \Delta v_i > \Sigma \Delta v_i^{lim}$, tad pāriet uz 8. soli.
8. solis. Ja nav sasniegts pēdējais apmācības kopas elements $e \neq e_{max}$,
 tad $e = e + 1$ un pāriet uz 1. soli,
 citādi ja nav jāpārmāca neironu tīkls, tad BEIGAS,
 citādi $e = 1$ un pāriet uz 1. soli.
9. solis. Svaru korekcija notiek secīgi.
 Ja ($s_n \neq 1$ un $s_w \neq 1$) vai ($P^{iep} < P$ un $\Sigma \Delta v_i^{iep} < \Sigma \Delta v_i$), t.i. ja tas nav pirmais elements un kļuva sliktāk, nekā bija iepriekš, tad atgriezties pie iepriekšēja šī svara vērtības $w_{sw, sn} = w_{sw, sn} - k$ un izvēlēties citu svaru
 ja $s_w > 2n$, tad $s_n = s_n + 1$, citādi $s_w = s_w + 1$; ja $s_n > n$, tad $s_n = 1, s_w = 1$.
10. solis. Korekcijas vērtība tiek ģenerēta, kā gadījumā skaitlis:
 $k = \text{random}(-1000, 1000) / 10000$.
11. solis. Veic svara korekciju: $w_{sw, sn} = w_{sw, sn} - k$
12. solis. Ja tika veikta svara korekcija, tad jāpārāpmāca viss neironu tīkls. pārāpmācīt = true
13. solis. Pāriet uz 3. soli.

Arī tiek piedāvāts modificēts algoritms vilciena apstāšanai pirms pārbrauktuves, uz kuras stāv automašīna. Tas ir nepieciešams, lai apturētu vilcienu ārkārtas situācijās gadījumā, kad cita uzlabošana nav iespējama.

4. LABORATORIJAS EKSPERIMENTI AR IMŪNAJIEM ALGORITMIEM

Datu kopa tika ievākta no diviem controlleriem, kas bija pievienoti transporta līdzeklim un pārbrauktuvei . Datu ievākšanas shēma ir 4.1. att. [autora publikācija 11].



4.1. att. Datu ievākšanas shēma

Komunikācija starp kontrolleriem notika ar GPRS moduļu palīdzību un serveri, kas strādāja uz datora. Caur programmatūras līdzekļu rindu dati tika nogādāti datubāzē. Šie dati nodrošināja reālu datu kopu apstrādes algoritmu pārbaudei [autora publikācija 13].

Reālskaitļu negatīvās selekcijas (RNS) algoritma pamatā ir imūnās sistēmas svešo elementu diskriminācija (sk. 2.4.2) ar šādiem soļiem:

Definēt visu iespējamo vērtību laukā U tekošo situāciju S — parametru kopu, kuru kuru pastāvīgi būs jāuzrauga. Pirmatnējās apmācības nolūkiem S aizpilda ar normālo jeb drošo situāciju kopām. $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$; $S_i = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$.

Ģenerēt detektoru kopu F , kuras katrs elements nesakrīt ne ar vienu elementu no S . Līdzinoties bioloģiskajai imūnajai sistēmai, varētu katru nederīgo kandidātu, kurš sakrīt ar kādu no S elementiem un uz to reaģēs, vienkārši izmest, bet optimālāka pieeja ir maksimizēt nokļājamo lauku pie minimālā detektoru skaita $F = \{F_1, F_2, \dots, F_k\}$

Visu laiku pārbaudīt S , vai tajā neradās drošību apdraudošas izmaiņas, salīdzinot to ar F detektoriem. Ja nostrādā kāds no detektoriem, tad ir skaidrs, ka notikusi izmaiņa, jo detektori speciāli ir izveidoti tādā veidā, lai nereaģētu uz zināmām drošām situācijām.

Šajā algoritmā detektoru kandidātu populācija evolūcionē iteratīvajā procesā. Mainīgie — katra detektora centrs un rādiuss, kurš nosaka detektora izmēru m -dimensiju laukā — no sākuma tiek izvēlēti nejauši.

Katrā iterācijā katrs detektors tiek izvērtēts, vai tas nesakrīt ar „savējiem” elementiem vai ar citiem detektoriem. Ja tas ir noticis, tad do to kandidātu bīda prom no šiem elementiem, izmainot centra koordinātas. Tad detektorus sarindo pēc to izmēriem (rādiusiem) — tie, kuri ir lielāki un mazāk pārklājas ar citiem detektoriem, tiek uzskatīti par labākajiem un izvēlēti nākamajai paaudzei. Vissliktākie pēc šiem kritērijiem tiek aizstāti ar labāko elementu kloniem. Klonus pārvieto uz fiksētu attālumu, lai tie nepārklājas ar oriģinālu. Vēl pēc tam tiek ieviesti daži jauni nejaušie detektori, lai varētu labāk pārklāt svešo parametru kopu vērtības.

Detektoru ģenerācijas process tiek apstādināts, kad evolūcionējušu (minimāli pārklājušos) detektoru kopa izaug līdz pietiekamai lauka noseģšanas pakāpei.

Detektoru definē kā $d = (c, r_d)$, kur $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ ir punkts m -dimensiju laukā, kas atbilst hipersfēras centram ar rādiusu r_d . Tiek izmantoti arī sekojoši parametri:

- r_s : “savējā” punkta variācijas sliekšnis;
- α : detektora kustība prom no “savējā” parauga vai citiem esošajiem detektoriem;
- ζ : maksimāli iespējamā detektoru savstarpējā pārklāšanās — tās atļaušana nodrošina nenokļātu laukumu minimizāciju.

Detektora kustība notiek šādi:

$$c^{jauns} = c + \alpha \frac{c - c^{tuv}}{\|c - c^{tuv}\|}, \quad (4.1)$$

kur c^{tuv} ir tuvākais kandidāts un $\| \cdot \|$ apzīmē m -dimensiju vektora normāli.

Klonu pārvietošana:

$$c^{klons} = c + r \frac{c - c^{tuv}}{\|c - c^{tuv}\|} . \quad (4.2)$$

Detektora pārklāšanās ar citiem:

$$W(d) = \sum_{d \neq d'} w(d, d') , \quad (4.3)$$

kur $w(d, d')$ ir divu detektoru $d = (c, r_d)$ un $d' = (c', r_{d'})$ pārklāšanās:

$$w(d, d') = (\exp(\delta) - 1)^m , \quad (4.4)$$

kur m ir apskatāmā lauka dimensiju jeb parametru skaits un δ :

$$\delta = \left(\frac{r_d + r_{d'} - D}{2r_d} \right) , \quad (4.5)$$

kur D ir attālums starp c un c' . δ lielums ir robežās starp 0 un 1.

RNS algoritma datora programmas parametru uzstādīšanas daļa parādīta attēlā 4.2 [autora publikācija 8].

