RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Telekomunikāciju institūts

Jūlija ASMUSS
Doktora studiju programmas „Telekomunikācijas” doktorante

UZ NESTRIKTĀS LOĢIKAS BALSTĪTAS METODES RESURSU VADĪBAI NGN TĪKLOS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
GUNĀRS LAUKS

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

Asmuss J. Uz nestriktās loģikas balstītas metodes resursu vadībai NGN tīklos. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2016. – 57 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes “RTU P-08” 2016. gada 21. februāra lēmumu, protokols Nr. 32.

EIROPAS SOCIĀLAIS FONDS

EIROPAS SAVIENĪBA

ISBN 978-9934-10-798-6

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 5. maijā, plkst. 18.00, Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un Telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 2-38. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Ernests Pētersons
Rīgas Tehniskā universitāte, Elektronikas un Telekomunikāciju fakultāte

Profesors *Dr. sc. ing.* Pēteris Grabusts
Rēzeknes tehnoloģiju akadēmija, Inženieru fakultāte

Profesors *Dr. habil. math.* Aleksandrs Šostaks
Latvijas Universitāte, Fizikas un matemātikas fakultāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Jūlija Asmuss …… (Paraksts)

Datums ……

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, nobeigumu, literatūras sarakstu, 5 pielikumus, 53 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 167 lappuses. Literatūras sarakstā ir 124 nosaukumi.

PATEICĪBA

Izsaku vislielāko pateicību promocijas darba vadītājam profesoram Gunāram Laukam par ieguldīto laiku, vērtīgajiem padomiem un sniegtajām konsultācijām promocijas darba izstrādes laikā.

Pateicos kolēģiem par dalīšanos pieredzē un RTU Doktorantu studiju daļas darbiniekiem par palīdzību un sniegtajām konsultācijām.

No sirds pateicos savai ģimenei un īpaši mātei Svetlanai un vīram Dmitrijam par pacietību, sapratni un atbalstu promocijas darba izstrādes laikā. Jūsu atbalsts ir nenovērtējams.

Liels paldies visiem, kuri ir atbalstījuši šī promocijas darba izstrādi.

VISPĀRĒJAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pēdējo 20 līdz 30 gadu laikā telekomunikāciju nozares straujas attīstības rezultātā ļoti būtiski izmainījās telekomunikāciju tīklu arhitektūra un darbības principi. Ja pirms 30 gadiem telekomunikāciju tīkls pārsvarā tika izmantots balss pārraidei, tad tagad tīkls ir savienots ar vairākām aplikācijām, kuras pēdējā laikā ļoti intensīvi attīstās un sen jau ir saistītas ne tikai ar balss pārraides funkcijām. Multiservisu tīkla izveidei ļoti svarīga ir ideja apvienot dažāda rakstura tīklus. Jaunu aplikāciju parādīšanās ar augstām prasībām attiecībā uz joslas platumu un spēju elastīgi un efektīvi apstrādāt dažāda rakstura trafiku noved pie būtiskām izmaiņām datu pārraides tehnoloģijās. Tiek mainīta arī pieeja tīklu izveidei, un vadošajā pozīcijā izvirzās nākamās paaudzes tīkls.

Nākamās paaudzes tīkls (angļu valodā — *Next Generation Network*, *NGN*), kura ieviešana telekomunikāciju industrijā ir tuvākās nākotnes uzdevums [36], ir universāls un multifunkcionāls elektronisko sakaru pakešu komutācijas tīkls, kas nodrošina iespēju lietotājam vienlaicīgi saņemt balss, video un datu pārraides pakalpojumus. Saskaņā ar *ITU-T* vīziju par *NGN*, tīklā sniegtie elektronisko sakaru pakalpojumi ir neatkarīgi no datu pārraides tehnoloģijas un tos var sniegt savstarpēji nesaistītie pakalpojumu sniedzēji. *NGN* tīklu raksturo spēja garantēt klienta-operatora līgumā *SLA* (klienta-operatora līgums par pakalpojuma kvalitātes līmeni; angļu valodā — *Service Level Agreement*) noteiktus pakalpojumu kvalitātes nosacījumus dažādiem pakalpojumu veidiem. Mūsdienu tīklā ir jāņem vērā katras aplikācijas raksturs, prasības attiecībā uz funkcionēšanas parametriem un servisa kvalitāti (angļu valodā — *Quality of Serviss*, *QoS*). Notiek aktīvs pētniecisks darbs, lai atrastu mehānismus, kas būtu spējīgi nodrošināt tīkla resursu dinamisku vadību, vienlaicīgi nodrošinot servisam nepieciešamo *QoS* līmeni. Šis kvalitātes vadības uzdevums ir sarežģīts un prasa lietot sarežģītas lēmumu atbalsta sistēmas (angļu valodā — *Decision Support System*, *DSS*). Ir vairāki aspekti, kuru dēļ uzdevums par tīkla resursu dinamisku pārdalīšanu ir uzskatāms par ļoti sarežģītu (skat. [9], [11], [30]): trafika sarežģītā struktūra (ar vairākiem trafika veidiem) un „uzliesmojošais" raksturs; nepieciešamība garantēt *QoS* prasību ievērošanu katram trafika veidam un darbības efektivitāti visai sistēmai kopumā; nepieciešamība pieņemt lēmumu nepilnas informācijas apstākļos; nepieciešamība nodrošināt tīkla resursu vadību mainīgajā vidē ar ļoti izteiktām nenoteiktībām lēmuma pieņemšanas apstākļos.

Viena no pieejām, kas ļautu strādāt mainīgajā vidē ar trafika klasēm, orientējoties uz diferencētiem pakalpojumiem, un iekļaut modelī katrai klasei atbilstošās *QoS* prasības, ir tīkla virtualizācija (skat., piemēram, [2], [5], [14], [17], [32], [35], [37], [63]). Viens no mehānismiem, kas ļautu nodrošināt resursu dinamisku vadību tīklā ar virtualizēto struktūru, ir *DaVinci* (angļu valodā — *Dynamical Adaptive Virtual Network for Customized Internet*) mehānisms [13]. Saskaņā ar *DaVinci* koncepciju, *QoS* klašu izvirzīto

prasību nodrošināšanai trafiks tiek vadīts pa virtuāliem tīkliem. Ja pieņem *DaVinci* koncepciju, tad ir svarīgi atrast efektīvu mehānismu tīkla caurlaides joslas sadalei un dinamiskai pārdalei starp vairākiem virtuāliem apakštīkliem tīklā ar *DaVinci* arhitektūru, ņemot vērā iepriekš teikto par mūsdienu tīkla trafika raksturu.

NGN tīklu kontekstā caurlaides joslas sadales uzdevuma aktualitāte ir izskaidrojama arī ar to, ka *ITU-T* rekomendācija *Y.2111* (*Resource and admission control functions in next generation networks* [18]) nosaka tikai vispārējo arhitektūru resursu un piekļuves vadības *RACF* (angļu valodā — *Resource and Admission Control Functions*) realizācijai un standartizē interfeisu, bet funkcionālie risinājumi ir katras kompānijas pārziņā. Latvijas telekomunikāciju tirgu raksturo liels skaits mazo un vidējo uzņēmumu. Galvenokārt, tie ir interneta pakalpojumu sniedzēji, kuriem dārgās un lielās *DSS* sistēmas nav pieejamas. Līdz ar to pašlaik ir ļoti aktuāls uzdevums par tīkla resursu vadības mehānismiem, kurus var realizēt, izmantojot brīvas pieejas programmatūru.

Jāņem vērā arī tas, ka nemitīgi pieaug gan trafiks, gan aplikāciju skaits. Līdz 2020. gadam ES plānots saražot un uzsākt ekspluatāciju līdz 3 miljardiem sensoru, kuri tiks pieslēgti kopējam nākamās paaudzes tīklam. Konceptuāli tas nozīmēs, ka *NGN* jānodrošina pieslēgums jebkurai iekārtai, jebkurā vietā un jebkurā laikā. Tik apjomīgai resursu pārvaldei ir nepieciešami automatizēti resursu pārvaldības rīki (skat. [14], [17], [18]). Esošās šādu sistēmu veidošanas tehnoloģijas, piemēram, *MADP* (multi-aģentu lēmumu pieņemšanas process; angļu valodā — *Multi-Agent Decision Process*), raksturo polinomiāla darbietilpība un praktiskos aktuālos uzdevumos tās nav izmantojamas liela dimensiju skaita dēļ. Uzdevumu lielā dimensija ir nopietns iemesls, kas nosaka nepieciešamību rast jaunas un efektīvas lēmumu pieņemšanas tehnoloģijas tīkla resursu vadībai. Pētījumi rāda, ka *NGN* resursu efektīvai pārvaldībai jāveido multi-aģentu sistēma, kura nodrošina optimālajam tuvu lēmumu pieņemšanu nepilnas informācijas apstākļos.

Viens no perspektīvākajiem rīkiem, kas var tikt izmantots problēmas veiksmīgai atrisināšanai pie šādiem nosacījumiem, ir uz nestriktās loģikas (angļu valodā — *Fuzzy Logic*) pamata izstrādātais matemātiskais aparāts (skat., piemēram, [49], [52]). Uz nestriktās loģikas balstītas sistēmas un metodes tika piedāvātas, jau izveides brīdī [60] postulējot nenoteiktības apstākļus kā neatņemamu modeļa sastāvdaļu. Atzīmēsim, ka 2015. gada vasarā notika divas ļoti nozīmīgas ar nestriktās loģikas un nestrikto sistēmu problemātiku saistītās starptautiskās konferences, kas bija veltītas 50. gadadienai kopš 1965. gada, kad tika publicēts fundamentālais Lotfi Zadē raksts „*Fuzzy sets*" [60]. Šajos jubilejai veltītajos pasākumos tika prezentēti vairāki simti referātu, kuros autori atspoguļoja pēdējo gadu pētījumu rezultātus, kuri nepārprotami liecina par uz nestriktās loģikas pamata izstrādāto metožu un izveidoto tehnoloģiju efektivitāti daudzās jomās. Rezumējot, atzīmēsim, ka eksperimentu rezultāti daudzās nozarēs pierāda uz nestriktās

loģikas likumiem strādājošo vadības risinājumu efektivitāti sarežģītu sistēmu resursu kontrolē un vadībā.

Uz nestriktās loģikas balstītu telekomunikāciju tīklu projektēšanas metožu perspektīvas pēdējos gados tika pētītas RTU Telekomunikāciju institūtā profesora Gunāra Lauka vadībā. Šo problēmu analīzei tika veltīta Jana Jeļinska 2011. gadā aizstāvētā disertācija „Faziloģikas balstīta piekļuves vadība *MPLS-TE*/*GMPLS* tīklos" [19]. Savā darbā J. Jeļinskis novērtēja uz nestriktās loģikas pamata konstruētās savienojumu piekļaušanas kontroles (angļu valodā — *Call Admission Control*, *CAC*) pielietošanas iespējas daudzprotokolu komutācijas trafika pārraides un vadības sistēmā, kā arī izpētīja jaunās metodes priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionālajām uz sliekšņa balstītajām metodēm.

Šis promocijas darbs ir veltīts uz nestriktās loģikas balstītu metožu tālākai attīstībai telekomunikāciju tīklu resursu vadības uzdevumu risināšanai. Galvenā uzmanība ir pievērsta joslas caurlaides sadales problēmai. Lai iekļautu modelī katrai trafika klasei atbilstošās *QoS* prasības, uzdevums ir risināts, balstoties uz virtuālizācijas principiem, par pamatu ņemot *DaVinci* arhitektūru [13].

Pētījuma mērķis un uzdevumi

Pētījuma mērķis — izstrādāt caurlaides joslas resursu vadības algoritmus *NGN* tīkliem, kuri nodrošina lēmumu pieņemšanu mainīgā vidē nepilnas informācijas apstākļos, realizējot resursu piešķiršanu trafika klasēm ar dažādām *QoS* prasībām.

Lai sasniegtu promocijas darbā nosprausto mērķi, tika izvirzīti šādi uzdevumi:

1) formulēt resursu vadības uzdevumu par caurlaides joslas sadali sakaru tīklā ar *DaVinci* arhitektūru, veicot esošo pētījumu analīzi;
2) izstrādāt lēmumu pieņemšanas aptuvenās (nestriktās) metodes caurlaides joslas sadalei starp virtuālajiem tīkliem;
3) izveidot simulēšanas modeli ar lēmumu pieņemšanas sistēmas pētīšanas un pilnveidošanas mērķi;
4) izstrādāt un eksperimentāli pārbaudīt jaunas trafika reprezentācijas un klasifikācijas metodes anomālijas riska mazināšanai;
5) eksperimentāli simulējot resursu vadības procesus, aprobēt izstrādātos lēmumu pieņemšanas mehānismus.

Šo uzdevumu efektīvai risināšanai nepieciešams pielāgot adekvātu aparātu un attīstīt tā rīkus, ņemot vērā, ka šajā telekomunikāciju tīklu attīstības posmā arvien aktuālāka kļūst situācija, kad ar resursu vadību saistītie lēmumi ir jāpieņem neprecīzas un strauji laikā mainīgas, liela apjoma informācijas gadījumā:

1) klasificējot trafiku, lielo darbietilpību izraisošo „ticamības kopu" (angļu valodā — *Belief States*) aizvietot ar nestriktās transformācijas rezultātā iegūtajiem mainīgajiem, kuriem tiks piemērota nestriktā klasteru veidošana, kas savukārt ļauj samazināt

„ticamības kopas” dimensiju un klastera piederības funkcijai noteikt tikai augšējās un apakšējās robežas;

2) optimizācijas procedūrai piemērot uz nestriktās loģikas un spēļu teorijas balstītu lēmumu pieņemšanas sistēmu, kura ļauj nodrošināt optimālajam tuvu lēmumu pieņemšanu nepilnas informācijas apstākļos;
3) sistēmas simulāciju veikt ar krāsainiem Petri tīkliem, kas ļauj samazināt simulāciju darbietilpību.

Lietotās pētīšanas metodes

Promocijas darba izstrādes laikā tika lietotas šādas pētīšanas metodes, kas tika realizētas ar *Matlab*, datorprogrammu *R*, *CPN Tools* un *MS Excel* programmatūru nodrošinājumu:

1) uz nestriktās loģikas balstītas lēmumu pieņemšanas metodes daļēji novērojamu objektu vadībai;
2) uz spēļu teorijas balstītas stratēģiju izvēles metodes lēmumu pieņemšanai nenoteiktības apstākļos;
3) trafika nestriktās klasterizācijas un klasifikācijas metodes;
4) trafika nestriktās transformācijas (angļu valodā — *Fuzzy Transform*, *F-transform*) metode klasterizācijas un klasifikācijas mērķiem;
5) multi-aģentu sistēmu simulēšanas metodes lietojot *CPN* (krāsainie Petri tīkli; angļu valodā — *Coloured Petri Nets*);
6) statistiskās metodes simulēšanas rezultātu apstrādei.

Promocijas darba uzdevumu risināšanai lietotās metodes ļauj, izmantojot nestriktās loģikas priekšrocības un krāsainos Petri tīklus, izveidot lēmumu pieņemšanas modeļus un simulēšanas rīkus zināšanu iegūšanai (angļu valodā — *Event Condition Action Fuzzy Rules*) telekomunikāciju multi-aģentu sistēmās, un rezultātā attīstīt sakaru tīklu resursu vadības mehānismus.