Settings

Pad detectors from space min/max values

Record data into database

Maximum self-element variation:

Maximum detector overlap:

Dimensions (sensors):

Maximum detector population:

Maximum detector radius:

Number of tests:

Next generation after tests

Number of top detectors to clone:

Detector sorting field:

Problem space

Dimension	Minimum	Maximum
1. Train speed, km/h	0	100
2. Crossing car speed, km/h	0	150
3. Railway slope, %	-20	20
4. Road slope, %	-20	20
5. Distance from the train to the rendezvous, m	-100	1000
6. Distance from the car to the rendezvous, m	-10	1000
7. Air temperature, °C	-50	60
8. Relative humidity, %	0	100

Self elements

1.	0	5	0	0	1000	0	20	50	x
2.	50	30	0	0	900	100	20	50	x
3.	20	30	0	0	600	100	20	50	x
4.	0	5	5	0	1000	0	20	50	x
5.	40	25	5	0	900	100	20	50	x
6.	20	30	5	0	600	100	20	50	x
7.	0	5	-5	0	1000	0	20	50	x
8.	60	35	-5	0	900	100	20	50	x
9.	20	30	-5	0	600	100	20	50	x

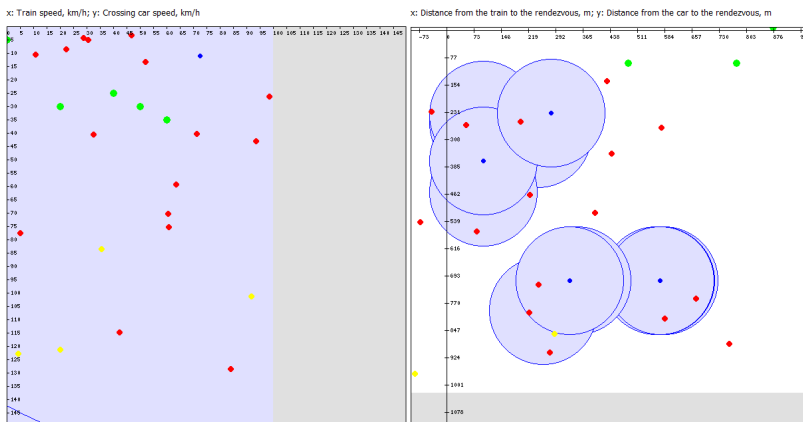
4.2. att. RNS algoritma datora programmas parametru uzstādīšanas daļa

Tests

#	Antigen	Result	Generation #	Detector #
1	[98.72, 26.37, 7.92, -13.67, 508.15, 512.51, -36.32, 47.57]	Alarm!	1	17
2	[46.94, 3.47, -2.07, -0.7, 153.35, 270.08, 49.57, 7.8]	Alarm!	1	11
3	[84, 128.61, -8.83, 6.11, 691.17, 277.47, -9.93, 98.54]	Alarm!	1	15
4	[93.67, 43.21, 11.44, -1.8, 57.42, 234.12, -49.12, 67.16]	Alarm!	1	11
5	[30.57, 5.21, -15.37, -19.56, 353.4, 710.79, -2.5, 2.27]	Alarm!	1	14
6	[10.87, 10.65, -19.86, 7.32, 304.03, 260.37, 1.09, 96.94]	Alarm!	1	11
7	[5.11, 77.52, 1.9, -7.67, 25.99, 537.38, -33.56, 16.44]	Alarm!	2	14
8	[63.64, 59.49, 8.22, 2.81, 181.57, 564.33, -3.25, 93.42]	Alarm!	2	14
9	[42.31, 114.83, -4.73, -0.78, 701.87, 804.13, 47.73, 48.11]	Alarm!	2	15
10	[52.22, 13.48, -3.01, 17.42, 788.05, 748.83, -20.12, 53.37]	Alarm!	2	15
11	[28.85, 4.42, 3.1, 14.4, 383.7, 897.68, 9.28, 49.83]	Alarm!	2	2
12	[4.44, 122.8, -9.2, -1.42, 396.72, 845.59, -12.04, 58.54]	OK	3	0

4.3. att. Pārbaudes fragments ar antigēnu paraugkopu ar detekcijas rezultātiem

Detekcijas procesa laikā evolucionējušie detektori nepārtraukti tiek salīdzināti ar jaunajiem ienākošajiem testa datu paraugiem [autora publikācijas 3, 4]. Attālums D starp paraugu $p = (c_p, r_s)$ un detektoru $d = (c_d, r_d)$ tiek aprēķināts tādā pašā veidā, kā detektoru ražošanas fāzē, ar Minkovska metodes palīdzību. Ja $D < (r_s + r_d)$, tad detektors d aktivizējas un norāda uz iespējamo bīstamo situāciju.



4.4. att. Definīcijas lauka U noklāšana ar detektoriem dažādu parametru pāru divdimensiju griezumos. Zaļie punkti — drošas situācijas, zilie apli — detektori, sarkanie punkti — atklātās bīstamās situācijas, dzeltenie punkti — nebīstamās situācijas

Algoritma izpilde 8-dimensiju laukā uzrādīja labu lauka noklāšanu ar detektoriem un stabili „svešo” antigēnu atpazīšanu [autora publikācija 5]. Tabula 4.3. att. — ceturtajai paudzei. 4.4. att. parāda zināmos drošos elementus (zaļie punkti), antigēnus (sarkanie punkti), nebīstamos antigēnus (dzeltenie punkti) un detektorus (zilie apli ar punktiem centrā) projekcijās uz diviem dažādiem parametru pāriem. Algoritms izpildās visai ātri, laikam palielinoties līdz ar parametru, detektoru vai testu skaita palielināšanos; jebkurā gadījumā visvairāk laika aizņem visu darba datu ierakstīšana jau pēc algoritma izpildīšanas. Izvēlētais

vadības darbības neatšķirās, jo to ir jāveic optimizācijas algoritmam. Algoritmu ir iespējams pielāgot izpildei uz daudzprocesoru sistēmām, kas varētu būtiski uzlabot tā ātrumu.

Sadaļā aprakstīts arī imūnā klonālās selekcijas un ģenētiskā algoritmu eksperiments.

Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt vai imūnie optimizācijas algoritmi spēj uzlabot situāciju un novērst vilciena sadursmi ar autotransportu, vai imūnais algoritms strādā labāk par ģenētisko algoritmu un cik ātri imūnais algoritms var piedāvāt situācijas uzlabošanas risinājumu.

Imūna algoritma salīdzināšanai ar ģenētisko algoritmu [autora publikācija 11, 4] tika modelēta sistēma, kura sastāv no pārbrauktuves, vilciena un autobusa.

Eksperimentā laikā tiek mainīti transporta objektu parametri: vilciena attālums līdz pārbrauktuvei, vilciena vidējais kustības ātrums, autobusa attālums līdz pārbrauktuvei, autobusa vidējais kustības ātrums.

Algoritmiem izmantota optimizācijas mērķa funkcija 3.1.

Lai pārbaudītu algoritmu efektivitāti ar dažādiem parametriem katram algoritma izvēlēti tādi parametri, kuri ir līdzīgi imūnajos un ģenētiskajos algoritmos [32].

Tika ielānotas divas eksperimentu grupas, katrā grupā 10 eksperimenti. Katrā eksperimentā atšķiras modeļa sākuma parametri, bet tie ir vienādi katra algoritmā i-tā eksperimentā. Pirmā eksperimentu grupā pārbrauktuves sistēma situācijas izlabošanai var tikai piebremzēt transportlīdzekli samazinot tā vidējo ātrumu ne vairāk par 10 km/h. Līdz ar to maksimālās ātruma izmaiņas ir nulle, bet minimālās ātruma izmaiņas ir -10. Otrā eksperimentu grupā situācijas uzlabošanai ir atļauts gan palielināt ātrumu uz 5 km/h gan arī samazināt ātrumu uz 15 km/h.

Tā kā evolūcijas algoritmi var dot dažādus risinājumus pie vieniem un tiem pašiem parametriem, tad katram eksperimentam tika veikti 6 mēģinājumi. Statistikas iegūšanai kopumā tika veikti 240 eksperimenti.

Eksperimenta rezultātu statistiskā analīze tika izvirzītās šādas hipotēzes:

H01: Imūnais algoritms var izlabot bīstamo situāciju pārbrauktuvē.