Aizstāvāmās tēzes

1) Pamatojoties uz nestriktās loģikas principiem izstrādātā lēmuma atbalsta sistēma tīkla caurlaides joslas dinamiski adaptīvai sadalei starp diviem virtuālajiem tīkliem dod iespēju efektīvi pielāgoties mainīgai videi, ātri reaģējot uz trafika izmaiņām un nodrošinot *QoS* parametru saglabāšanu pieļaujamās robežās.
2) Modernizējot iepriekšējā punktā minēto lēmuma atbalsta sistēmu, balstoties uz spēļu teorijas principiem, tiek panākta tīkla caurlaides joslas dinamiski adaptīva sadale starp vairākiem virtuālajiem tīkliem ar atšķirīgām *QoS* prasībām.
3) Balstoties uz nestriktās klasterizācijas un trafika datu nestriktās transformācijas izstrādātā metode ļauj efektīvi risināt ar trafika klasifikāciju saistītu uzdevumu par anomāliju noteikšanu.

Rezultāti un to zinātniskā novitāte

Promocijas darba ietvaros ir izstrādāta uz nestriktās loģikas un virtualizācijas principiem balstīta telekomunikāciju tīklu caurlaides joslas resursu vadības metode un izveidota eksperimentāla lēmumu atbalsta sistēma metodes novērtēšanai un parametru precizēšanai. Ir piedāvāts uz F-transformācijas un nestriktās klasterizācijas balstīts trafika analīzes un anomāliju noteikšanas algoritms.

Izstrādātās metodes ir jaunas. Cik darba autorei ir zināms, citu pētnieku publicētājos darbos:

1) sakaru tīklos ar *DaVinci* arhitektūru uz nestriktās loģikas balstītie caurlaides joslas sadales risinājumi iepriekš netika pētīti;
2) uz nestriktās spēļu teorijas balstītie sakaru tīklu caurlaides joslas sadales risinājumi iepriekš netika piedāvāti;
3) nestriktās transformācijas iepriekš netika pielietotas ar telekomunikāciju nozari saistītajos risinājumos.

Promocijas darba zinātniskais jauninājums ir saistīts ar:

1) uz nestriktās loģikas balstītu metožu (skat., piemēram, [49], [52]) un spēļu teorijas principu ([42], [43]) integrēšanu ar *DaVinci* pieeju [13] telekomunikāciju tīklu caurlaides joslas resursu vadības jaunas metodes izveidei;
2) nestriktās transformācijas ([46], [47]) priekšrocību izmantošanu, veidojot uz nestriktās klasterizācijas ([3], [25], [55], [59]) pamata jaunu trafika analīzes un anomāliju noteikšanas mehānismu.

Darba praktiskā nozīmība

1) Balstoties uz iegūtajiem teorētiskajiem un eksperimentālajiem rezultātiem, tika izveidots trafika vadības rīks, kurš ietver sevī anomāliju konstatēšanu, lēmumu pieņemšanu virtuālo tīklu konkurences apstākļos, resursu piešķiršanu un adaptīvu pārdali.
2) Promocijas darba pētījumu rezultāti izmantoti zinātniski pētnieciskajā projektā 2013/0024/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/045 „Uz nestriktās loģikas principiem balstītu matemātisku struktūru lietojumi telekomunikāciju tīklu projektēšanas un resursu vadības tehnoloģiju attīstībai” ar Eiropas Sociālā fonda līdzfinansējumu.
3) Izstrādātā lēmumu pieņemšanas atbalsta sistēma un izveidotais eksperimentālais modelis tiek pielietoti bakalaura un maģistra darbu izstrādei.

Rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti tika apspriesti 18 starptautiskajās konferencēs, kuras notika Latvijā un 11 ārvalstīs:

1) International Conference on Science, Engineering and Technology WASET 2012, Zurich, Switzerland, 5–6 July, 2012.

2) The 25th European Conference on Operational Research EURO 2012, Session on Telecommunication Networks, Vilnius, Lithuania, 8–11 July, 2012.
3) The 24th European Modeling and Simulation Symposium EMSS 2012, Vienna, Austria, 19–21 September, 2012.
4) The 6th Applied Information and Communication Technologies Conference AICT 2013, Jelgava, Latvia, 25–26 April, 2013.
5) The 26th European Conference on Operational Research EURO 2013, Session on Telecommunication Networks, Rome, Italy, 1–4 July, 2013.
6) The 8th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology EUSFLAT 2013, Milan, Italy, 11–13 September, 2013.
7) Science and Information Conference SAI 2013 (supported by the IEEE Computational Intelligence Society), London, UK, 7–9 October, 2013.
8) The 12th INFORMS Telecommunications Conference, Session on Traffic Engineering, Lisbon, Portugal, 2–4 March, 2014.
9) The 3rd International Symposium on Combinatorial Optimization ISCO 2014, Session on Network Design, Lisbon, Portugal, 5–7 March, 2014.
10) The 25th Nordic Conference in Statistics NORDSTAT 2014, Turku, Finland, 2–6 June, 2014.
11) The 12th International Symposium on Locational Decision ISOLDE 2014, Session on Network Design, Naples, Capri, Italy, 16–20 June, 2014.
12) The 26th European Modeling and Simulation Symposium EMSS 2014, Bordeaux, France, 10–12 September, 2014.
13) The 20th International Conference on Mathematical Modelling and Analysis, Sigulda, Latvia, 26–29 May, 2015.
14) The 4th International Symposium on Operational Research, Chania, Greece, 3–6 June, 2015.
15) The 27th European Conference on Operational Research EURO 2015, Glasgow, UK, 12–15 July, 2015.
16) The 4th IARIA International Conference on Data Analytics, Nice, France, 19–24 July, 2015.
17) The IEEE International Conference on Fuzzy Systems FUZZ-IEEE 2015, Istanbul, Turkey, 2–5 August, 2015.
18) The 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery FSKD 2015 (supported by the IEEE Circuits and Systems Society), Zhangjiajie, China, 15–17 August, 2015.

Kopumā tika publicēti 10 zinātniskie raksti dažādos zinātniskos izdevumos, kā arī publikācijas konferenču tēžu krājumos (konferenču tēzes nav iekļautas šajā sarakstā):

1) J. Asmuss, G. Lauks, Network Traffic Classification for Anomaly Detection: Fuzzy Clustering Based Approach, IEEE Proceedings of the 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery FSKD, Zhangjiajie, China, 2015, pp. 338–343. (*IEEE Xplore* datubāzē)
2) P. Hurtik, P. Hodakova, I. Perfilieva, M. Liberts, J. Asmuss, Network Attack Detection and Classification by the F–transform, Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems FUZZ-IEEE, Istanbul, Turkey, 2015, ref. 15289. (*IEEE Xplore* datubāzē)
3) J. Asmuss, G. Lauks, Fuzzy Clustering Based Approach to Network Traffic Classification and Anomaly Detection, Proceedings of the 4th International Conference on Data Analytics, Nice, France, 2015, pp. 78–80.
4) J. Asmuss, G. Lauks, Fuzzy Logic Based Network Bandwidth Allocation: Decision Making, Simulation and Analysis, Studies in Computational Intelligence, vol. 542, Springer, 2014, pp. 317–333. (*Scopus* datubāzē)
5) J. Asmuss, G. Lauks, Simulation Based Analysis and Development of Decision Support System for Virtual Network Bandwidth Management, Proceedings of the 26th European Modeling and Simulation Symposium EMSS, Bordeaux, France, 2014, pp. 444–451. (*Scopus* datubāzē)
6) J. Asmuss, G. Lauks, A Fuzzy Approach for Network Bandwidth Management, Advances in Intelligent Systems Research, vol. 32, Atlantis Press, 2013, pp. 722–727. (*Scopus* un *Web of Science* datubāzēs)
7) J. Asmuss, G. Lauks, A Fuzzy Logic Based Approach to Bandwidth Allocation in Network Virtualization, IEEE Proceedings of Science and Information Conference, London, UK, 2013, pp. 507–513. (*IEEE Xplore* un *Scopus* datubāzēs)
8) J. Asmuss, G. Lauks, Coloured Petri Nets Based Simulation Scheme for Adaptive Bandwidth Management, Proceedings of the 6th International Conference on Applied Information and Communication Technology, Jelgava, Latvia, 2013, pp. 98–103.
9) J. Asmuss, G. Lauks, V. Zagorskis, Simulation of Dynamically Adaptive Bandwidth Allocation Protocols Using Coloured Petri Nets, Proceedings of the 24th European Modeling and Simulation Symposium EMSS, Vienna, Austria, 2012, pp. 408–413. (*Scopus* datubāzē)
10) J. Asmuss, G. Lauks, V. Zagorskis, Application of CPN Tools for Simulation and Analysis of Bandwidth Allocation, WASET Journal Engineering and Technology, vol. 67, 2012, pp. 85–89.

Promocijas darbā veiktie pētījumi tika izmantoti zinātniski pētnieciskajā projektā 2013/0024/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/045 „Uz nestriktās loģikas principiem balstītu matemātisku struktūru lietojumi telekomunikāciju tīklu projektēšanas un resursu vadības

tehnoloģiju attīstībai". Iegūtie rezultāti tika prezentēti projekta ietvaros organizētajos semināros un iekļauti publicēšanai sagatavotājos materiālos.

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 167 lappuses. Darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta un pielikumiem. Darbs satur saīsinājumu sarakstu, 53 attēlus un 17 tabulas.

Ievadā ir pamatota veikto pētījumu aktualitāte, formulēts darba mērķis un uzdevumi, uzskaitītas promocijas darba izstrādē lietotās zinātniskās metodes, aprakstīti pētījumu rezultāti un to zinātniskā novitāte, uzskaitītas aizstāvamās tēzes, kā arī raksturota darba aprobācija.

Promocijas darba 1. nodaļā ir sniegts ieskats uz nestriktās loģikas balstītajā teorijā, uz kuras pamata darba turpmākajās nodaļās tiks piedāvātas darba uzdevumu risināšanas metodes resursu sadalei un trafika klasifikācijai. Nodaļā ir aprakstītas nestriktās kopas un to speciālie veidi — nestriktie lielumi, lingvistiskās vērtības, nestriktā sadalījuma bāzes elementi, nestriktie klasteri. Ir definēta nestriktā F-transformācija. Ir parādīts fazificēšanas un defazificēšanas princips, kā arī dots priekšstats par uz nestriktās loģikas balstītu lēmumu pieņemšanas sistēmu. Ir aprakstīti nestriktās klasterizācijas un klasifikācijas pamati.

Darba 2. nodaļa tiek veltīta caurlaides joslas sadales problēmai. Ir aprakstīti tīkla virtualizācijas principi un *DaVinci* arhitektūra. It definētas trafika klases un ir uzdoti to apkalpošanas kvalitātes parametri *NGN* tīklos saskaņā ar *ITU* rekomendācijām. Ir aprakstīts tīkla *DaVinci* modelis un definēti caurlaides joslas sadales uzdevuma parametri. Caurlaides joslas dinamiskai sadalei ir izveidota uz nestriktās loģikas un spēļu teorijas balstīta lēmumu pieņemšanas sistēma *FuzDSS* (angļu valodā — *Fuzzy Decision Support System*). Nodaļa satur izveidotās sistēmas elementu aprakstu, kā arī lēmumu pieņemšanas mehānisma darbības principus.

Darba 3. nodaļā krāsainie Petri tīkli ir izmantoti kā piedāvātās caurlaides joslas resursu vadības shēmas modelēšanas rīks. Simulēšanas eksperimenti izstrādātās metodes novērtēšanai ir veikti *CPN Tools* vidē, modelējot situāciju ar divām un trīs trafika klasēm. Eksperimentu rezultātā promocijas darba izstrādes gaitā tika novērtēta lēmumu pieņemšanas sistēmas darbība un uzlaboti *FuzDSS* mehānismi. Nodaļas beigās ir izdarīti secinājumi un ir izteiktas rekomendācijas attiecībā uz parametru izvēli.

Darba 4. nodaļa ir veltīta trafika klasifikācijai ar anomāliju novērtēšanas mērķi. Ir aprakstīta trafika priekšapstrādes metode, kuras pamatā ir F-transformācijas tehnika. Šajā nodaļā ir apkopota informācija par izmantotajiem klasterizācijas un validācijas algoritmiem. Ir aprakstīta nestriktās klasifikācijas procedūra, kura izmanto klasterizācijas rezultātā iegūtos prototipus un darbojas uz diskrētas F-transformācijas pamata. Nodaļa satur pielietoto metožu analīzi. Metožu salīdzināšanai ir izmantoti ģenerētie trafika dati

bez un ar anomālijām. Ir izteiktas rekomendācijas attiecībā uz metožu un to parametru izvēli.

Promocijas darba nobeiguma daļa ir uzrakstīta rezumējot iepriekš izdarītos secinājumus. Izmantotās literatūras saraksts satur 124 nosaukumus. Pielikumos ir apkopoti programmu kodi, lēmumu atbalsta sistēmas darbību ilustrējošie attēli un grafiki.

Pateicība

Šis promocijas darbs daļēji ir izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projekta 2013/0024/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/045 „Uz nestriktās loģikas principiem balstītu matemātisku struktūru lietojumi telekomunikāciju tīklu projektēšanas un resursu vadības tehnoloģiju attīstībai" ietvaros.

DARBA ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS

Pirmā nodaļa

Šajā telekomunikāciju tīklu attīstības posmā arvien aktuālāka kļūst situācija, kad ar resursu vadību saistītos lēmumus ir jāpieņem neprecīzas un strauji laikā mainīgas, liela apjoma informācijas gadījumā. Šo situāciju mēs raksturojam kā lēmumu pieņemšanu, tā saucamajā, nestriktajā vidē. Modelējot sistēmas un procesus nestriktajā vidē, kā arī veicot procesu kvalitatīvo un kvantitatīvo analīzi, jāizvēlas vides apstākļiem atbilstošais matemātiskais aparāts. Promocijas darbā ir izmantots aparāts, kas balstās uz nestriktās loģikas likumiem. Darba pirmajai nodaļai pēc būtības ir ievadnodaļas raksturs. Nodaļa satur ieskatu uz nestriktās loģikas balstītajā teorijā, uz kuras pamata turpmākajās nodaļās tiek aprakstītas promocijas darba uzdevumu risināšanas metodes resursu sadalei un trafika klasifikācijai. Nodaļā aprakstītie jēdzieni un modeļi (nestriktie lielumi, lingvistiskās vērtības, nestriktais sadalījums, nestriktās transformācijas, fazificēšana un defazificēšana, nestriktie klasteri) tika apgūti, izmantojot vairākus literatūras avotus (skat., piemēram, [1], [47], [48], [49], [52], [60], [61], [62]). Definīcijas un apzīmējumi ir pielāgoti promocijas darba uzdevumu kontekstam.