H02: Ģenētiskais algoritms var izlabot bīstamo situāciju pārbrauktuvē

H03: Neironu tīkls var izlabot bīstamo situāciju pārbrauktuvē

Kopsavilkumā piedāvātas rezultējošas salīdzinājuma tabulas. Pilnas tabulas atrodamas promocijas darbā.

Lai statistiski pārbaudītu izvirzītās hipotēzes [5] par imūnā un ģenētiskā algoritma spējām uzlabot situāciju pie pārbrauktuves, tika veikta statistiskā z-testa pārbaude [4, 32]. Tiek definēts ticamības līmenis, pie kurā atrasts testa intervāls. Pārbaudāma vērtība iegūta no sākuma situācijas vērtējumā. Šajās tabulas salīdzināta tikai sadursmes varbūtība kā galvenais parametrs avārijas novēršanai. Visos eksperimentos imūnais algoritms uzrāda uzlaboto rezultātu (tabula 4.1.) un pierāda, ka abas izvirzītās hipotēzes nevar būt noraidītas ar varbūtību 0.999 (tabulas 4.1. un 4.2.). Tas nozīmē, ka imūnais algoritms var izlabot un novērst bīstamo situāciju uz pārbrauktuves. Arī ģenētiskais algoritms atrod uzlabotos risinājumus.

4.1. tabula.

Imūnā algoritma hipotēžu pārbaudes rezultātu fragments pēc sadursmes varbūtības kritērija

Eks. Nr.	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
1	99.90%	(0.0017; 0.00166)	0.62601	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
2	99.90%	(0.0017; 0.0017)	0.5768	H01 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

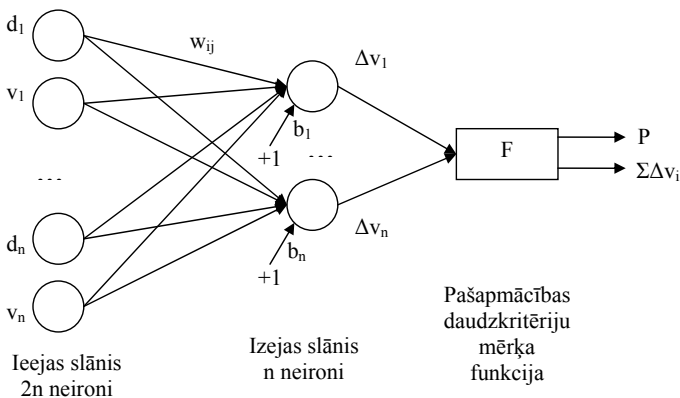
Genētiskā algoritma pārbaudes rezultātu fragments pēc sadursmes varbūtības kritērija

Eks. Nr.	Ticamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
1	99.90%	(-0.0293; 0.26966)	0.62601	H02 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
2	99.90%	(0.0025; 0.02232)	0.5768	H02 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

Eksperimentam ar neironu tīkla apmācību [20] arī tika izmantota sadaļā definētā mērķa funkcija (3.1.), bet atšķirībā no evolucionāriem algoritmiem, veikta neironu tīkla apmācība pieņemt lēmumu par kustības ātruma izmaiņu, lai novērstu sadursmi starp vilcieniem un autotransportu. Ja kopējais vilcienu un autotransporta līdzekļu skaits ir n , tad neironu tīklam ir pāru ieeju skaits $2n$. Tā kā šis skaits var mainīties atkarībā no transporta vienību skaita, tad arī neironu tīkla ieeju un arī izeju neironu skaits ir dinamisks.

Katru neironu tīkla ieeju pāri veido divi parametri: transporta objekta attālums līdz pārbrauktuvei d_i un objekta vidējais ātrums v_i .

Atbilstoši objektu skaitam, neironu tīklam ir n izejas, kuras rezultātā izvada objektam nepieciešamo ātruma izmaiņu, lai izvairītos no sadursmes. Izejas slāņa neironu ieejām ir svāri w_{ij} , kuri nosaka katra i -tā ieejas slāņa neirona izejas reizinātāju katram j -tam izejas slāņa neironam, un ir nobīdes b_j . Katrs izejas slāņa j -tais neirons ģenerē j -tā transportlīdzekļa ātruma izmaiņu Δv_j . Lai pieņemtu lēmumu par neironu tīkla apmācības nepieciešamību, atrastās $\Delta v_1 \dots \Delta v_n$ vērtības tiek nodotas pašapmācības daudzkritēriju mērķa funkcijai F , kura novērtē izejas efektivitāti pēc sadursmes varbūtības P un vilcienu kopējām ātruma izmaiņām $\Sigma \Delta v_i$. Neironu tīkla struktūra parādīta 4.5. att.



4.5. att. Neironu tīkla struktūra

Apmācības procesā katrs apmācības kopas elements nodots uz neironu tīklu ieejas slāni. Pēc rezultāta — autobusa un vilcienu nepieciešamās ātruma izmaiņas Δv_1 un Δv_2 — atrašanās, šīs vērtības tiek novērtētas ar mērķa funkciju.

Par apmācītu neironu tīklu tiks uzskatīts šāds stāvoklis: katram apmācības kopas elementam atrastās ātruma izmaiņas; samazina sadursmes varbūtību vismaz līdz 0.005 un vilcienu vidējā ātruma izmaiņas ir ne lielākas par 3 km/h.

Statistiski pārbaudīta un pierādīta hipotēze H03, ka neironu tīkli var izlabot bīstamo situāciju pārbrauktuvē (tabula 4.3.).

4.3. tabula.

Neironu tīkla hipotēžu Z-testa pārbaudes rezultātu fragments

Eks . Nr.	Tīcamības līmenis	Testa intervāls	Pārbaudāmā vērtība	Rezultāts
1	99.90%	(0.0001; 0.0007)	0.62601	H03 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%
2	99.90%	(0; 0.00048)	0.5768	H03 nevar būt noraidīta ar varbūtību 99.90%

No veiktajiem eksperimentiem izriet secinājums, ka gan imūnie algoritmi, gan arī ģenētiskais algoritms un neironu tīkls, var uzlabot situāciju pārbrauktuvē.

Imūnā algoritma darbības rezultātu salīdzināšana ar ģenētiskā algoritma darbības rezultātiem un neironu tīkla darbības rezultātiem veikta pēc vidējās vērtības pēc sadursmes varbūtības, algoritma ātrdarbības un atrasto rezultātu stabilitātes kritērijiem.

4.4. tabula.

Imūnā algoritma kritēriju vidējo vērtību salīdzināšana ar ģenētiskā algoritma rezultātiem

Kritērijs	Vidējais imūnā algoritma rezultāts	Vidējais ģenētiskā algoritma rezultāts	Imūnā algoritma salīdzinājums ar ģenētisko
Mērķa funkcija	0.00119	0.00962	708.40%
Sadursmes varbūtība	0.00086	0.00327	280.23%
Vilciena ātruma izmaiņas	0.04167	0.7	1579.87%
Mašīnlaiks	0.35433	0.34762	-1.89%

4.5. tabula.

Imūnā algoritma kritēriju vidējo vērtību salīdzināšana ar neironu tīkla rezultātiem

Kritērijs	Vidējais imūnā algoritma rezultāts	Vidējais neironu tīkla rezultāts	Imūnā algoritma salīdzinājums ar neironu tīklu
Mērķa funkcija	0.00119	0.00263	121.01%
Sadursmes varbūtība	0.00086	0.00088	2.33%
Vilciena ātruma izmaiņas	0.04167	0.15028	260.64%
Mašīnlaiks	0.35433	0.15961	-54.95%

4.6. tabula.