Uz nestriktās loģikas balstītas lēmumu pieņemšanas sistēmas izmanto nestriktas kopas un nestriktus lielumus (nestriktu kopu speciālgadījumus). Nestriktu kopu un nestriktu lielumu definīcijas pamatā ir piederības funkcijas jēdziens. Klasiskajā pieejā kopas var būt uzdotas, lietojot piderības funkcijas ar divām vērtībām: vērtība 1 nozīmē objekta piederību, savukārt 0 — objekta nepiederību kopai. Strādājot nestriktās loģikas kontekstā, pieļauj piederības funkcijas starpvērtības, kas parāda elementa piederības pakāpi.

Uz nestriktās loģikas balstītu lēmumu pieņemšanas sistēmu (skat., piemēram, [1], [31], [49], [52]) pamatā ir mainīgie ar nestriktām lingvistiskām vērtībām, kuri tiek efektīvi izmantoti promocijas darba modeļos vairāku iemeslu dēļ. Atzīmēsim šeit divus iemeslus, kurus var īsi aprakstīt un ir viegli uztvert. Pirmkārt, kad nenoteiktības apstākļos tiek risināti resursu vadības uzdevumi, kas saistīti ar *QoS* nosacījumu nodrošināšanu, ļoti bieži

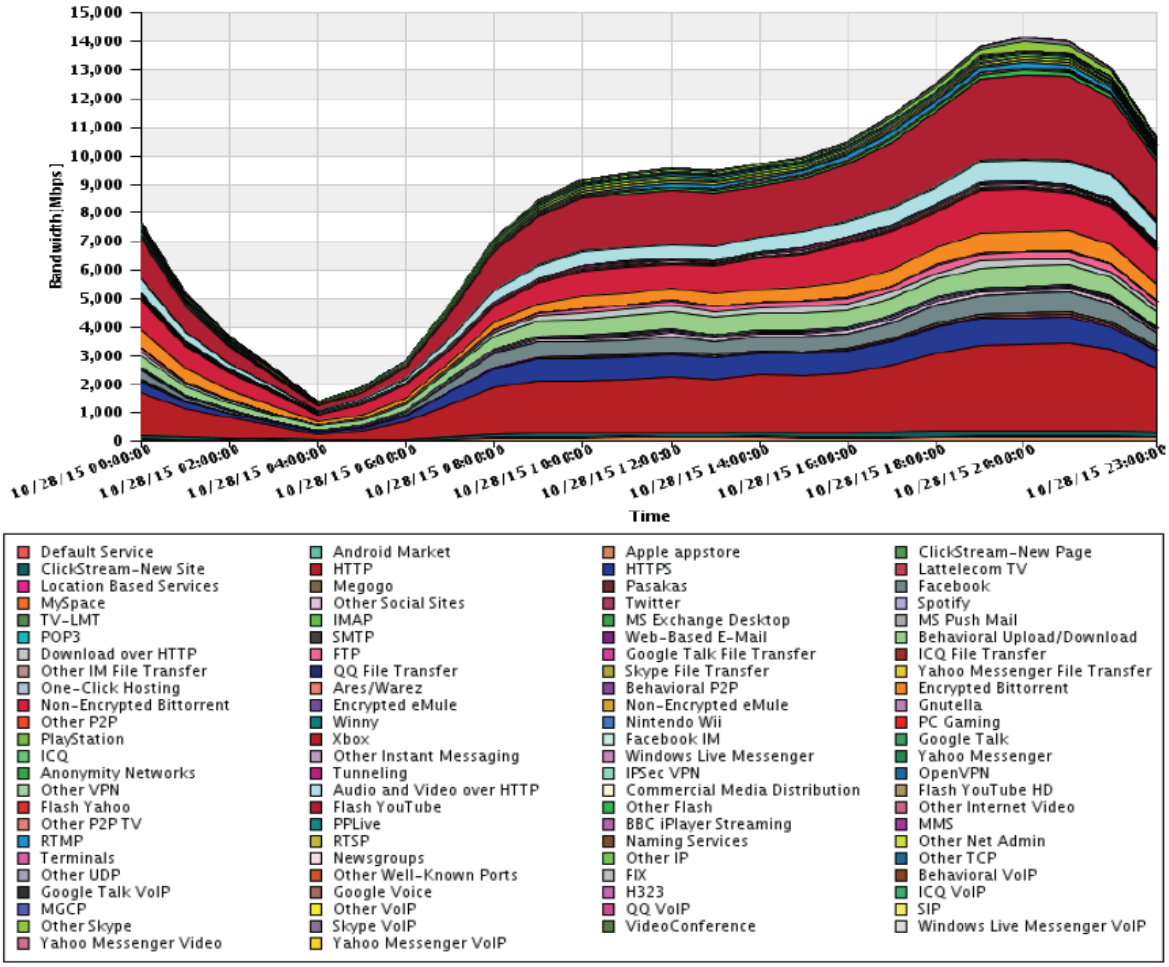
ir svarīgi interpretēt *QoS* nosacījumus nevis pēc principa „izpildās” / „neizpildās”, pārbaudot strikto, nevienādības formā uzrakstīto nosacījumu attiecībā uz *QoS* rādītāju, bet lietojot mēru vai pakāpi, ar kuru izpildās vai neizpildās dotais nosacījums. Ja *QoS* rādītājam ir jābūt ne mazākām par 0,9, tad vērtības 0,89999 gadījumā var pieņemt nepareizo lēmumu, klasificējot gadījumu kā *QoS* nosacījumus neapmierinošu. Otrkārt, lingvistiskās vērtības ir ļoti labs instruments stratēģisko lēmumu pieņemšanas sistēmas uzbūvei. Lēmumu pieņemšanas procedūras un kārtulas daudz vieglāk uzdot un izmantot, lietojot ieejas mainīgo un lēmuma pieņemšanas rādītāja lingvistiskās vērtības.

Nestriktā pieeja tiek izmantota darbā arī trafika klasifikācijai. Klasiskās klasifikācijas uzdevuma nostādne ir šāda. Ir pieejama apmācības kopa, kas ietver objektu piemērus. Katrs no šiem piemēriem pieder vienai no vairākām klasēm. Jautājums ir par mehānismu, kas ļaus klasificēt jaunus objektus, kas nepieder sākotnējai apmācības kopai. Nestriktās klasifikācijas gadījumā objektu piemēri no apmācības kopas var piederēt nevis vienai klasei, bet vairākām. Pie tam piederība attiecīgajām klasēm ir uzdota ar piederības pakāpēm. Jauna objekta klasifikācija nestriktā klasifikatora gadījumā notiek, ņemot par pamatu jauna objekta piederības pakāpes katrai no klasēm. Šim aspektam ir liela nozīme, kad klasificē trafika laikrindas, jo klasifikācijai izmanto laikrindas datus tikai par ierobežoto laika intervālu. Pie klasifikācijas ir jāņem vērā, ka tieši novērošanas intervālā trafika profils var mainīties, un līdz ar to trafiku var attiecināt uz divām klasēm, precizējot atbilstošās piederības pakāpes.

Otrā nodaļa

Mūsdienu telekomunikāciju tīkli pēc būtības apvieno divas „pasaules” — tālsarunu komunikācijas un IP-tīklus. Līdz ar to trafiks mūsdienu komunikāciju tīklos ir ļoti neviendabīgs neatkarīgi no tā, kādas tehnoloģijas (vadu vai bezvadu) ir izmantotas datu pārraidei. No homogēnā balss trafika modeļa tradicionālajos sakaru tīklos mēs pārgājām uz interneta un multimediju aplikāciju trafika neviendabīgo plūsmu, kuru var raksturot kā vairāku trafika klašu maisījumu. Interneta un multimediju aplikāciju trafika augošās popularitātes rezultātā trafika struktūra kļūst aizvien sarežģītāka. Multimediju trafikam ir tā saucamais „uzliesmojošais” (angļu valodā — *Burstiness*) raksturs. Aplikāciju pieprasījumi nav vienmērīgi „izkliedēti” sakaru sesijas laikā un dažādos laika intervālos ievērojami atšķiras: kādai no aplikācijām atbilstošais trafiks var pilnībā trūkt vai pienākt nelielā skaitā kādos laika intervālos, bet citos laika intervālos ļoti liels pieprasījumu skaits var novest līdz pārslodzei.

Pirmā tabula satur viena Latvijas telekomunikāciju uzņēmuma tīklā iegūto trafika datu novērtējumu. Joslas platuma vērtība (Mbps vienībās) un tās izmaiņas ir novērtētas pa trafika veidiem vienas diennakts laikā. Ir redzams, ka lielākais īpatsvars ir pārlūkošanas pieprasījumiem (angļu valodā — *Browsing*), interneta video trafikam, failu apmaiņai (angļu



1. att. Trafika sadalījums pa trafika veidiem pēc viena Latvijas uzņēmuma datiem.

1. tabula.

Trafika novērtējums diennakts laikā pēc viena Latvijas uzņēmuma datiem.

Trafika veids	Minimālā vērtība (Mbps)	Vidējā vērtība (Mbps)	Maksimālā vērtība (Mbps)	Izmaiņas attiecībā pret vidējo vērtību (%)
Pārlūkošana	374,00	3164,53	5315,26	12 % – 168 %
Interneta video	316,29	2429,25	4277,20	13 % – 176 %
Failu apmaiņas	565,67	2191,77	3468,88	26 % – 158 %
Balss un video zvani	10,52	162,32	479,51	6 % – 295 %
Aplikācijas	11,40	92,42	143,39	12 % – 155 %
Privātie virtuālie tīkli	38,20	81,88	111,67	47 % – 136 %
Tīkla administrēšana	13,19	69,60	119,30	19 % – 171 %
Tūlītējās ziņu apmaiņas	6,77	64,73	106,35	10 % – 164 %
Spēles	8,80	34,74	60,18	25 % – 173 %
E-pasts	4,63	27,94	54,27	17 % – 194 %
Definētie pakalpojumi	1,15	12,20	32,23	9 % – 264 %
Tirdzniecība	0,03	0,52	4,31	6 % – 828 %
Cits	61,52	152,14	214,28	40 % – 141 %

valodā — *File Sharing*), balss un video zvaniem. To skaitā ir gan trafiks ar ļoti augstām prasībām uz pārraides aizturēm (balss un video zvani, interneta video), gan uz caurlaidspēju jūtīgs trafiks bez īpašām prasībām attiecībā uz pārraides ātrumu. Tabulas pēdējā kolonnā katram trafika veidam ir aprēķināta izmaiņas amplitūda procentos attiecībā pret diennakts vidējo vērtību. Ir redzams, ka diennakts laikā katra veida pieprasījumu apjoms ļoti būtiski mainās, un var būt gan 10 reizes zemāks par vidējo vērtību, gan arī gandrīz 3 reizes augstāks nekā vidēji diennaktī. Izmaiņu dinamika pa diennakts stundām ir ilustrēta 1. att., kur katra trafika dati ir atspoguļoti grafiski ar trafika veidam atbilstošo krāsu.

Protams, *QoS* prasības trafika klasēm būtiski atšķiras un ir atkarīgas no aplikāciju veidiem. Balstoties uz *Cisco IOS QoS* programmatūras atbalstāmajiem *ToS* (servisa tips; angļu valodā — *Type of Service*) modeļiem, kā arī daudzu autoru pētījumos piedāvāto trafika klasifikāciju, darbā no sākuma tika aprakstītas divas trafika klases:

– uz aizturi jūtīgs trafiks *DST* (angļu valodā — *Delay Sensitive Traffic*);
– uz caurlaidspēju jūtīgs trafiks *TST* (angļu valodā — *Throughput Sensitive Traffic*).

Pirmo klasi veido trafiks, kas prasa nelielas caurlaides joslas pieejamību, bet tajā pašā laikā prasa garantēti drošu nepārtrauktu savienojumu un nepieļauj pakešu aiztures tīklā. Piemēram, tiešraides video trafiks, balss trafiks, kā arī multimediju telekonferenču trafiks pieprasa ļoti zemu aiztures līmeni. Šādu trafiku sauc arī par reālā laika trafiku (angļu valodā — *Real Time Traffic*). Otro klasi veido trafiks, kuru literatūrā sauc arī par elastīgo (angļu valodā — *Elastic Traffic*). Pie otrās klases attiecina, piemēram, *FTP* un *HTTP* trafiku, liela apjoma *P2P* failu pārsūtīšanu. Otrā tabula (kas tika izveidota, izmantojot *Cisco* informāciju [6]) satur izrēķināto abu trafika klašu īpatsvaru procentos laika posmā 2014.–2019. gads, ņemot vērā prognozes datus. Kā redzams, īpatsvaru attiecība būtiski mainās. Bet mūsu pētījuma kontekstā ir svarīgi, ka šis īpatsvars mainās arī īsākos laika intervālos.

2. tabula.

***TST* un *DST* klašu trafika īpatsvars 2014. – 2019. gadā (prognoze).**

	DST (uz aizturi jūtīgs trafiks)		*TST* (uz caurlaidspēju jūtīgs trafiks)	
	PB/mēnesī	Īpatsvars (%)	PB/mēnesī	Īpatsvars (%)
2014	21 651	64,45	11 943	35,55
2015	27 499	66,52	13 840	33,48
2016	36 504	70,05	15 606	29,95
2017	49 146	73,33	17 875	26,67
2018	66 288	76,61	20 233	23,39
2019	89 462	80,17	22 130	19,83

Lai nodrošinātu *QoS* prasības katrai trafika klasei vienotā multiservisa tīklā, tika aktīvi meklēti trafika vadības risinājumi. Darbā ir īsi aprakstītas divas standartizētas pieejas:

– *IntServ* (integrētie pakalpojumi; angļu valodā — *Integrated Services*);
– *DiffServ* (diferencētie pakalpojumi; angļu valodā — *Differentiated Services*).

Integrēto pakalpojumu modelis nodrošina pakalpojumu kvalitāti, garantējot nepieciešamo caurlaides joslas platumu ar resursu rezervēšanas mehānismu. Ņemot vērā to, ka šodien jebkurā brīdī internetā ir tūkstošiem trafika plūsmu, informācijas apjoms, kas būtu jāatbalsta maršrutētājiem, var būs pārmērīgi liels. Diferencēto pakalpojumu modelis ir ieviests, lai nodrošinātu nepieciešamos *QoS* rādītājus, pamatojoties uz trafika klasifikatoriem un apkalpošanas prioritātēm.

Neatkarīgi no trafika pārraides modeļa, lai nodrošinātu atšķirīgo trafika klašu datu pārsūtīšanu starp tīkla elementiem, garantējot katrai klasei nepieciešamos *QoS* rādītājus, ir jārisina kompleksa problēma. Trafika datu pārraides politikai ir vairāki mērķi:

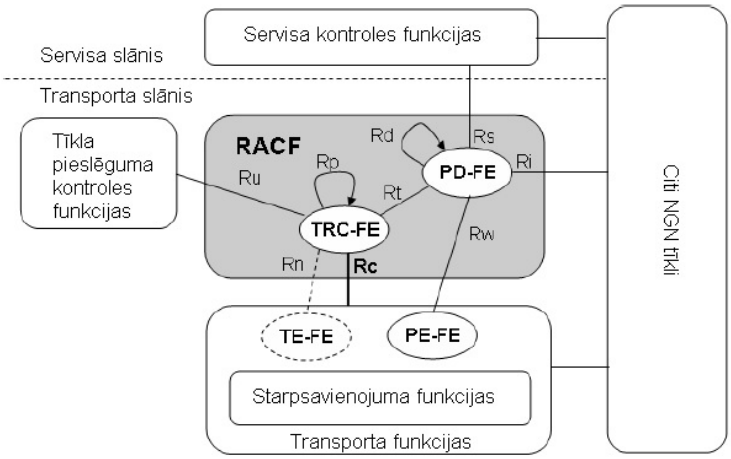
– atrast datu pārraides maršrutus, kas atbilst trafika klases *QoS* ierobežojumiem;
– atrast pārraides mehānismus, kas atbilst trafika klases *QoS* ierobežojumiem;
– nodrošināt efektīvu tīkla resursu izmantošanu trafika klašu konkurences apstākļos.