Imūnā algoritma stabilitātes pārbaude salīdzinājumā ar ģenētiskā algoritma rezultātiem

Kritērijs	Imūnā algoritma rezultātu standart-novirze	Ģenētiskā algoritma rezultātu standart-novirze	Imūnā algoritma salīdzinājums ar ģenētisko
Mērķa funkcija	0.00011	0.00088	700.00%
Sadursmes varbūtība	8.00E-05	0.0003	275.00%
Vilciena ātruma izmaiņas	0.00382	0.06417	1579.84%
Mašīnlaiks	0.01604	0.01495	-6.80%

Imūnā algoritma stabilitātes pārbaude salīdzinājumā ar neironu tīkla rezultātiem

Kritērijs	Imūnā algoritma rezultātu standartnovirze	Neirona tīkla standartnovirze	Imūnā algoritma salīdzinājums ar neironu tīklu
Mērķa funkcija	0.00011	0.00024	118.18%
Sadursmes varbūtība	8.00E-05	8.00E-05	0.00%
Vilciena ātruma izmaiņas	0.00382	0.01378	260.73%
Mašīnlaiks	0.01604	0.00634	-60.47%

Salīdzinot vidējās vērtības tabulās 4.4. un 4.5., var redzēt, kā vislabāko rezultātu pēc sadursmes varbūtības kritērija un pēc vilciena ātruma izmaiņas dod imūnais algoritms. Neirona tīkla atrastais rezultāts ir uz 2.33% sliktāks risinājums pēc sadursmes novēršanas kritērija, bet strādā uz 54.95% ātrāk. Analizējot evolucionāro algoritmu darbības stabilitāti no tabulām 4.6. un 4.7., var secināt, kā imūno algoritmu atrastajiem risinājumiem ir mazākā standartnovirze un atrastie rezultāti ir stabilāki. Neironu tīkls uzrāda imūnajam algoritmam līdzīgo stabilitāti pēc sadursmes varbūtības kritērija. Bet pēc patērētā mašīnlaika imūnais algoritms zaudē gan ģenētiskajam algoritmam uz 6.80%, gan neironu tīklam uz 60.47%. Līdz ar to imūnajam algoritmam ir lielāka patērētā laika izkliede.

5. EKSPERIMENTS AR IEBŪVĒTAJĀM IEKĀRTĀM

Eksperimentu ar iebūvētajām iekārtām reālajos apstākļos mērķis ir pārbaudīt un pierādīt, ka promocijas darbā izstrādātie matemātiskie modeļi, metodes un algoritmi ir darba spējīgi, un tehniski pielietojami reāliem objektiem.

Šim nolūkam sadarbībā ar VAS „Latvijas Dzelzceļš” tika izvēlētas trīs pārbrauktuves Rīgā, kā arī stacija Bolderāja un dzelzceļa iecirknis Lāčupe–Bolderāja.

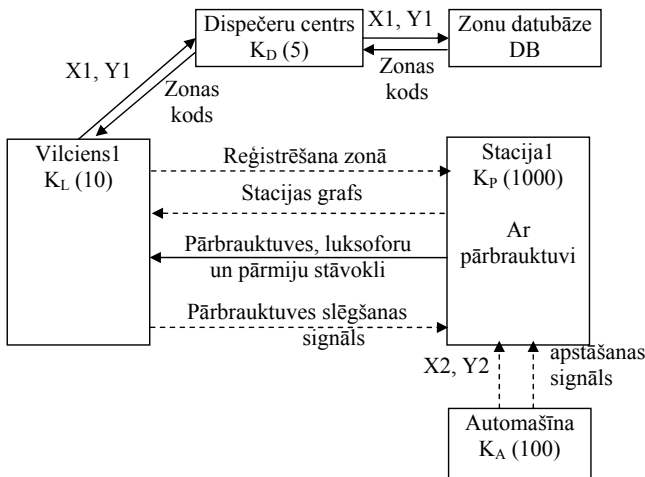
Eksperimentos tika pārbaudīti: trīs mikrokontrolleru tipi — Siemens Simatic PLC S7-200, Arduino Uno/Mega, un Waspnote; divas komunikācijas iespējas — mobilie sakari GSM/GPRS un atsevišķs radio sakaru kanāls; algoritmu spēja novērst avārijas situācijas uz pārbrauktuvēm, un iekārtu un funkciju ātrdarbība reālajos apstākļos

Autors piedāvā papildināt eksistējošo reālo dzelzceļa sistēmu sistēmu ar šādām iebūvētām iekārtām: satelīta navigācijas uztvērēji pārbrauktuvēm S_p , lokomotīvēm S_L (GPS, GALILEO, EGNOS, LATPOS) un autotransportam S_A , bezvadu signālu pārraides antenas pārbrauktuvēm A_p , lokomotīvēm A_L , autotransporta A_A un dispečeru centra A_D (GSM vai radio kanāls), iekārta pārbrauktuves aizņemtības signāla pārbaudei K_p , iekārta bremžu sistēmas vadībai lokomotīvē K_L , autotransporta iekārta par pārbrauktuves aizņemtību K_A , dispečeru centra iekārta K_D , dispečeru centra zonu datu bāze DB.

5.1. att. parādīta iekārtu apmaiņas datu struktūra. Blakus iekārtas nosaukumam iekavās dots iekārtas unikāls identifikācijas kods (koda vērtība dota kā piemērs). Ar treknām nepārtrauktām līnijām parādīts nepārtraukts pastāvīgs datu apmaiņas process, bet ar pārtrauktām līnijām apzīmēts vienreizējas datu apmaiņas process:

1. Dispečeru centrā ir kopēja dzelzceļa zonu datu bāze DB, kur katra pārbrauktuve jeb stacija atrodas savā zonā. Zonas nekrustojās sava starpā.
2. Vilciena iekārta K_L (10) nepārtraukti sūta lokomotīves atrašanās vietas ģeogrāfiskos platumu X_1 un garumu Y_1 dispečeru centra iekārtai K_D (5);
3. Dispečeru centra iekārta K_D nepārtraukti salīdzina vilciena koordinātes ar zonu datu bāzi DB un, ja vilciens atrodas datu bāzē esošā zonā, tad atgriež zonas identifikācijas numuru (piemēram, ID numurs 1000), un K_D nodod šo kodu vilciena iekārtai K_L .

4. Kad vilciena iekārta K_L (10) nepārtraukti saņem no dispečera centra zonas kodu (piemēram, ID numurs 1000), tā savienojās ar stacijas jeb pārbrauktuves iekārta K_P (1000) un vienreizēji reģistrējas tajā;
5. Kad jauns vilciens reģistrējas zonā stacijas jeb pārbrauktuves iekārta K_P vienreizēji nosūta pierēģistrētam vilcienam (piemēram, ar ID numuru 10) stacijas grafu (stacijas plāns grafā veidā), kas apraksta stacijas mezglu punktus (sliežu ķēžu punktus, pārmijas, luksoforus, pārbrauktuves), to ģeogrāfiskās koordinātes un esošus sliežu ceļus starp šiem punktiem.
6. Stacijas iekārta K_P nepārtraukti sūta vilcienam kontrolējamo mezglu stāvokļus (pārbrauktuves, luksoforu un pārmiju).
7. Vilciena iekārta K_L ņemot vērā kustības parametrus izrēķina faktisko pārbrauktuves drošo izvēšanas laika momentu un sūta signālu par to stacijas jeb pārbrauktuves iekārtai K_P .
8. Automašīnas iekārta K_A atrodies pārbrauktuves zonā un apstājoties tajā nosūta apstāšanās signālu un savas koordinātes X_2 un Y_2 pārbrauktuves iekārtai K_P ;
10. Iekārta K_P pārbauda automašīnas koordinātes un, ja tā atrodas uz pārbrauktuves, ģenerē aizņemības signālu vilciena iekārtai K_L ;
11. Vilciena iekārta K_L , izmantojot bremsēšanas vadības algoritmu iedarbina ritošā sastāva bremsēšanu.



5.1. att. Apmaiņas datu apraksts

Lai atpazītu bīstamas situācijas, tika veikts eksperiments ar detektoru ģenerēšanas fāzi ar SIMATIC kontrolleru [autora publikācija 3]. Antīģēna atpazīšanas rezultāti tika attēloti uz ekrāna vai uz LED un tika sūtīts detektoram atbilstošs vadības signāls.

Lai pārbaudītu sistēmu, kura spēj patstāvīgi apmācīties uz mērķa funkcijas pamata tika veikts eksperiments un izveidots sistēmas prototips, kurš balstās uz Waspmote mikrokontrolleriem un izmanto no operatora neatkarīgu radio sakaru kanālu.

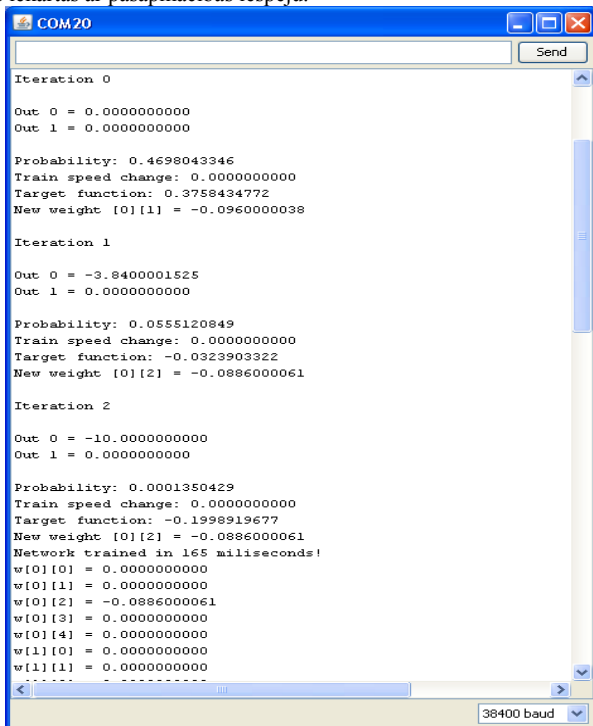
Sistēma spēj novērtēt situāciju un piedāvāt kustības dalībniekiem — vilciena vadītājam vai autotransporta vadītājam — izmainīt ātrumu, lai novērstu bīstamo situāciju.

Eksperimentā definēta šāda situācija: automašīna, tuvojoties pārbrauktuvei, kura aprīkota ar izstrādāto iekārtu, iebrucot radio sakaru kanāla dzirdamības robežās, sāk sūtīt savu ātrumu un attālumu līdz pārbrauktuvei; vilciens, iebrucot radio sakaru kanāla

dzirdamības robežās, sāk sūtīt savu ātrumu un attālumu līdz pārbrauktuvei; pārbrauktuves iekārta, uztverot datus no transportlīdzekļiem, veido imūno sistēmu uz neirona tīkla bāzes, kura apmācīties uz iebūvētās mērķa funkcijas, atrod, cik jāsamazina ātrums, lai vilciena sadursmes varbūtība ar automašīnu būtu minimāla.

Iekārta uztvērta automašīnas atrašanās attālumu — 500 m un vilciena atrašanas attālumu — 1000 m. Vilciena kustības ātrums — 80 km/h, bet automašīnas ātrums ir 40 km/h. Pēc novērtēšanas noteikta sadursmes varbūtība 0.469. Neironu tīkls apmācījās 165 milisekunžu laikā un deva atbildi situācijas izlabošanai līdz varbūtībai 0.00014.

Automašīnas iekārta uztver ziņojumu par ātruma samazināšanas nepieciešamību no pārbrauktuves iekārtas ar pašapmācības iespēju.



```
COM20
Iteration 0
Out 0 = 0.0000000000
Out 1 = 0.0000000000

Probability: 0.4698043346
Train speed change: 0.0000000000
Target function: 0.3758434772
New weight [0][1] = -0.0960000038

Iteration 1
Out 0 = -3.8400001525
Out 1 = 0.0000000000

Probability: 0.0555120849
Train speed change: 0.0000000000
Target function: -0.0323903222
New weight [0][2] = -0.0886000061

Iteration 2
Out 0 = -10.0000000000
Out 1 = 0.0000000000

Probability: 0.0001350429
Train speed change: 0.0000000000
Target function: -0.1998919677
New weight [0][2] = -0.0886000061
Network trained in 165 milliseconds!
w[0][0] = 0.0000000000
w[0][1] = 0.0000000000
w[0][2] = -0.0886000061
w[0][3] = 0.0000000000
w[0][4] = 0.0000000000
w[1][0] = 0.0000000000
w[1][1] = 0.0000000000
.....
38400 baud
```

5.2. att. Sistēmas pašapmācība

Dzelzeļa pārbrauktuvju jaunā bezvadu drošības sistēma sastāv no 4 sastāvdaļām: lokomotīves ierīce, automašīnas ierīce, pārbrauktuves ierīce, centralizācijas ierīce. Piedāvātas sistēmas priekšrocības: strādā paralēli esošai ALS sistēmai un netraucē esošas sistēmas darbībai, paaugstinot vilcienu kustības drošību; iekārta izmanto bezvadu komunikācijas tīklu un var strādāt arī dzelzeļa posmos ar pusautomātisko bloķēšanas sistēmu.

Lokomotīves ierīces pamatfunkcija ir apturēt vilcienu pirms pārbrauktuves, ja uz pārbrauktuves stāv autotransports.

Pārbrauktuves iekārtas pamatfunkcija ir pārbaudīt vai uz pārbrauktuves atrodas stāvošs autotransports un nodot brīdinājuma signālu vilcienam, kas tuvojas pārbrauktuvei .

Automašīnas ierīces funkcijas ir noteikt automašīnas atrašanas vietu, kustības virzienu, ātrumu pielietojot GPS un pārsūtīt šo informāciju centralizācijas ierīcei, izmantojot

bezvadu sakaru (GPRS kanālu vai radio sakaru) kanālu, saņemot no centralizācijas ierīces tuvākās pārbrauktuves identifikatoru, pārsūtīt augšminētos datus arī atbilstoši pārbrauktuves ierīcei, izmantojot bezvadu sakaru kanālu, ja saņemts tuvākās pārbrauktuves identifikators, sūtīt brīdinājumu pārbrauktuves ierīcei, izmantojot bezvadu sakaru kanālu, ja automašīna atrodas pārbrauktuves zonā un tās ātrums ir tuvs 0 km/h.

Centralizācijas ierīces funkcijas ir saņemt lokomotīves atrašanas vietu, kustības virzienu, ātrumu, izmantojot bezvadu sakaru kanālu; saņemt automašīnas atrašanas vietu, kustības virzienu, ātrumu, izmantojot bezvadu sakaru kanālu; atrast lokomotīves kustības virzienā tuvāko pārbrauktuvi un pārsūtīt tās identifikatoru lokomotīves ierīcei, izmantojot bezvadu sakaru kanālu; atrast automašīnas kustības virzienā tuvāko pārbrauktuvi un pārsūtīt tās identifikatoru automašīnas ierīcei, izmantojot bezvadu sakaru kanālu; saglabāt saņemtus datus datu bāzē.