Viens no *QoS* prasību sekmīgas nodrošināšanas uzdevumiem ir dinamiski un adaptīvi sadalīt tīkla caurlaides joslu starp atšķirīgām trafika klasēm.

Promocijas darbs ir veltīts augstāk minētajam uzdevumam. Problēmas risināšanai tiek izmantota *DaVinci* pieeja [13], kas ir tīkla dinamiski adaptīva virtualizācijas tehnoloģija atšķirīgo trafika klašu nodrošināšanai vienā kopīgā pamattīklā, sadalot to pa paralēliem virtuāliem tīkliem. *DaVinci* pieeja ļoti atšķiras no *IntServ* apkalpošanas modeļa arhitektūras, kā arī no tradicionālajiem maršrutēšanas protokoliem. Var teikt, ka *DaVinci* modelis ir ieviests kā *DiffServ* apkalpošanas modeļa loģiskais turpinājums un ir nākamais solis salīdzinājumā ar *DiffServ* modeli. Ja *DiffServ* tehnoloģijas galvenais uzdevums ir nodrošināt trafika datu pārraidi balstoties uz *ToS* un *QoS* prasībām, tad *DaVinci* pieejas ietvaros ir risināts uzdevums par tīkla kopējās veiktspējas palielināšanu, vienlaicīgi arī „rūpējoties" par *QoS*-prasīgo aplikāciju apkalpošanas kvalitāti. Saskaņā ar *DaVinci* principiem, katrs virtuālais tīkls var būt ar savu maršrutēšanas politiku un datu pārraides protokolu atbilstoši trafika klasēm, kuras reālajās sistēmās var būt no divām līdz pat vairākiem desmitiem.

***NGN* tīklu kontekstā** caurlaides joslas sadales uzdevuma aktualitāte ir izskaidrojama arī ar to, ka *ITU-T* rekomendācija *Y.2111* (*Resource and admission control functions in next generation networks* [18]) nosaka tikai vispārējo arhitektūru resursu un piekļuves vadības *RACF* realizācijai (skat. 2. att. [18]). Viena no galvenajām *NGN* pazīmēm ir pakalpojumu un transporta funkciju atdalīšana, ļaujot tiem tikt piedāvātiem atsevišķi un attīstīties neatkarīgi. *RACF* atbalsta divu veidu resursu un piekļuves kontroles

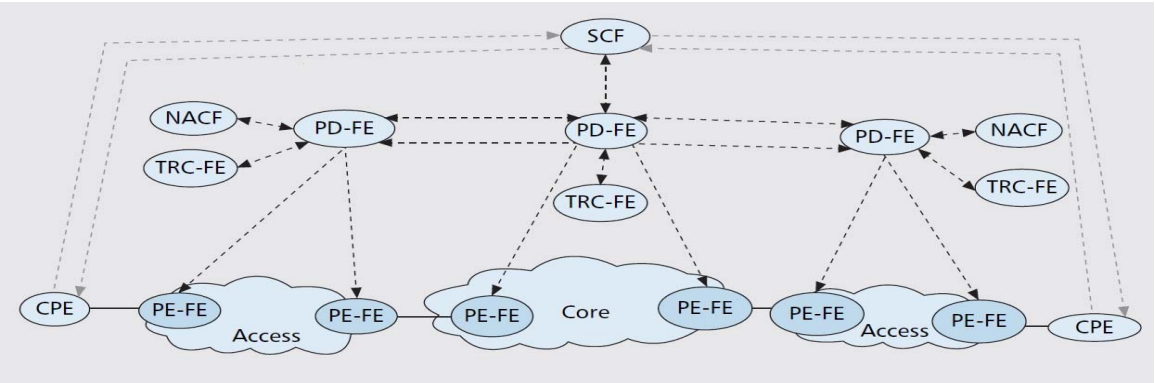
funkcijas un atbilstoši tam satur divus elementus: politikas lēmumu funkcionālo bloku *PD-FE* (angļu valodā — *Policy Decision Functional Entity*) un transporta resursu kontroles funkcionālo bloku *TRC-FE* (angļu valodā — *Transport Resource Control Functional Entity*).



2. att. *NGN* tīkla vispārējā arhitektūra resursu un atļauju vadībai.

Pateicoties šādai bloku (funkciju) *PD-FE* un *TRC-FE* atdalīšanai (skat. 3. att. [18]), *RACF* spēj atbalstīt dažādas piekļuves un pamattīklus (piemēram, fiksētie un mobilās piekļuves tīkli) lietojot vienu vispārējo resursu kontroles sistēmu. Blokā *PD-FE* jābūt nodrošinātai galīga lēmuma pieņemšanai par tīkla resursu piešķiršanu un kontroli, pamatojoties uz tīkla politikas noteikumiem, klienta-operatora līgumu *SLA* nosacījumiem un informāciju par pakalpojumiem. Tiek uzskatīts, ka politikas noteikumi, kurus izmanto *PD-FE*, ir uz pakalpojumiem balstīti, un tiek pieņemts, ka tie jānodrošina tīkla operatoriem.

Promocijas darba pētījuma priekšmets ir saistīts tieši ar bloku *PD-FE*, kura funkcijas ir vadīt tīkla resursus atkarībā no trafika klasēm un to *QoS* parametriem. Atzīmēsim, ka *ITU-T* rekomendācijā *Y.2111* [18] tiek standartizēti interfeisi *Rs*, *Rw*, *Rt*, *Rd* (2. att.), bet funkcionālie risinājumi ir atstāti katras kompānijas pārziņā.



3. att. Funkcionālo bloku funkciju atdalīšanas shēma *NGN* tīkla arhitektūrā.

Trafika klases. *QoS* šobrīd tiek uzskatīts par vienu no galvenajiem nākamās paaudzes tīkla koncepcijas elementiem. *ITU-T* rekomendācija *Y.1541* [16] definē *NGN* tīkla pakalpojumu kvalitātes (*QoS*) klases ar nosacījumiem attiecībā uz tīkla veiktspējas parametriem, kas aprēķināti IP pakešu pārraides procesā. Katra tīkla *QoS* klase ir definēta

ar īpašu veiktspējas parametru vērtību kombināciju. Jebkura pakešu plūsma, kas atbilst visiem *QoS* klases veiktspējas nosacījumiem, var tikt uzskatīta par pilnībā atbilstošu rekomendācijas normatīvajiem ieteikumiem atbilstošajai klasei. Šādas *QoS* klases atbalsta lietotāju plašu aplikācijas klāstu. Klases ir sagrupētas attiecībā uz vienvirziena IP pakešu aizturi, trīci, pakešu zudumu attiecību un pakešu kļūdas attiecību, kur paši parametri ir definēti *ITU-T* rekomendācijā *Y.1540* [15]. Promocijas darbs satur šādu parametru aprakstu: *IPTD* (IP paketes pārraides aizture; angļu valodā — *IP Packet Transfer Delay*), *IPDV* (IP paketes aiztures novirze; angļu valodā — *IP Packet Delay Variation*), *IPER* (IP pakešu kļūdu attiecība; angļu valodā — *IP Packet Error Ratio*), *IPLR* (IP pakešu zudumu attiecība; angļu valodā — *IP Packet Loss Ratio*).

ITU-T rekomendācijā *Y.1541* [16] augstāk definētie parametri tika ņemti par pamatu IP trafika plūsmu klasifikācijai atbilstoši pieprasījumam uz noteikto apkalpošanas kvalitātes līmeni. Tika definētas sešas apkalpošanas kvalitātes klases (*QoS* klases). Klases ir definētas ar viena vai vairāku parametru augšējo robežu uzdošanu. Piemēram, klase ar indeksu 0 atbilst ļoti interaktīvām aplikācijām un reālā laika trafika plūsmai, kas ir jutīga pret trīci. Nosacījumi attiecībā uz apkalpošanas kvalitāti ir šādi:

– *IPTD* rādītāja vidējā vērtība nepārsniedz 100 ms;
– *IPDV* rādītājs nepārsniedz 50 ms;
– *IPLR* rādītājs nepārsniedz 0,001;
– *IPER* rādītājs nepārsniedz 0,0001.

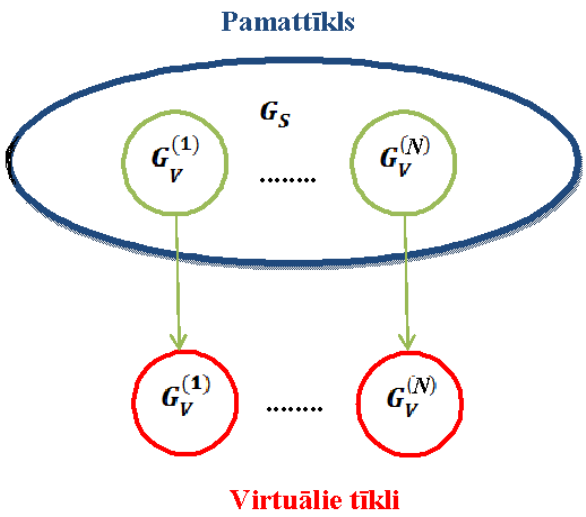
Savukārt klase ar indeksu 5 ir atvēlēta trafika plūsmas pakešu pārraidei bez nosacījumiem attiecībā uz veiktspējas parametru augšējām vērtībām. Nespecificētās klases trafika piemēros ir minētas tradicionālās IP tīklu aplikācijas. Informāciju par pārējām klasēm var atrast darbā.

Virtuālizācijas *DaVinci* modelis kā pamats interneta tīkla resursu vadībai tika piedāvāts sešu autoru 2008. gadā publicētajā pētījumā [13]. Kā jau tika atzīmēts, pamatideja ir nodrošināt veiktspējas garantijas atsevišķām aplikācijām ar atšķirīgām *QoS* prasībām, izolējot aplikācijām atbilstošos trafikus un izmantojot pieejamo resursu periodiskās pārdalīšanas mehānismus. Tīkla virtualizācija (skat., piemēram, *ITU* dokumentus [14], [17]) līdzīgi datoru virtualizācijai sadala jeb „sašķeļ" caurlaides joslu un maršrutētāju *CPU* un atmiņu starp atsevišķiem virtuāliem tīkliem. Šādu tīklu dizaina mērķis ir, sadalot fiziska tīkla pamatelementus virtuālajos mezglos (ar to *CPU*, atmiņu un citām aparatūras iespējām) un virtuālajos linkos ar trafikam pieskaņoto caurlaides joslu, spēt uzlabot pamattīkla kopējo resursu izmantošanu, pozitīvi ietekmējot tā kopējo veiktspēju. Speciālisti uzskata, ka vitualizācijas pieeja palīdzēs atrisināt daudzas ar tīkla funkcionēšanu saistītas problēmas.

Virtuālo tīklu vadība no resursu piešķiršanas viedokļa var tikt realizēta divos pamatveidos: statiskā un dinamiskā resursu sadale. Otrajā gadījumā, atšķirībā no statiskās

resursu sadales, starp paralēli eksistējošiem virtuālajiem tīkliem visā virtuālo tīklu pastāvēšanas laikā notiek periodiska resursu pārdalīšana atkarībā no tīklu noslodzes un pieprasījumu skaita. Šādu resursu pārdali literatūrā sauc par adaptīvo pārdali. Pamattīkla resursu periodiskās pārdalīšanās mērķis ir palielināt visa pamattīkla kopējo veiktspēju. Uzskata, ka virtuālo tīklu izolācija īsākos laika intervālos dod kopējās sistēmas stabilitāti, bet resursu adaptīvā pārdalīšanās ilgākos laika intervālos var garantēt sistēmas funkcionalitātes efektivitātes paaugstināšanu. Dinamiskā resursu sadale var palīdzēt sasniegt vēlamo resursu utilizāciju, kā arī izvairīties no trafika pārblīves, kas aizkavē pakešu pārsūtīšanu pašā pamattīklā, nelabvēlīgi ietekmē tā veiktspēju un var radīt pārraidāmās informācijas zudumus. Izanalizējot literatūru, rezumējam šīs pieejas priekšrocības: pamattīkla caurlaides joslas periodiskā pārdalīšana starp virtuālajiem tīkliem; virtuālo tīklu pārblīves un „tukšgaitas" mazināšana; pamattīkla utilizācijas paaugstināšana, optimizējot katra virtuālā tīkla caurlaides joslas resursu izmantošanu. Šeit ir vērts piebilst, ka augstāk minētās priekšrocības īstenosies tikai pie pamattīkla resursu sadales pareiza un efektīva mehānisma. Šajā pētījumā pirmo reizi tika apvienota spēļu teorijas koncepcija ar nestriktās loģikas teoriju, lai iesaistītu informācijas nenoteiktību caurlaides joslas sadales modelī. Rezultātā joslas piešķiršanai un dinamiskai pārdalei tika izstrādāta lēmumu pieņemšanas atbalsta sistēma *FuzDSS*, kuras aprakstam ir veltītas nākamās apakšnodaļas.

Tīkla *DaVinci* arhitektūras elementi. Pamattīkla *SN* (angļu valodā — *Substrate Network*) topoloģija ir uzdota ar grafu $G_S = (V_S, E_S)$, kur kopa V_S satur visus mezglus (angļu valodā — *Vertices*) un kopa E_S satur visus linkus (angļu valodā — *Links or Edges*). Mēs pieņemam, ka kopas E_S linki ir ar ierobežoto kapacitāti C_l (linki ir apzīmēti ar $l : l \in E_S$). Atbilstoši pamattīkla $G_S = (V_S, E_S)$ struktūrai mēs apskatām *DaVinci* modeli ar N virtuālajiem tīkliem *VN* (angļu valodā — *Virtual Network*), indeksētiem ar k, kur $k = 1, 2, ..., N$. Virtuālajiem tīkliem (skat. 4. att.) lietosim apzīmējumu



4. att. Pamattīkls *SN* ar vairākiem virtuālajiem tīkliem *VN*.

$$G_V^{(k)} = (V_V^{(k)}, E_V^{(k)}), \quad k = 1, 2, ..., N,$$

un ņemsim vērā, ka saskaņā ar *DaVinci* principiem:

$$V_S = V_V^{(k)}, \quad E_S = \bigcup_{k=1}^{N} E_V^{(k)} \text{ un } C_l = \sum_{k=1}^{N} C_l^{(k)} \text{ visiem } l \in E_S,\ k = 1, 2, ..., N,$$

kur $C_l^{(k)}$ ir virtuālā tīkla k linka l caurlaides joslas platums. Vienosimies arī par šādiem pamatapzīmējumiem virtuālajam tīklam k: $y^{(k)}$ — joslas caurlaide, $z^{(k)}$ — trafika apjoms, $\lambda^{(k)}$ — apmierinātības līmenis, $O^{(k)}$ — veiktspējas mērķa funkcija.