5.3. att. Lokomotīves, pārbrauktuves un automašīnas ierīces

Pārbrauktuves drošības iekārtai tika veikti dažādi izmēģinājumi sadarbībā ar VAS „Latvijas dzelzceļš”:

2011.gada 30. augusta eksperiments uz Jāņavārti–Zemitāni 2,37 km Vietalvas ielas pārbrauktuves divceļu dzelzceļa posma, aprīkotajā ar automātiskās luksoforu signalizācijas ierīcēm un automātiskajām barjerām (bez apsardzes), kurš liecina par to, ka pārbrauktuves iekārtas lokomotīves identifikācijas funkcija darbojas veiksmīgi, bet tika konstatētas signālu nodošanas laika aizkaves no 1 līdz 15 sekundēm, kas jāņem vērā turpmākajos aprēķinos un pārbrauktuves tuvuma zonas definēšanā.

2011. gada 24. novembrī Lāčupe–Ilģuciems 0,94 km pārbrauktuve (Dzirciema iela) veiktais eksperiments pierādīja, ka pārbrauktuves iekārta darbojas veiksmīgi un stabili izpilda visas paredzētās protokolā aprakstītās funkcijas.

2011. gada 2. decembra pārbaude parādīja, ka pārbrauktuves iekārta darbojas veiksmīgi sadarbojoties ar automašīnas ierīci un veic automašīnas identifikāciju un var noteikt stāvošo automašīnu uz pārbrauktuves.

2012. gada 23. martā eksperimentā tika veikti eksperimenti ar lokomotīves ierīci un pārbrauktuves ierīces, kur pirmā tika uzstādīta uz M62 lokomotīves un otrā Bolderājas stacijas releju skapī. Eksperimenta laikā tika nodrošināta komunikācija starp kontrolleriem un datoru notiek caur atvērto IRC protokolu simbolu rindu formātā, dati tika saņemti ar PHP un Matlab programmatūru. Tika secināts, kā nepārtraukti izvadīt visus datus, ja tie nav paši svarīgākie, ir neoptimāli un nepieciešams izstrādāt pozīcijas un ātruma paredzēšanas algoritmu, lai varētu turpināt aprēķinus, ja dati saņemti novēloti

2013. g. 27.–28. februārī notika jaunu dzelzceļa drošības iekārtu prototipu „SAFE-R 8” un „SAFE-R 9” programmatūras reālajos dzelzceļa ekspluatācijas apstākļos iecirknī testēšanas eksperimenti Bolderājas stacijā un Lāčupe-Bolderāja dzelzceļa. SAFE-R 8 prototipi tika uzstādīti gan lokomotīvē gan arī drezīnā, bet SAFE-R 9 prototips stacijas releju skapī.

Tika pārbaudīta iekārtu SAFE-R 8 iespēja saņemt GPS signālu un spēj noteikt lokomotīves un drezīnas atrašanās vietu. Tika pārbaudīta iekārtas SAFE-R 8 iespēja saņemt signālus no vadības releju skapī uzstādītās iekārtas SAFE-R 9, izmantojot radio sakaru kanālu. Tika pārbaudīta korekta datu attēlošana uz SAFE-R 8 displeja — ātrums, bremzēšanas ceļš, avārijas bremzēšanas un informatīvā režīma indikators, ierobežojošie punkti (luksofori) lokomotīves priekšā un aizmugurē, attālumi līdz šiem punktiem un to stāvokļi. Tika pārbaudītā stacijas pilnas informācijas saņemšana no iekārtas SAFE-R 9 pēc SAFE-R 8 iekārtas pieprasījuma. Tika pārbaudīta iekārtas SAFE-R 9 iespēja korekti dublēt luksoforu, pārmiju un sliežu ceļu stāvokļus. Tika pārbaudīts vai iekārta saņem pieprasījumu no lokomotīvē uzstādītās iekārtas SAFE-R 8 caur radio sakaru kanālu un pārsūta pieprasīto informāciju bez datu zaudēšanas.

Eksperimentu laikā lokomotīve izbrauc no stacijas uz ceļa posmu. Veikti vairāki braucieni pa ceļa posmu attālinoties un tuvojoties stacijas ieejas luksoforam ar aizliedzošo signālu. Luksofors pārslēgts uz atļaujošo signālu. Lokomotīve iebruc stacijā un apstājas. Drezīna izbrauc no stacijas uz ceļa posmu. Veikti vairāki drezīnas braucieni pa ceļa posmu attālinoties un tuvojoties stacijas ieejas luksoforam ar aizliedzošo signālu. Pēc braucieniem luksofors pārslēgts uz atļaujošo signālu, drezīna iebruc stacijā un apstājas.

Eksperimentu rezultāti parādīja, ka SAFE-R 8 iekārta var strādāt dažādās kustošās vienībās: lokomotīvē vai drezīnā bez konfigurācijas izmaiņām; SAFE-R 8 un SAFE-R 9 iekārtas neizmanto publisko bezvadu sakaru tīklu un strādā uz sava radio frekvences kanāla, SAFE-R sistēma spēj nodrošināt vilciena drošo apstāšanos pirms luksofora ar aizliedzošu signālu, SAFE-R 8 iekārta spēj noteikt nepieciešamo dienesta bremzēšanas ceļu un avārijas bremzēšanas ceļu, brīdināt vadītāju par bremzēšanas nepieciešamību un automātiski apturēt vilcieni, ja vadītājs nereaģēja vai reaģēja nesavlaicīgi, SAFE-R 9 iekārta ir savietojama ar esošo SCB sistēmu un netraucē esošas sistēmas darbību, SAFE-R 8 iekārta netraucē vilciena esošo drošības sistēmu, uztver esošas SCB sistēmas signālus un attēlo atbilstošu luksoforu rādījumus no SAFE-R 9 iekārtas; Vilcienu SAFE-R 8 ierīces var strādāt tajos ceļa posmos vai stacijās, kas aprīkotas ar lauka SAFE-R 9 ierīcēm. Ceļa posmos, kas nav aprīkoti ar lauka SAFE-R 9 ierīcēm un vilciena SAFE-R 8 ierīces nepielieto automātisko bremzēšanu un strādā informatīvajā režīmā. Aprīkotas zonas robežu nosāka komunikācijas iekārtu datu pārraides spēja. Pārbaudāmā SAFE-R sistēmas konfigurācijā maksimālais datu pārraides attālums definēts ar 12 km robežu ideālos apstākļos. Eksperimenta laikā noteikta stabila nepārtraukta datu apmaiņa starp vilcieni un lauka SAFE-R 9 ierīcēm 2600 m attālumā. Maksimālais datu apmaiņas attālums eksperimenta laikā netiek pārbaudīts testēšanas ceļa posma attāluma ierobežojumu dēļ. Lauka ierīce SAFE-R 9 spēj nolasīt ceļu aizņemtības, pārmiju stāvokļus un luksoforu signālus no esošas SCB sistēmas un spēj nodrošināt šo datu nodošanu, kā arī stacijas ceļu aprakstu un ātruma ierobežojumus vilcieni SAFE-R 8 iekārtām; SAFE-R 8 spēj nodot stacijai vilciena identifikācijas numuru un saņemt stacijas ceļu aprakstu un ātruma ierobežojumus no lauka SAFE-R 9 iekārtām; SAFE-R 8 iekārta var precīzi noteikt ceļu un tam atbilstošu luksoforus un to signālus, neskatoties uz satelīta navigācijas signāla neprecizitāti.

PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

- Evolucionāro algoritmu jēdziens apvieno sevī tādas mākslīgā intelekta sistēmas, kā mākslīgie neironu tīkli, ģenētiskie algoritmi un imūnie algoritmi; tie imitē bioloģisko sistēmu evolūcijas procesus un darbojas ar datiem kā ar «populācijām»;
- Imūno algoritmu svarīgākās īpašības ir pašapmācība, dažādības uzturēšana, atmiņa par pagājušajiem lēmumiem, iepriekš nezināmu, bet saistītu elementu atpazīšana, trokšņu atmešana un klasificēšanas spēja.
- Darbā tiek apskatīti tādi elektriskā dzelzceļa transporta kustības laikā iespējamie traucējumi, kā sadursmes ar citiem transporta līdzekļiem un aizliedzošo signālu neievērošana;
- Tika izstrādāta intelektuālās ritošā sastāva drošības vadības sistēmas uzbūves struktūra un darbības algoritms;
- Dzelzceļa transporta drošības intelektuālās vadības sistēmas uzbūvei ir jābūt divās fāzēs — anomālijas atpazīšana (imūnais negatīvās selekcijas algoritms) un labākās reakcijas izvēle atkarībā no tipa (imūnais klonālās selekcijas algoritms).
- Tika izstrādāti imūno algoritmu paraugi izpildei uz datora un uz kontrolleriem;
- Tika izvēlēti eksperimentos izmantojamie kontrolleru papildu moduļi un datu devēji;
- Tika realizēta datu plūsma starp kontrolleriem un vadības centra datoriem un tās ierakstīšana datu bāzē;
- Darbā veikti eksperimenti laboratorijā un reālos apstākļos, pieslēdzot iebūvēto iekārtu prototipus pie lokomotīvēm, luksoforu releju skapjiem un pārbrauktuves releju skapja.
- Ierobežotas atmiņas un procesora jaudas dēļ, kontrollerī var realizēt imūnā algoritma vienkāršās formas.
- Eksperimentu rezultātu analīze parādīja, ka: jāierobežo datu izvade, atstājot tikai svarīgākos datus, un precīzi norādot saņēmēju; var tikt pieņemts nepareizs vai vēlš lēmums neprecīzu vai novēlotu datu saņemšanas dēļ.
- Izstrādātie iebūvēto iekārtu prototipi var tikt pieslēgti un var sadarboties ar tādiem dzelzceļa objektiem, kā lokomotīve, luksoforu un pārbrauktuves releju skapji, kas ļauj tos izmantot ar esošo dzelzceļa infrastruktūru un ritošo sastāvu.
- Neironu tīklu var izmantot kā imūnas sistēmas mehānismu, kas spēj pašapmācīties un uzlabot situāciju transporta sistēmā samazinot sadursmes varbūtību.
- Definētā daudzkritēriju mērķa funkcija var būt izmantota evolucionāros algoritmos, t.i. neironu tīklos, imūnos un ģenētiskos algoritmos.
- Modificēts bremzēšanas vadības algoritms dod iespēju apturēt vilcienu un novērst sadursmi gadījumā, kad situācijas izlabošana nav iespējama, kas nodrošina pārbrauktuves imūnās sistēmai papildus drošības funkciju.
- Laboratorijas datoreksperimentos tika salīdzinātas trīs evolucionāro aprēķinu tehnoloģijas — imūnais algoritms, ģenētiskais algoritms un neironu tīkls — kas deva iespēju novērtēt imūnos algoritmus pēc dzelzceļa transporta un autotransporta sadursmes novēršanas kritērija, pēc vilciena kustības ātruma izmaiņas kritērija un pēc patērētā mašīnlaika algoritma darbībai;
- Imūnais negatīvās selekcijas algoritms uzrādīja labu lauka noklāšanu ar detektoriem un stabilu „svešo” antigēnu atpazīšanu, kas dod iespēju efektīvi atrast bīstamo situāciju uz pārbrauktuves un palaist situācijas uzlabošanas optimizācijas mehānismu;
- Imūnais algoritms uz 280% labāk samazina sadursmes varbūtību, nekā ģenētiskais algoritms un uz 2.88% labāk, nekā neironu tīkls.
- Imūnais algoritms uz 1579% labāk saglabā sākumā definēto vilciena kustības ātrumu varbūtību, nekā ģenētiskais algoritms un uz 260.64% labāk, nekā neironu tīkls.

- Neskatoties uz gadījuma raksturu, imūnais algoritms parāda uz 850% vidēji stabilākus risinājumus salīdzinājumā ar ģenētisko algoritmu un uz 126.30% — salīdzinājumā ar neironu tīklu.
- Neironu tīklu apmācībai patērēts mašīnlaiks ir vismazākais un uz 60.47% mazāks, nekā imūnajam algoritmam.
- Ģenētiskais algoritms strādā uz 1.89% ātrāk par imūnajiem algoritmiem, ko var uzskatīt par nenozīmīgu salīdzinājumā ar imūno algoritmu atrastiem rezultātiem pēc mērķa funkcijas kritērijiem.
- Pēc novadītiem eksperimentiem var secināt, ka izstrādāta pārbrauktuves papildus drošības iekārta ir darbaspējīga.
- Pārbrauktuves papildus drošības iekārta var nodrošināt pārbrauktuvei tuvojošās automašīnas un lokomotīves identifikāciju.
- Pārbrauktuves papildus drošības iekārta var nodot lokomotīves un automašīnas ierīcei pārbrauktuves vadības releju stāvokli.
- Pārbrauktuves papildus drošības iekārta var nodrošināt stāvošās automašīnas atrašanos pārbrauktuves zonā un nodot informāciju par to izmantojot bezvadu sakaru kanālu lokomotīvei.
- Pārbrauktuves papildus drošības iekārta, pieslēgta paralēli esošai dzelzceļa pārbrauktuvi vadības sistēmai, netraucē esošās sistēmas darbību un paaugstina esošās sistēmas drošības līmeni.
- Eksperimentu laikā arī tika konstatēts, ka:
 - nepārtraukti izvadīt visus datus, ja tie nav paši svarīgākie, ir neoptimāli.
 - nepieciešams izstrādāt pozīcijas un ātruma paredzēšanas algoritmu, lai varētu turpināt aprēķinus, ja dati saņemti novēloti.
 - GPS datu stabilizācijai var izmantot Kalmana filtru, bet tā realizācija kontrolēros aizņem daudz atmiņas un skaitļošanas resursu.

LITERATŪRA

1. A. Klūga. Satelītu radionavigācijas sistēmas. RTU, Rīga, 2010.
2. A. Lewiński, T. Perzyński. The Reliability and Safety of Railway Control Systems Based on New Information Technologies. Selected papers of 10th Conference, TST 2010
3. A. Watkins, J. Timmis, L. Boggess. Artificial Immune Recognition System (AIRS): An Immune-Inspired Supervised Learning Algorithm. 2003. Kluwer Academic Publishers.
4. Alps I. Promocijas darbs: Intelektuālā elektrotransporta vadības sistēmu sarakstu problēmu modelēšana neparedzētos gadījumos. RTU, Rīga, 2012.
5. Arhipova I., Bāliņa S., „Statistika ekonomikā”, mācību līdzeklis, Datorzinību centrs, Rīga, 2008, 352 lpp.
6. C. Hunga, Y. Suda, M. Aki, T. Tsuji, M. Morikawa, T. Yamashita, T. Kawanabe, T. Kunimi. Study on early signs detection of derailment for railway vehicles. // Proceedings of 21st International Symposium on Dynamics and Vehicles on Roads and Tracks, Stockholm, August 17-21 2009
7. D. Dasgupta, K. Krishna Kumar, D. Wong, M. Berry. Negative Selection Algorithm for Aircraft Fault Detection. In proceedings of ICARIS 2004.
8. D. Eidukas, R. Kalnius. Models Quality of Electronics Products. 2010. No. 2(98)
9. D. Eidukas, R. Kalnius. Models Quality of Mechatronic Products. 2009. No. 7(95)
10. D. Eidukas, R. Kalnius. Two-Parameter Electronic Devices Quality Models. 2010. No. 7(103)