Virtuālajam tīklam k no pamattīkla puses katram linkam $l \in E_S$ tiek piešķirta joslas caurlaides vērtība, ņemot vērā tādu lokālo informāciju, kā pašreizējo apmierinātības līmeņa rādītāju un virtuālā tīkla mērķa funkcijas sasniegto vērtību. Piešķirtās caurlaides vērtības apraksta vektors $y^{(k)} = (y_l^{(k)})_{l \in E_S}$. Pamattīkls *SN* periodiski pārdala linku joslas caurlaides resursus starp virtuālajiem tīkliem, mainot $y^{(k)}$. Tātad lielumi $O^{(k)}$ un $\lambda^{(k)} = (\lambda_l^{(k)})_{l \in E_S}$ arī tiek periodiski atjaunoti un izmantoti, lai aprēķinātu kapacitātes $y^{(k)}$.

Šajā gadījumā, kad vairākas trafika klases paralēli tiek pārraidītas vienā pamattīklā, katrs virtuālais tīkls spēj kontrolēt tikai viņam piešķirto resursu daudzumu katrā mezglā un linkā. Tas nozīmē, ka īsākajā laika intervālā katrs virtuālais tīkls darbojas atbilstoši protokolam, kas maksimizē tā veiktspēju neatkarīgi no citiem virtuālajiem tīkliem un trafika klasēm. Ņemot vērā ierobežoto kapacitāti kopējai joslas caurlaides spējai, būtu svarīgi, bet īsajos laika posmos neiespējami, nodrošināt virtuālo tīklu kooperēšanos vienam ar otru ar mērķi optimizēt kopējo noslodzi. Pie šādiem nosacījumiem dinamiskajiem informācijas atjaunošanas un resursu pārdales mehānismiem ir ļoti liela loma pamattīkla kopējās veiktspējas optimizācijā.

Pamattīkla caurlaides joslas sadales problēma, pēc savas būtības, ir maksimizēšanas problēma kopējam mērķim ar specifiskiem nosacījumiem virtuālajos tīklos ar dažādām *QoS* prasībām (skat., piemēram, [13], [29]). Katrs virtuālais tīkls mēģina maksimizēt savu individuālo mērķa funkciju, tajā pašā laikā pamattīkla mērķis ir palielināt kopējās sistēmas efektivitāti, tas ir, maksimizēt visu virtuālo tīklu kopējo veiktspēju. Līdz ar to optimizācijas problēma [13], kuru risina pamattīkla līmenī, izskatās šādi.

$$\begin{aligned}
&\text{maksimizēt} && \sum_{k=1}^{N} w^{(k)} O^{(k)}(z^{(k)}, y^{(k)}) \\
&\text{pie nosacījumiem} && H^{(k)} z^{(k)} \le y^{(k)},\ k = 1,2,\ldots,N, \\
& && \sum_{k=1}^{N} y^{(k)} \le C, \\
& && g^{(k)}(z^{(k)}) \le 0,\ k = 1,2,\ldots,N, \\
& && z^{(k)} \ge 0,\ k = 1,2,\ldots,N, \\
&\text{kur mainīgie ir} && z^{(k)},\ y^{(k)},\ k = 1,2,\ldots,N.
\end{aligned}$$

Šeit $w^{(k)}$ ir svara koeficents, ko pamattīkls piešķir virtuālajam tīklam k, lai ietvertu lēmumu pieņemšanas modelī virtuālā tīkla svarīgumu salīdzinājumā ar citiem virtuālajiem tīkliem. Ja no pamattīkla viedokļa virtuālajam tīklam k ir lielāka prioritāte, tad svara koeficents $w^{(k)}$ var būt par kārtu augstāks salīdzinājumā ar citiem svara koeficentiem. Modelī ir iekļauti ierobežojumi uz virtuālo linku joslas

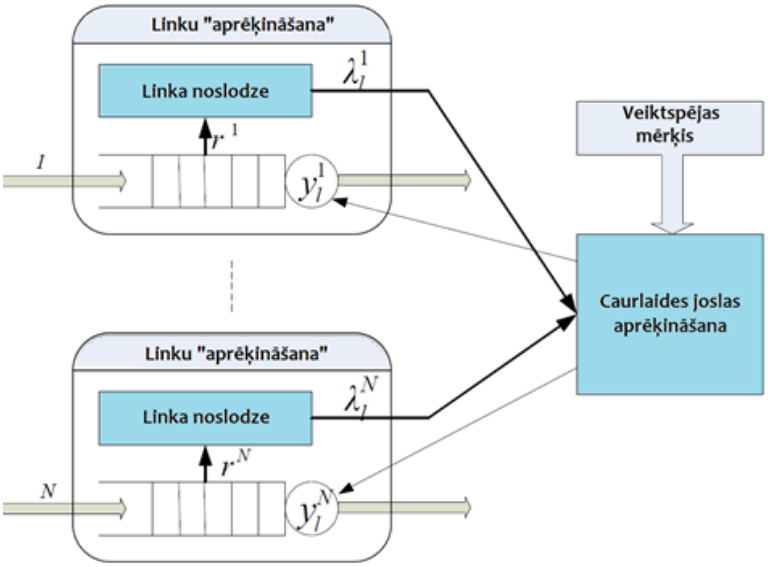
caurlaidspēju un citi iespējamie ierobežojumi, kas uzdoti lietojot apzīmējumu $g^{(k)}(z^{(k)})$. Starp citiem iespējamiem ierobežojumiem jābūt arī ierobežojumiem uz *QoS* parametru saglabāšanu pieļaujamās robežās. Lai aprēķinātu linku noslodzes $H^{(k)}z^{(k)}$, izmanto maršrutēšanas indeksus

$$H_{l\,j}^{(k)i} = \begin{cases} 1, & \text{ja maršruta posmā } j \text{ ar avotu } i \text{ virtuālajā tīklā } k \text{ ir izmantots links } l, \\ 0, & \text{citos gadījumos.} \end{cases}$$

un $z_j^{(k)i}$ (apraksta avota i trafika daudzumu, kas ir pārraidīts posmā j virtuālajā tīklā k).

Atzīmēsim šeit, ka vairāku iemeslu dēļ problēmas analītiskā nostādne nevar būt efektīvi izmantota, lai skaitliski atrisinātu caurlaides joslas resursu sadales uzdevumu. Pamattīkla līmenī var nebūt definētas vai atrunātas virtuālo tīklu mērķa funkcijas. Kā arī pamattīkla līmenī var nebūt informācijas par katra virtuālā tīkla maršrutēšanas politiku. Bet tajā pašā laikā analītiskā nostādne palīdz labāk saprast problēmas būtību.

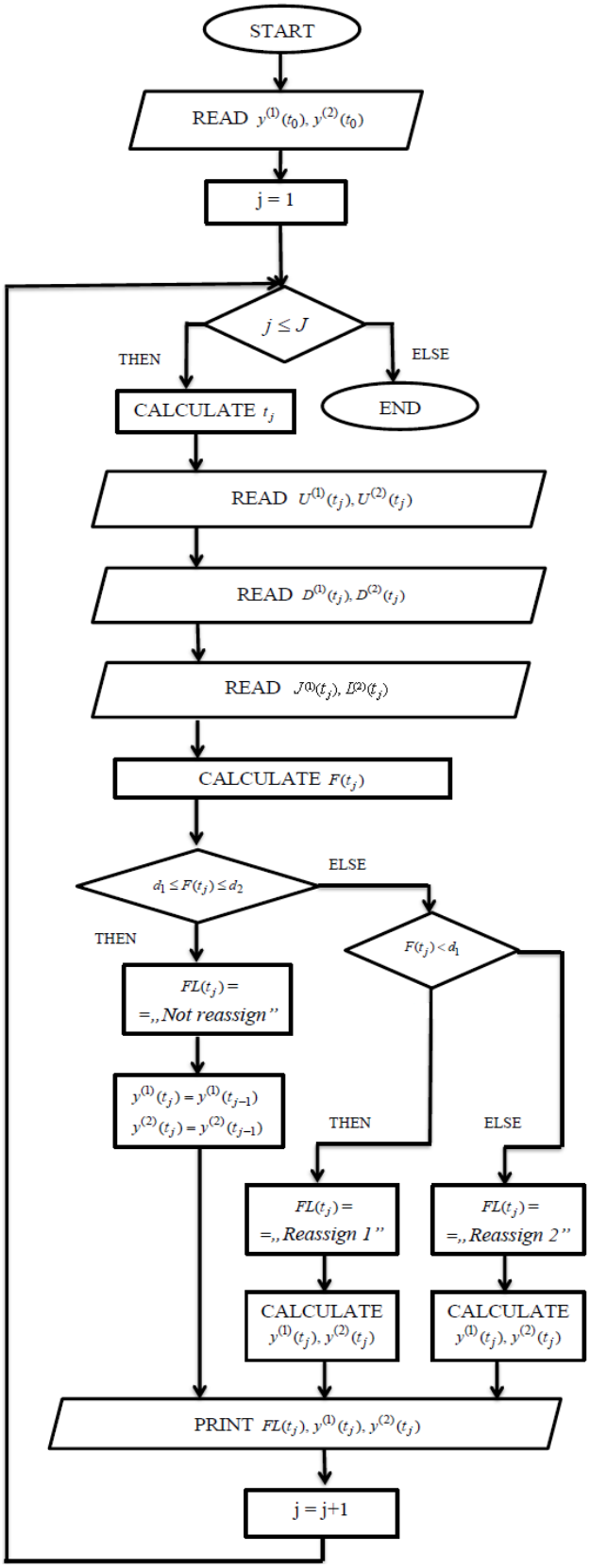
Optimizācijas shēma izriet no *DaVinci* modeļa principiem. Pirmkārt, pamattīkls *SN* noteiks, cik apmierināts ir katrs virtuālais tīkls ar viņam piešķirto joslas caurlaidi.



5. att. Caurlaides joslas pārdales shēma.

Apmierinātības līmenis $\lambda_l^{(k)}$ (katram linkam l un katram virtuālajam tīklam k) ir rādītājs, kas nosaka, vai virtuālais tīkls pieprasa vairāk resursus. Otrkārt, pamattīkls *SN* noteiks vēlamo joslas caurlaides apjomu virtuālajam tīklam k linkā l: pamattīkls palielina vai samazina vērtību $y_l^{(k)}$ atkarībā no apmierinātības līmeņa $\lambda_l^{(k)}$ un virtuālā tīkla prioritātes (skat. 5. att.). Ņemot vērā, ka katrs virtuālais tīkls darbojas neatkarīgi no pārējiem, jautājums ir vai visu virtuālo tīklu darbības shēma kopā ar adaptīvu resursu pārdali, kuru nodrošina pamattīkla līmenī, spēj nodrošināt kopējā tīkla augstu veiktspēju.

Uz nestriktās loģikas balstītas caurlaides joslas pārdales metodes pamatelementi. Darbs ir veltīts lēmumu pieņemšanai pamattīkla līmenī linka $l \in E_S$ caurlaides joslas sadalei starp virtuālajiem tīkliem $k = 1,2,...,N$. Apzīmēsim ar t_j, kur $j = 1,2,...$, sistēmas adaptēšanās laika momentus, t.i., momentus, kad notiek lēmumu pieņemšana attiecībā uz caurlaides joslas kapacitātēm $y_l^{(k)}(t_j)$ priekš $k = 1,2,...,N$. Šāds



6. att. Caurlaides joslas sadalei paredzētā lēmuma pieņemšanas procesa blokshēma.

lēmums balstās uz monitoringa rezultātiem par sistēmas darbības parametriem laika intervālā $\left[t_{j-1}, t_j\right]$ un iepriekš piešķirtajām vērtībām $y_l^{(k)}(t_{j-1}),\ k = 1, 2, \ldots, N$.

Mēs pieņemam, ka vērtības $y_l^{(k)}(t_0)$ priekš $k = 1, 2, \ldots, N$ ir dotas, un apskatām sistēmas darbību laikā $t \ge t_0$.

Pirmais solis nestriktās loģikas lēmumu pieņemšanas sistēmu konstruēšanā ir definēt nestriktos mainīgos. Piedāvātais uz nestriktās loģikas balstītais risinājums prasa trīs ieejas mainīgos katram linkam l un katrai trafika klasei k no šāda saraksta (atkarībā no trafika klases):

$U_l^{(k)}(t_j)$ — linka vidējā utilizācija;

$D_l^{(k)}(t_j)$ — vidējā pakešu aizture;

$J_l^{(k)}(t_j)$ — trīce virtuālajā linkā;

$L_l^{(k)}(t_j)$ — rindas garums virtuālajā linkā.

Šo mainīgo vērtības tiek novērtētas periodā $\left[t_{j-1}, t_j\right]$ un transformētas uz to lingvistiskajām vērtībām atbilstoši to piederības funkcijām. Ieejas mainīgie apraksta sistēmas stāvokli. Tos ņem vērā adaptācijas lēmuma pieņemšanā.

Ieejas mainīgo $U_l^{(k)}(t_j)$, $D_l^{(k)}(t_j)$, $J_l^{(k)}(t_j)$, $L_l^{(k)}(t_j)$ lingvistiskajām vērtībām mēs izmantojam šādus apzīmējumus: $LU_l^{(k)}(t_j)$, $LD_l^{(k)}(t_j)$, $LJ_l^{(k)}(t_j)$ un $LL_l^{(k)}(t_j)$.

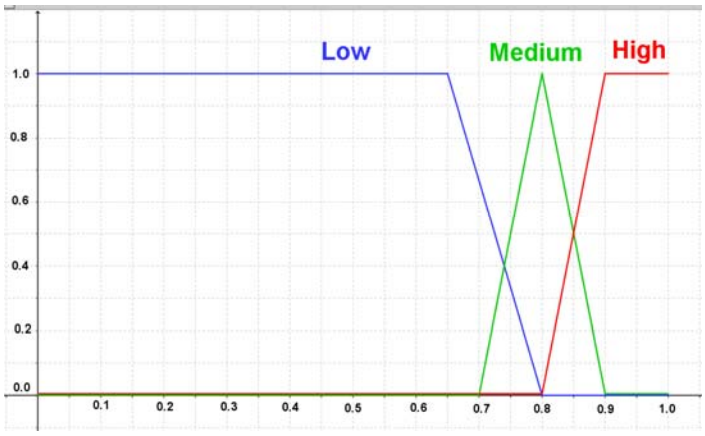
No sākuma mēs koncentrējamies uz diviem trafika veidiem: uz aizturi jūtīgs trafiks (mērķis ir samazināt vidējo aizturi) un uz caurlaidspēju jūtīgs trafiks (mērķis ir palielināt vidējo linka noslodzi). Mēs uzskatam, ka pirmais trafika veids atbilst klasei ar indeksu 0 saskaņā ar iepriekšējās apakšnodaļas klasifikāciju, bet otrais — atbilst klasei ar indeksu 5. Saskaņā ar *DaVinci* principiem, mēs apskatam divus virtuālos tīklus ($N = 2$) diviem trafika tipiem. Piedāvātais uz nestriktās loģikas balstītais risinājums prasa vienu izejas mainīgo katram linkam l, kas noteiks lēmumu par resursu pārdali laika momentā t_j: $F_l\ (t_j)$ ir *FIS* moduļa defazificēšanas procesa rezultātā iegūtā lēmuma pieņemšanas izejas parametra vērtība. Mēs izmantojam apzīmējumu $FL_l(t_j)$ šī mainīgā lingvistiskajai vērtībai.

Lēmuma pieņemšanas process linka līmenī var būt raksturots ar blokshēmu (skat. 6. att.). Lēmuma pieņemšanas sistēmu var uzdot ar šādiem sistēmas elementiem (skat., piemeram, [49], [52]):

– lingvistisko vērtību skaits;
– piederības funkcijas lingvistiskajām vērtībām katram ieejas un izejas mainīgajam;
– ieejas mainīgo fazificēšanas metode;
– izejas mainīgo defazificēšanas metode;
– *IF-THEN* kārtulu bāze;
– lēmumu pieņemšanas sistēmas tips.

Šajā pētījumā tika izmantota *COG* (gravitācijas centra) defazificēšanas metode. Mēs pielietojām uz nestriktās loģikas balstītu izvedumu tehniku [31], ko ieviesa profesors Mahmūds Mamdani (*Mahmood Mamdani*).

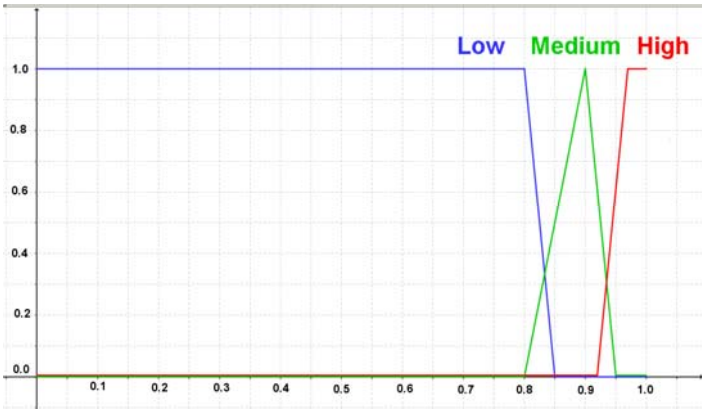
Visiem ieejas mainīgajiem mēs piešķīrām trīs lingvistiskās vērtības „*Low*", „*Medium*" un „*High*" (mēs izmantojam apzīmējums L, M un H kā indeksus).



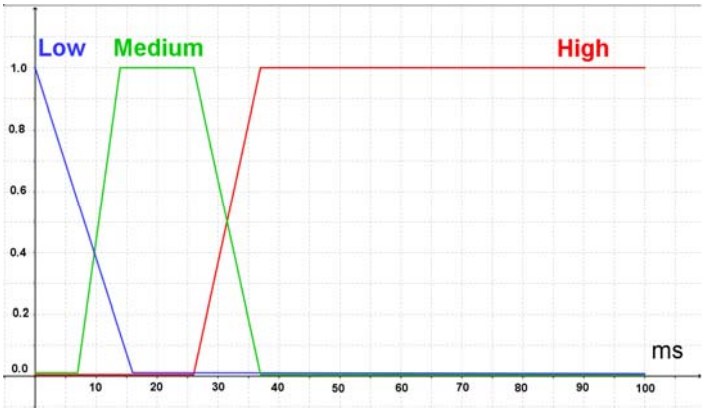
7. att. Piederības funkcijas lingvistiskajām vērtībām $U_{\mathrm{L}}^{(1)}, U_{\mathrm{M}}^{(1)}, U_{\mathrm{H}}^{(1)}$.

Izejas mainīgajiem lingvistiskās vērtības ir: „*Reassign* 1" (kas nozīmē, ka caurlaides joslas daļa palielinās pirmā veida trafikam un samazinās otrā veida trafikam), „*Not reassign*" un „*Reassign* 2" (mēs izmantojam apzīmējumus $R1$, NR un $R2$ kā indeksus).

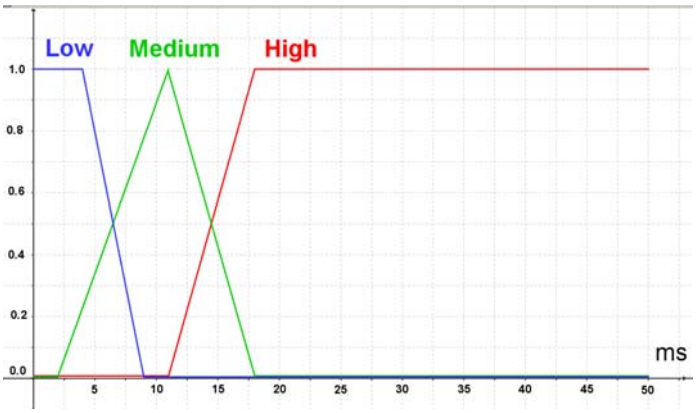
No mainīgo lingvistisko vērtību skaita ir lielā mērā atkarīgs *IF-THEN* kārtulu skaits



8. att. Piederības funkcijas lingvistiskajām vērtībām $U_{\mathrm{L}}^{(2)}, U_{\mathrm{M}}^{(2)}, U_{\mathrm{H}}^{(2)}$.



9. att. Piederības funkcijas lingvistiskajām vērtībām $D_{\mathrm{L}}^{(1)}, D_{\mathrm{M}}^{(1)}, D_{\mathrm{H}}^{(1)}$.



10. att. Piederības funkcijas lingvistiskajām vērtībām $J_{\mathrm{L}}^{(1)}, J_{\mathrm{M}}^{(1)}, J_{\mathrm{H}}^{(1)}$.

lēmumu pieņemšanas sistēmā *FIS*. Mainīgo lingvistisko vērtību skaita palielinājums noved pie *IF-THEN* kārtulu skaita būtiska pieauguma. Skaitlis 3 ir izvēlēts, ņemot vērā iepriekš teikto un ievērojot literatūrā izteiktās rekomendācijas.

Piederības funkcija katrai lingvistiskajai vērtībai ir uzdota kā trīsstūrveida vai trapeces veida nestrikts skaitlis. Tiek uzskatīts, ka tās piederības funkcijas nav atkarīgas no l un j. Tāpēc, indeksējot lingvistisko vērtību piederības funkcijas, ir atstāts tikai indekss k.

Piemēram, 7. att. satur noslodzes mainīgā $U^{(1)}$ lingvistisko vērtību $U_{\mathrm{L}}^{(1)}$, $U_{\mathrm{M}}^{(1)}$ un $U_{\mathrm{H}}^{(1)}$ piederības funkciju grafikus. Raksturojot pirmā virtuālā tīkla noslodzi, ir ņemts vērā, ka ļoti liela noslodzes vērtība uz aizturi jūtīgam trafikam var novest pie kvalitātes līmeņa pazeminināšanās attiecībā gan uz trīci, gan uz aizturi. Ir uzskatīts, ka noslodzei jābūt ap 80 %, raksturojot šādu noslodzi kā „*Medium*" lingvistisko vērtību kontekstā. Bet otrā virtuālā tīkla noslodzes palielināšana ir uzskatīta par virtuālā tīkla mērķi, līdz ar to līmenis „*High*" (skat. 8. att.) šeit ir uzskatīts par optimālo. Atzīmēsim arī, ka līmenis „*High*" otrā veida trafika plūsmas pārraidei atšķiras no līmeņa „*High*" pirmajā virtuālajā tīklā. Apsvērumus attiecībā uz pārējo piederības funkciju (piemērus var redzēt arī 9.–10. att.) uzdošanu var atrast darbā.

Zināšanu bāze, kas balstās tikai uz ekspertu zināšanām, piedāvātajam algoritmam ir veidota kā *IF-THEN* kārtulu bāze un sastāv no šādām kārtulām:

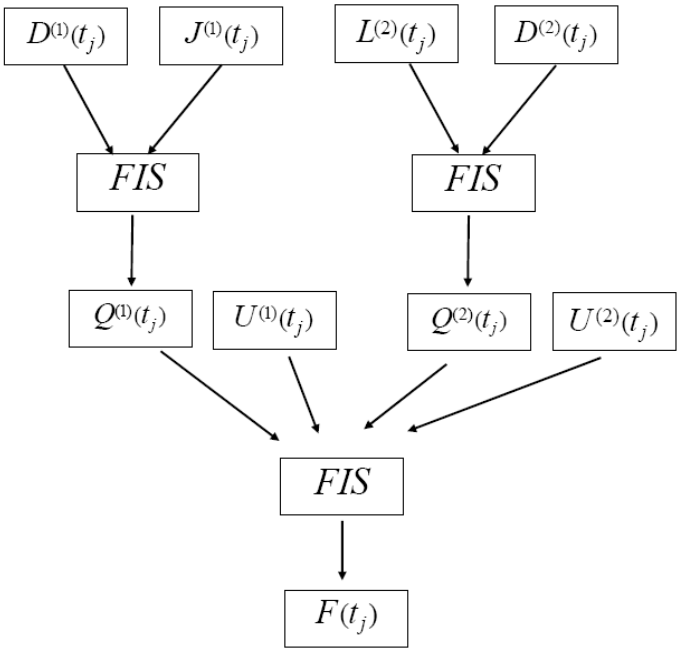
– if $UL^{(1)} = "Medium"$ and $DL^{(1)} = "Low"$ and $JL^{(1)} = "Low"$ and $UL^{(2)} = "High"$ and $LL^{(2)} = "Low"$ and $DL^{(2)} = "Low"$, then $FL = "Not\ reassign"$;

– if $UL^{(1)} = "Medium"$ and $DL^{(1)} = "Medium"$ and $JL^{(1)} = "High"$ and $UL^{(2)} = "Medium"$ and $LL^{(2)} = "Medium"$ and $DL^{(2)} = "Medium"$, then $FL = "Reassign\ 1"$;

– if $UL^{(1)} = "Medium"$ and $DL^{(1)} = "Medium"$ and $JL^{(1)} = "Low"$ and $UL^{(2)} = "Medium"$ and $LL^{(2)} = "Low"$ and $DL^{(2)} = "Medium"$, then $FL = "Not\ reassign"$, … .

Nestriktās loģikas kārtulu bāzes ir atkarīgas no trafika tipa un tās var mainīties. To modifikācijas iespējas tika izanalizētas simulācijas eksperimentu procesā.

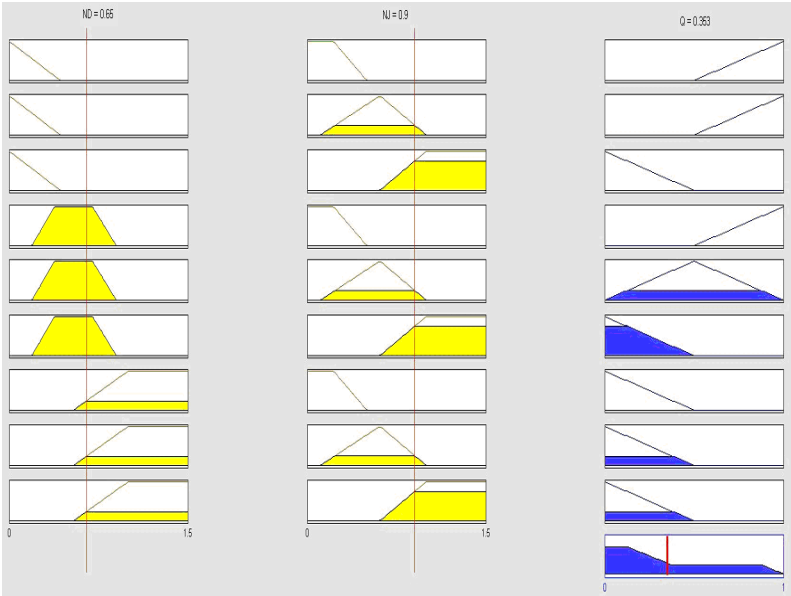
Augstāk aprakstītās sistēmas *FIS* tehniskā realizācija darba izstrādes gaitā tika vienkāršota ar mērķi samazināt izmantoto *IF-THEN* kārtulu skaitu (var viegli aprēķināt, ka pirms modificēšanas *IF-THEN* kārtulu bāze tika veidota no 729 kārtulām). Tika īstenota hierarhiskā lēmuma pieņemšanas sistēma, izmantojot *QoS* rādītāju kā nestrikto palīgmainīgo: $Q_l^{(k)}(t_j)$ — *QoS* mainīgais vituālajam linkam l un trafika klasei k, kas ir novērtēts laika intervālā $\left[t_{j-1}, t_j\right]$, ar lingvistiskajām vērtībām $LQ_l^{(k)}(t_j)$. Darbā mēs izmantojām palīgmainīgajam trīs lingvistiskās vērtības: „Izpildās”, „Nosacīti izpildās” un „Neizpildās” ar indeksiem Y, YN un N attiecīgi. Uz aizturi jutīgam trafikam tika izmantotas visas trīs lingvistiskās vērtības: $Q_{\mathrm{Y}}^{(1)}$, $Q_{\mathrm{YN}}^{(1)}$, $Q_{\mathrm{N}}^{(1)}$.

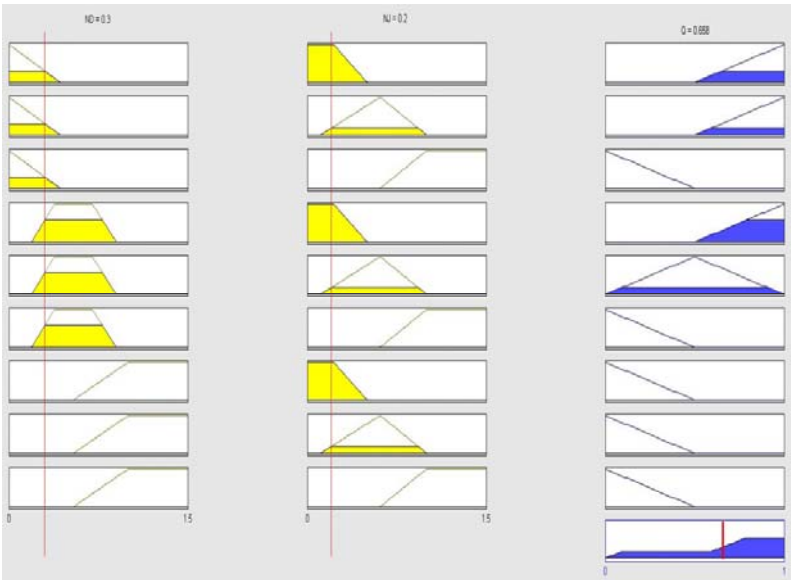


11. att. Lēmuma pieņemšanas hierarhiskā *FIS* shēma.

Bet uz caurlaidspēju jutīgam trafikam, kuram nav tik strikti ierobežojumi, tika izmantotas tikai divas lingvistiskās vērtības: $Q_{\mathrm{Y}}^{(2)}$, $Q_{\mathrm{N}}^{(2)}$.