11. D. Eidukas. Modeling of Level of Defects in Electronics Systems. 2010. No. 3(99)
12. D. Eidukas. Stochastic Models of Quality Level of Mechatronic Products. 2008. No. 3(83)
13. D. Eidukas. Stochastic Models Quality of Electronics Systems. 2008. No. 5(85)
14. Das S., Gui M., Pahwa A. Artificial Immune Systems for Self-Nonself Discrimination: Application to Anomaly Detection. Advances of Computational Intelligence in Industrial Systems. Springer, 2008.
15. E. Bareiša, V. Jusas, K. Motiejūnas, R. Šeinauskas. Functional Test Generation Procedures. 2006. No. 8(72)
16. E. Bareiša, V. Jusas, K. Motiejūnas, R. Šeinauskas. Functional Test Transformation to Improve Compaction. 2008. No. 3(83)
17. E. Bareiša, V. Jusas, K. Motiejūnas, R. Šeinauskas. Transition Fault Coverage For Different Implementations Of The Circuit. ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA. 2005. Nr.3(59)
18. Goldberg. Computer Aided Gas Pipeline Operation Using Genetic Algorithms and Rule Learning. 1983.
19. H. Tsunashima, H. Mori. Fault detection of railway vehicle suspension using multiple model approach. // Proceedings of 21st International Symposium on Dynamics and Vehicles on Roads and Tracks, Stockholm, August 17-21 2009
20. Haykin S. Neural Networks. A Comprehensive Foundation. Second Edition. - Prentice Hall, 2006 – 842 p.
21. Holland H. John. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. University of Michigan Press, 1975 - 183 p.
22. I.Beinarts. Promocijas darbs: Izplūdušās loģikas kontrolleru algoritmu izpēte pasažieru transporta salona siltuma komforta vadībai. RTU, Rīga, 2011
23. J.D. Farmer, N.H. Packard, A.S. Perelson. The Immune System, Adaptation, and Machine Learning
24. J.O. Kephart. A biologically inspired immune system for computers. In proceedings of Artificial Life IV: The Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, 1994. MIT Press.
25. Janota, K. Rástočný, J. Zahradník. Modelling of safety properties of a control system. // Proceedings of Transport Systems Telematics 2006, Katowice, October 2006
26. K. KrishnaKumar, J. Neidhoefer. Immunized Adaptive Critic for an Autonomous Aircraft Control Application. In Artificial Immune Systems and Their Applications. Ed. by D. Dasgupta.Springer, 1999.
27. K. Rástočný, J. Ždánký. Application of programmable logic controllers in safety systems. // Proceedings of Transport Systems Telematics 2007, Katowice, October 2007
28. L. Wolski, P. Zaprawa, A. Komkowski, A. Adolph. A remote diagnosis & monitoring system using internet technology. // Proceedings of Transport Systems Telematics 2005, Katowice, October 2005
29. Lewiński, T. Perzyński. The modeling of multicomputer structure in railway control applications. // Proceedings of Transport Systems Telematics 2006, Katowice, 2006
30. M. A. Kamarposhti. Contingencies Ranking for Voltage Stability Analysis using Continuation Power Flow Method. 2010. No. 3(99)
31. M. Bereta, T. Burczynski. Immune K-means and negative selection algorithms for data analysis. Elsevier IS 179, 2009.
32. M. Gorobece. Promocijas darbs: Ģenētisko algoritmu izpēte elektriskā transporta optimālai vadībai. RTU, Rīga, 2008

33. M. Gorobetz, I. Alps, A. Levchenkov. Mathematical Formulation of Public Electric Transport Scheduling Task for Artificial Immune Systems. Proceedings of ITELMS'2009, Kaunas.
34. M. P. Groover. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. - Prentice Hall, NJ, 2008.
35. Mitsuo Gen, Runwei Cheng. Genetic Algorithms & Engineering Design. Wiley, 1997
36. Mitsuo Gen, Runwei Cheng. Genetic Algorithms & Engineering Optimization. Wiley, 2000
37. O. Krūmiņš. Promocijas darbs: Intelģento transporta sistģmu izveides principi un realizģcijas iespģjas. RTU, Rģga, 2010
38. P. Gorczyca, J. Mlynczak. Operation and diagnostic database of devices. // Proceedings of Transport Systems Telematics 2005, Katowice, October 2005
39. P. Musilek, A. Lau, M. Reformat, L. Wyard-Scott. Immune Programming. Elsevier IS 179, 2009.
40. P. Negi. Artificial Immune System Based Urban Traffic Control. Texas A&M University, 2006.
41. R. Tavakkoli-Moghaddam, A. Rahimi-Vahed, A. H. Mirzaei. A hybrid multi-objective immune algorithm for a flow shop scheduling problem with bi-objectives: Weighted mean completion time and weighted mean tardiness. Elsevier IS 179, 2009.
42. S. Forrest, A.S. Perelson, L. Allen, R. Cherukuri. Self-nonself discrimination in a computer. In proceedings of the 1994 IEEE Symposium on Research in Security and Privacy. Los Alamitos, CA.
43. S. T. Powers, J. He. A hybrid artificial immune system and Self Organising Map for network intrusion detection. Elsevier IS 179, 2009.
44. T. A. S. Masutti, L. N. de Castro. A self-organizing neural network using ideas from the immune system to solve the traveling salesman problem. Elsevier IS 179, 2009.
45. T. Fukuda, K. Mori and M. Tsukiyama. Parallel Search for Multi-Modal Function Optimization with Diversity and Learning of Immune Algorithm. In Artificial Immune Systems and Their Applications. Ed. by D. Dasgupta. Springer, 1999.
46. Uteševs I. Promocijas darbs: Elektriskģ sliežu transporta iebģvģto bezvadu bremzģšanas iekģrtas vadģbas algoritmu izstrģde izmantojot pozicionģšanas informģcijas sistģmas. RTU, Rģga, 2010
47. V. Abraitis, Ž. Tamoševičius. The Transition Fault Model of Programmable Logic. 2008. No. 1(81)
48. V. Knyva, M. Knyva. Algorithm for Estimation of Measurement Devices Software's Metrological Reliability. 2010. No. 4(100)
49. Y. Hasegawa, H. Tsunashima, Y. Marumo, T. Kojima. Detection of unusual braking behaviour of train driver. // Proceedings of 21st International Symposium on Dynamics and Vehicles on Roads and Tracks, Stockholm, August 17-21 2009
50. Мартиросов Д.С. Диагностирование технического состояния ЖРД на основе математических моделей рабочих процессов и измеряемых параметров методом структурного исключения. автореферат дис. кандидата технических наук: Научно-производ. объединение энергетич. машиностроения, Москва, 1998
51. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Основы технической диагностики. М.: Маршрут, 2004.
52. Титанакон Д.А. Оценка технического состояния газоздушного тракта тепловозных дизелей. автореферат дис. кандидата технических наук. Ом. гос. ун-т путей сообщ., Омск, 2005
53. Тычков А.С. Диагностирование тяговых электродвигателей грузовых электровозов по параметрам магнитного поля. автореферат дис. кандидата технических наук: Сам. гос. ун-т путей сообщения, Самара, 2009

54. Чернов Д.В. Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах работы. автореферат дис. кандидата технических наук: Ульян. гос. техн. ун-т, Ульяновск, 2005
55. Швалов Д.В., Шаповалов В.В. — Системы диагностики подвижного состава. Маршрут, 2005
56. Юдина О. Диагностика состояния электродвигателя. Proceedings of the International conference on system analysis and information technologies. Kyiv, 2009.