Šādas hierarhiskās lēmuma pieņemšanas sistēmas darbības shēma ir redzama 11. attēlā. Sistēma balstās uz 3 izveduma procedūrām *FIS*. Pirmajā līmenī (etapā) ir izmantotas divas sistēmas *FIS*, katra ar diviem ieejas mainīgajiem un vienu izejas mainīgo. Sistēmu darbībai tika izmantotas *FAM* tabulas (skat. 3. un 4. tab.). Pimās sistēmas *FIS* darbība ir ilustrēta

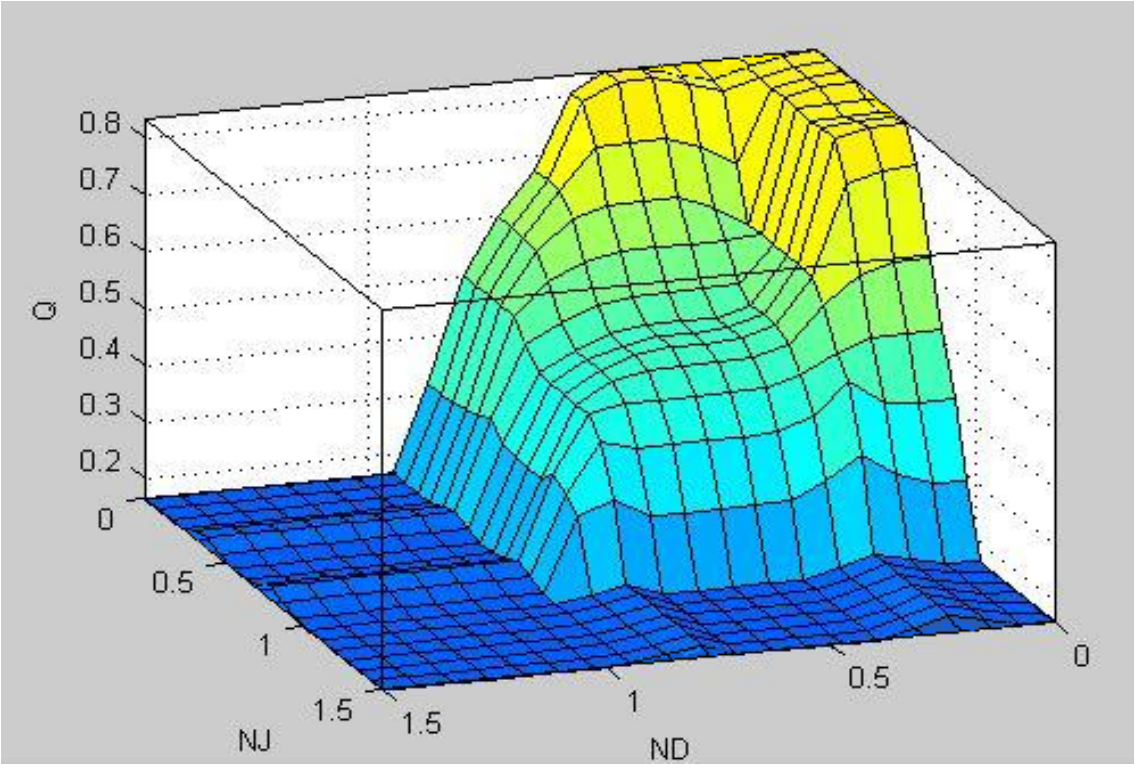




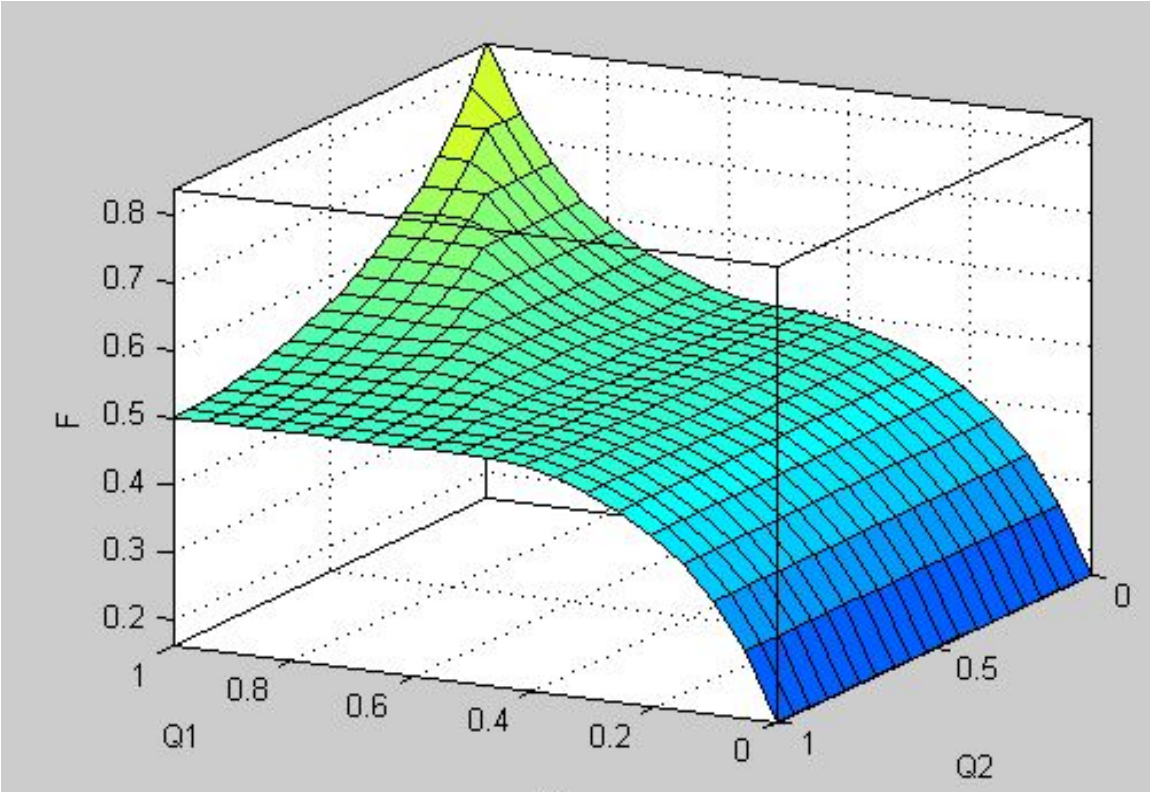
12. att. Izejas *QoS* parametra vērtības aprēķināšana saskaņā ar *FIS* kārtulām.

12. un 13. attēlā. Pirmais no attēliem satur izejas *QoS* parametra $Q^{(1)}(t_j)$ aprēķināšanas shēmu saskaņā ar sistēmas *FIS* kārtulām, lietojot fazificēšanas un gravitācijas centra defazificēšanas procedūras. Otrais attēls satur lēmuma pieņemšanai uzkonstruēto virsmu saskaņā ar sistēmas *FIS* kārtulām. Atzīmēsim, ka mainīgo $D^{(1)}(t_j)$ un $J^{(1)}(t_j)$ lingvistisko vērtību piederības funkcijas ir normētas un aizvietotas atbilstoši ar $ND^{(1)}(t_j)$ un $NJ^{(1)}(t_j)$. Mēs pielietojam normēšanas procedūru, lai panāktu lēmumu pieņemšanas atbalsta sistēmas neatkarību no konkrētām kvalitātes rādītāju augšējām robežām 100 ms un 50 ms, kā arī no pielietotā koeficienta pārejai no tīkla uz linka līmeni.

Lēmuma pieņemšanas otrajā etapā ir izmantota viena *FIS* izveduma procedūra ar četriem ieejas mainīgajiem un vienu izejas mainīgo. *IF-THEN* kārtulu bāze tiek uzdota ar *FAM* tabulu (5. tab.). Šoreiz mēs nevaram runāt par lēmumu pieņemšanai uzkonstruēto virsmu, jo ir iesaistīti 5 mainīgie. Vienu šādu piemēru var redzēt 14. attēlā. Piemērs atbilst divu mainīgo fiksētām vērtībām: $U^{(1)} = U^{(2)} = 0{,}5$. Darba pielikumi satur virsmu, kā arī lēmuma pieņemšanas parametra $F(t_j)$ aprēķināšanas piemērus.



13. att. Lēmuma pieņemšanai uzkonstruētā virsma mainīgo $D^{(1)}, J^{(1)}, Q^{(1)}$ telpā.



14. att. Lēmuma pieņemšanai uzkonstruētā virsma mainīgo $Q^{(1)}, Q^{(2)}, F$ telpā pie fiksētām vērtībām $U^{(1)}, U^{(2)}$.

3. tabula.

***FAM* tabula *QoS* rādītājam uz aizturi jūtīgam trafikam.**

$D^{(1)}$ / $J^{(1)}$	*Low*	*Medium*	*High*
Low	*Y*	*Y*	*N*
Medium	*Y*	*YN*	*N*
High	*N*	*N*	*N*

4. tabula.

***FAM* tabula *QoS* rādītājam uz caurlaidspēju jūtīgam trafikam.**

$L^{(2)}$ / $D^{(2)}$	*Low*	*Medium*	*High*
Low	*Y*	*Y*	*Y*
Medium	*Y*	*Y*	*N*
High	*Y*	*N*	*N*

5. tabula.

***FAM* tabula lēmuma atbalsta sistēmas izejas mainīgajam.**

$Q^{(1)}, Q^{(2)}$ / $U^{(1)}, U^{(2)}$	*N, N*	*N, Y*	*YN, N*	*YN, Y*	*Y, N*	*Y, Y*
Low, Low	*R*1	*R*1	*NR*	*NR*	*R*2	*NR*
Low, Medium	*R*1	*R*1	*NR*	*NR*	*R*2	*NR*
Low, High	*R*1	*R*1	*NR*	*NR*	*R*2	*NR*
Medium, Low	*R*1	*R*1	*NR*	*NR*	*R*2	*NR*
Medium, Medium	*R*1	*R*1	*NR*	*NR*	*R*2	*NR*
Medium, High	*R*1	*R*1	*NR*	*NR*	*NR*	*NR*
High, Low	*R*1	*R*1	*R*1	*R*1	*R*1	*R*1
High, Medium	*R*1	*R*1	*R*1	*R*1	*R*1	*R*1
High, High	*R*1	*R*1	*NR*	*R*1	*NR*	*NR*

Spēļu teorijas principu izmantošana *FuzDSS* vairāku trafiku gadījumā. Spēļu teorija ir rīks, ko izmanto, lai modelētu un analizētu spēlētāju (mūsu gadījumā — lēmumu pieņēmēju) konfliktus un sadarbības iespējas. Šīs situācijas rodas, kad vairāki lēmumu pieņēmēji ar dažādiem mērķiem darbojas vienā sistēmā ar kopīgiem resursiem. Atbilstoši *DaVinci* principiem virtuālajam tīklam nav zināšanu par citu virtuālo tīklu apstākļiem un tie nevar sadarboties viens ar otru. Katrs virtuālais tīkls darbojas patstāvīgi, lai optimizētu savu darbības shēmu. Šis fakts motivēja izmantot spēļu teorijas pieeju lēmumu pieņemšanā par joslas resursu sadalījumu. Daudzi zinātnieki ir izmantojuši spēļu teoriju, lai modelētu dažādus ar tīklu saistītus lēmumu pieņemšanas procesus (skat., piemēram, [12], [34], [64]). Literatūras analīze dod mums cerību, ka spēļu teorijas idejas palīdzēs vienkāršot dažādu spēlētāju mijiedarbības analīzi un tikt galā ar problēmu par tīkla resursu sadali starp virtuālajiem tīkliem. Taču klasiskās spēļu teorijas pieeja nespēs nodrošināt efektīvu lēmumu pieņemšanu nestriktajos apstākļos, kas dominē mūsdienīgajos tīklos. Mēs pielietojam nestriktu spēļu modeli, kas tika ieviests F. O. Oderanti darbos [42]–[43] biznesa procesu analīzei.

Lietojot stratēģiskās spēles, var modelēt spēlētāju (virtuālo tīklu vai lietotāju) konkurenci. Par pamattīkla linka caurlaides joslas ierobežotu platumu sacenšas vairāki virtuālie tīkli. Mūsu modelī mēs iekļaujam nekooperatīvo *N* spēlētāju (virtuālo tīklu) spēli ar lēmumu pieņemšanas brīžiem t_j, $j = 1,2, \ldots$. Katra virtuālā tīkla k stratēģija linkā l laika momentā t_j ir lēmums par to, vai virtuālajam tīklam k ir nepieciešami vairāk linka l resursi laika intervālā $\left[t_j, t_{j+1}\right]$ vai nē. Joslas platuma pārdale (joslas platuma daļas $y_l^{(k)}(t_j)$, kur $k = 1,2,\ldots,N$) ir atkarīga no visu virtuālo tīklu izvēlētajām stratēģijām.

Svarīgs spēļu klasifikācijas faktors ir informācija, kas spēlētājiem ir pieejama, kad viņi izvēlas stratēģijas. Vienkāršākās spēles ir tās, kurās dalībniekiem ir pilna informācija. Tas nozīmē, ka jebkurā brīdī spēlētājiem ir zināms viss, kas spēlē ir noticis līdz šim. Taču mēs apskatām spēli, kurā virtuālajiem tīkliem nav zināms viss, kas spēles laikā noticis līdz brīdim, kad tiek pieņemts konkrētais lēmums par turpmāko spēlētāja rīcību (šādas spēles tiek klasificētas kā spēles ar nepilnu informāciju). Ir pieņemts, ka momentā t_j spēlētājam k attiecībā uz laika intervālu $\left[t_{j-1}, t_j\right]$ ir informācija tikai par virtuālā tīkla k darbības rādītājiem. Spēles ar nepilnu informāciju var modelēt, balstoties uz nestriktās loģikas sistēmām. Mēs pielietojam nestrikto spēļu teorijas pieeju, iekļaujot modelī nestriktos spēlētājus, kas izmanto nestriktās loģikas kārtulas, lai pieņemtu stratēģiskos lēmumus spēles gaitā. Šāda lietišķo spēļu vispārināšana tika ieviesta un sekmīgi pielietota biznesa administrēšanā (skat. [42]–[43]).

Darbā ir izmantots atkārtotās spēles modelis. Tas ir īpašs dinamiskās spēles gadījums, kad spēlētāji mijiedarbojas, spēlējot līdzīgus spēles etapus vairākas reizes. Spēles etaps $S_l(t_j)$ linkam $l \in E_s$ tiek aprakstīts ar vektoru

$$S_l(t_j) = (\, y_l^{(k)}(t_j),\ P_l^{(k)}(t_j) \mid\ k = 1,2,\ldots,N\,),$$

kur $y_l^{(k)}(t_j)$ raksturo caurlaides joslas platuma vērtību virtuālajam tīklam k laika momentā t_j, un $P_l^{(k)}(t_j)$ dod spēles iznākuma vērtību virtuālajam tīklam k, kas tiek novērtēta laika intervālā $\left[t_{j-1}, t_j\right]$ atbilstoši visu virtuālo tīklu stratēģijām etapā $S_l(t_{j-1})$, $k = 1,2,\ldots,N$, $j = 1,2,\ldots$. Spēles sākotnējā etapā $P_l^{(k)}(t_0) = 0$, $k = 1,2,\ldots,N$, bet vērtības $y_l^{(k)}(t_0)$, $k = 1,2,\ldots,N$, atbilst joslas platuma sadalījumam laika momentā t_0. Mēs pieņemam, ka sākuma stadijā visi virtuālie tīkli izvēlas stratēģiju „*Constant*" (protams, ir iespējams ņemt vērā arī virtuālo tīklu specifiskas stratēģijas izvēli jau sākotnējā stadijā). Tas nozīmē, ka pirmajā laika intervālā $[t_0, t_1]$ caurlaides joslas platuma sadalījums būs vienmērīgs.

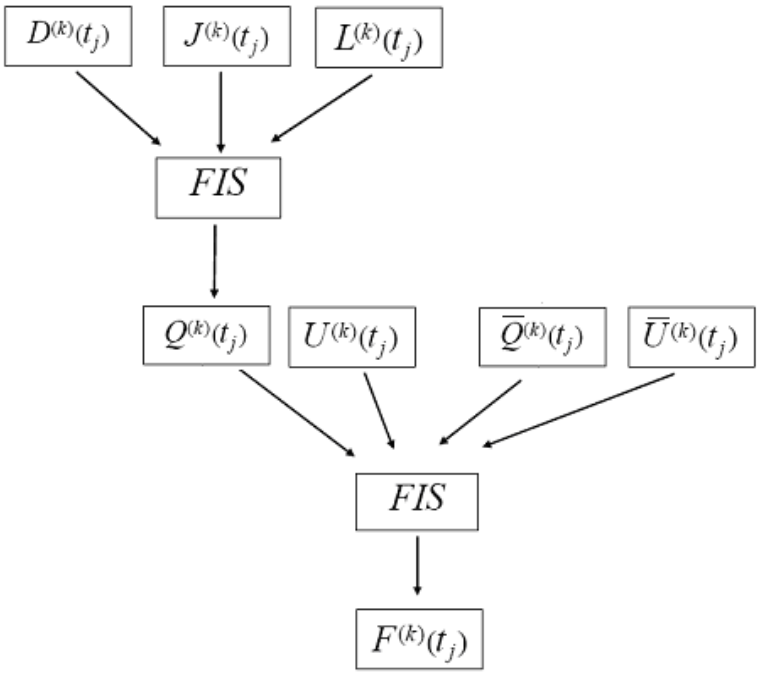
Ir pieņemts, ka visi virtuālie tīkli pieņem stratēģisko lēmumu balstoties uz *FIS* sistēmas darbības rezultātā iegūtās lēmuma parametra vērtības. Katram virtuālā tīkla k

linkam l laika momentā t_j ir izmantots viens *FIS* nestriktais izejas mainīgais — stratēģijas parametrs $F_l^{(k)}(t_j)$ ar lingvistiskajām vērtībām: „*More*" (tas nozīmē, ka attiecīgais virtuālais tīkls vēlas vairāk caurlaides joslas platuma resursus), „*Constant*" un „*Less*" (tas nozīmē, ka attiecīgais virtuālais tīkls vēlas mazāk joslas platuma resursus). Lai panāktu lēmuma pieņemšanas sistēmas efektivitāti, jāapraksta spēles noteikumi, kas motivētu individuālos lietotājus izvēlēties sociāli atbildīgo stratēģiju. Spēles iznākuma $P_l^{(k)}(t_j)$ aprēķināšanai izmanto trīs komponentes:

$$P_l^{(k)}(t_j) = V_l^{(k)}(t_j) - E_l^{(k)}(t_j) - W_l^{(k)}(t_j),$$

kur ar $V_l^{(k)}(t_j)$ tiek uzdota virtuālā tīkla k mērķa funkcija, $E_l^{(k)}(t_j)$ ir cenu veidošanas komponente un $W_l^{(k)}(t_j)$ apraksta ar nenoslodzi saistīta soda izmaksas virtuālajam tīklam k laika intervālā $\left[t_{j-1}, t_j\right]$ un linkā l. Iznākuma funkcijas interpretācija nozīmē lietderības vērtības un izmaksu starpību.

Saskaņā ar mūsu pieeju visi virtuālie tīkli izmanto lēmumu pieņemšanas sistēmu, lai pieņemtu stratēģisko lēmumu par nepieciešamību mainīt iepriekš piešķirto caurlaides joslu. Kā tika aprakstīts iepriekš, katrs virtuālais tīkls ir uzskatāms par nestrikto spēlētāju, kas piemēro nestrikto *FIS* tehniku, lai pieņemtu lēmumus (skat. 15. att.). Piedāvātais risinājums izmanto katram virtuālajam tīklam k vienu izejas mainīgo, kas nosaka uz nestriktās loģikas balstītu lēmumu par tā stratēģiju laika momentā t_j: $F_l^{(k)}(t_j)$. Defazificētā izejas vērtība 0,5 atbilst stratēģijai „*Constant*", minimālā vērtība atbilst stratēģijai „*Less*", un maksimālā vērtība atbilst stratēģijai „*More*".



15. att. Spēlētāja k stratēģijas izvēles atbalsta sistēma.

Lēmuma pieņemšanas atbalsta sistēma ir hierarhiska. Pirmajā etapā katram virtuālajam tīklam k sistēma *FIS* ir izmantota, lai novērtētu *QoS* parametra $Q_l^{(k)}(t_j)$ vērtību. Kā ieejas mainīgie tiks izmantoti divi mainīgie no saraksta $D_l^{(k)}(t_j)$, $J_l^{(k)}(t_j)$,

$L_l^{(k)}(t_j)$. Mainīgo izvēle ir atkarīga no trafika klases. Lēmuma pieņemšanai pirmajā etapā tiks izmantota pēc 3. tab. parauga veidotā *FAM* tabula visām trafika klasēm ar numuriem no 0 līdz 4, bet trafika klasei ar numuru 5 — *FAM* no 4. tabulas. Tikai otrajā etapā tiks īstenota spēlētāja stratēģijas izvēle. Virtuālais tīkls izvēlas stratēģiju, kas izriet no pieņēmuma, ka visi virtuālie tīkli, kas atbilst trafika klasēm ar augstāko prioritāti, veido koalīciju, un vērā ir ņemami šādu virtuālo tīklu agreģētie rādītāji $\overrightarrow{Q}_l^{(k)}(t_j)$ un $\overrightarrow{U}_l^{(k)}(t_j)$. Lēmuma pieņemšanā otrajā etapā ir izmantoti 4 ieejas mainīgie un viens izejas mainīgais, un lēmuma pieņemšanas shēma ne ar ko principiāli neatšķiras no iepriekšējā apakšnodaļā aprakstītās (skat. 11. un 15. att.). Kad visi lēmuma pieņemšanas parametri ir atrasti un pārbaudīti attiecībā pret nosacījumu

$$F_l^{(k)}(t_j) \le d_1 \text{ vai } F_l^{(k)}(t_j) \ge d_2,$$

tiks pieņemts lēmums par resursu pārdali. Atzīmēsim, ka resursus nepārdala, ja nosacījums nevienam virtuālajam tīklam neizpildās. Caurlaides joslas sadale $y_l^{(k)}(t_j),\ k=1,2,...,N,$ starp visiem virtuālajiem tīkliem spēles etapā $S_l(t_j)$ tiks izvēlēta proporcionāli pieprasītajām vērtībām $b_l^{(k)}(t_j),\ k=1,2,...,N,$ kas tiek aprēķinātas pēc formulas:

$$b_l^{(k)}(t_j) = y_l^{(k)}(t_{j-1})\ (1+0,2(2F_l^{(k)}(t_j)-1)).$$

Šī formula realizē mūsu politiku: pieprasītā vērtība nedrīkst atšķirties no iepriekšējās vairāk nekā par 20 procentiem. Ņemot vērā visas pieprasītās vērtības, jauns caurlaides joslas sadalījums $y_l^{(k)}(t_j),\ k=1,2,...,N,$ tagad tiks aprēķināts šādi:

$$y_l^{(k)}(t_j) = b_l^{(k)}(t_j),\ \text{ja}\ \sum_{k=1}^{N} b_l^{(k)}(t_j) \le C_l;\ y_l^{(k)}(t_j) = C_l\, b_l^{(k)}(t_j) : \sum_{i=1}^{N} b_l^{(i)}(t_j),\ \text{ja}\ \sum_{k=1}^{N} b_l^{(k)}(t_j) > C_l.$$

Tagad ir aprakstītas spēles etapa $S_l(t_j)$ visas komponentes. Piešķirtās vērtības $y_l^{(k)}(t_j)$, $k=1,2,...,N,$ tiks piemērotas nākamajā laika intervālā $\left[t_j, t_{j+1}\right]$. Tajā brīdī mēs sāksim spēles nākamo etapu $S_l(t_{j+1})$.

Modeļa ierobežojumi. Pirmkārt, veidojot lēmumu pieņemšanas sistēmu caurlaides joslas sadalei, par pamatu tika ņemti divi veiktspējas rādītāji *IPTD* un *IPDV*. Trafika pakešu zuduma līmeņa rādītājs *IPLR* tiešā veidā netika izmantots lēmuma pieņemšanas procesā. Eksperimentālais modelis ir uzbūvēts tā, ka trafika paketes netika atmestas, bet nepieciešamības gadījumā, lai samazinātu slodzi virtuālajā tiklā trafika klasei ar augstāko prioritāti, paketes tika pārraidītas pa virtuālo tīklu ar zemāko prioritāti atbilstoši *QoS* prasībām. Protams, tas noved pie rādītāja *IPTD* palielinājuma, un šādā veidā ietekmē lēmuma pieņemšanas procesu. Otrkārt, eksperimentālā modeļa shēma neparedz kļūdas pakešu pārraides procesā. Līdz ar to tīkla veiktspējas rādītājs *IPER* netika izmantots

lēmuma pieņemšanas sistēmā. Piedāvātā metode var būt modificēta, iekļaujot lēmuma pieņemšanas procesā visus četrus tīkla veiktspējas rādītājus. Protams, pie ieejas mainīgo skaita palielināšanas būs sarežģītāka arī pielietotā *FIS* sistēma, jo būtiski pieaugs *IF-THEN* kārtulu skaits. Promocijas darbā lēmumu atbalsta sistēma tika veidota, ierobežojot parametru skaitu, jo darba autores rīcībā bija ierobežoti skaitļošanas resursi.

Atzīmēsim arī to, ka, risinot ar caurlaides joslas resursu sadali un dinamisku pārdali saistīto problēmu, mēs abstrahējamies no katra virtuālā tīkla maršrutēšanas politikas. Mēs risinām problēmu pamattīkla līmenī, pieņemot, ka katrs virtuālais tīkls īsteno savu maršrutēšanas politiku atbilstoši saviem mērķiem. Tomēr pieminētie ierobežojumi nenovērš iespēju izvērtēt piedāvātā risinājuma spēju nodrošināt tīklu caurlaides joslas resursu dinamisko pārdali starp trafika klasēm ar atšķirīgām *QoS* prasībām atbilstoši trafika izmaiņām.

Trešā nodaļa

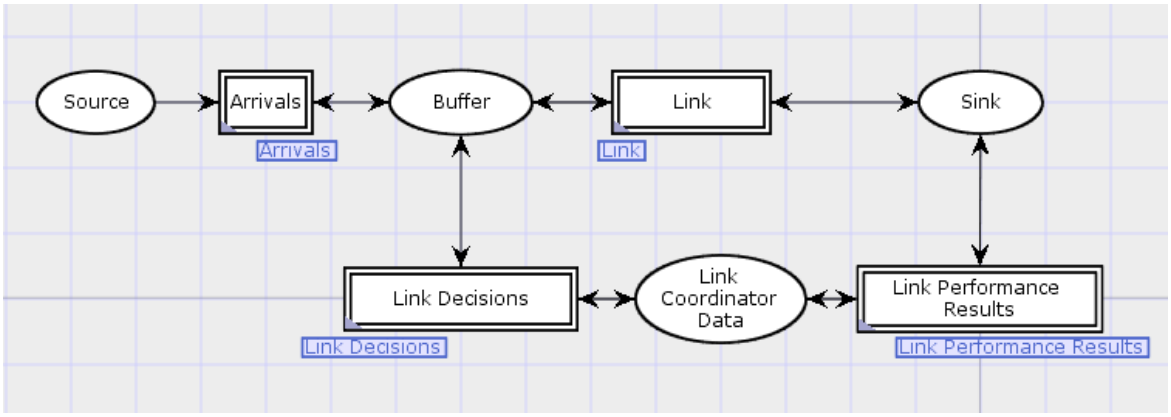
Nodaļa ir veltīta eksperimentālā modeļa izveidei un simulēšanas procesā iegūto rezultātu analīzei. Mēs aprakstām piedāvātās pieejas praktisko realizāciju ar krāsainajiem Petri tīkliem (angļu valodā — *Coloured Petri Net*, *CPN*), izmantojot *CPN Tools* programmatūru ar speciāli izstrādāto adaptīvo joslas piešķiršanas moduli, kas realizē lēmumu atbalsta sistēmu un joslas sadales mehānismu. Piedāvātās tīkla caurlaides joslas pārvaldības metodes efektivitāte ir novērtēta un uzlabota, modificējot nestriktās loģikas kārtulu datubāzi ar *CPN Tools* vidē organizēto eksperimentu palīdzību.

CPN Tools. Krāsainie Petri tīkli kā parasto Petri tīklu paplašinājums tika ieviesti Petri tīklu konstrukcijas attīstīšanas procesā Kurta Jensena (*Kurt Jensen*) darbos iepriekšējā gadsimta astotajā desmitgadē. Petri tīklu konstrukcija $PN = (P, T, F, I)$ ar vietām, pārejām un ar žetoniem uzdoto markējumu tika paplašināta (skat., piemēram, [20]), izmantojot krāsas, mainīgos, izteiksmes, kā arī mainīgo un izteiksmju tipus: $CPN = (P, T, F, \Sigma, W, C, G, H, I)$, kur trijnieks (P, T, F) apraksta tīkla struktūru, pāris (Σ, W) uzdod tipus un mainīgos un četrinieks (C, G, H, I) reglamentē iterāciju procesus tīklā. Pateicoties šādai struktūrai, *CPN* tiek uzskatīts par vienu no efektīvākajiem matemātiskās modelēšanas rīkiem, lai aprakstītu diskrētu notikumu sistēmu. *CPN* apvieno labi attīstītu matemātisko teoriju ar lieliskām grafiskām iespējām. Šī kombinācija ir galvenais *CPN* lielo panākumu iemesls sistēmu dinamisko uzvedību modelēšanā un analīzē (skat. [10], [20]–[23]). *CPN Tools* (skat. [23], [50]) ir diskrētu notikumu modelēšanas rīks, kas apvieno krāsaino Petri tīklu modeļus un funkcionālo programmēšanas valodu *CPN ML*, kas balstās uz *Standard ML*, un atbalsta *CPN* modeļu interaktīvās un automātiskās simulācijas, stāvokļu telpas un veiktspējas analīzi. *CPN* modeļos iekļauto krāsu tehniku var efektīvi izmantot, lai modelētu virtuālos tīklus atbilstoši *DaVinci* arhitektūrai. Pamattīkla *CPN* modelis var aprakstīt sistēmas katra

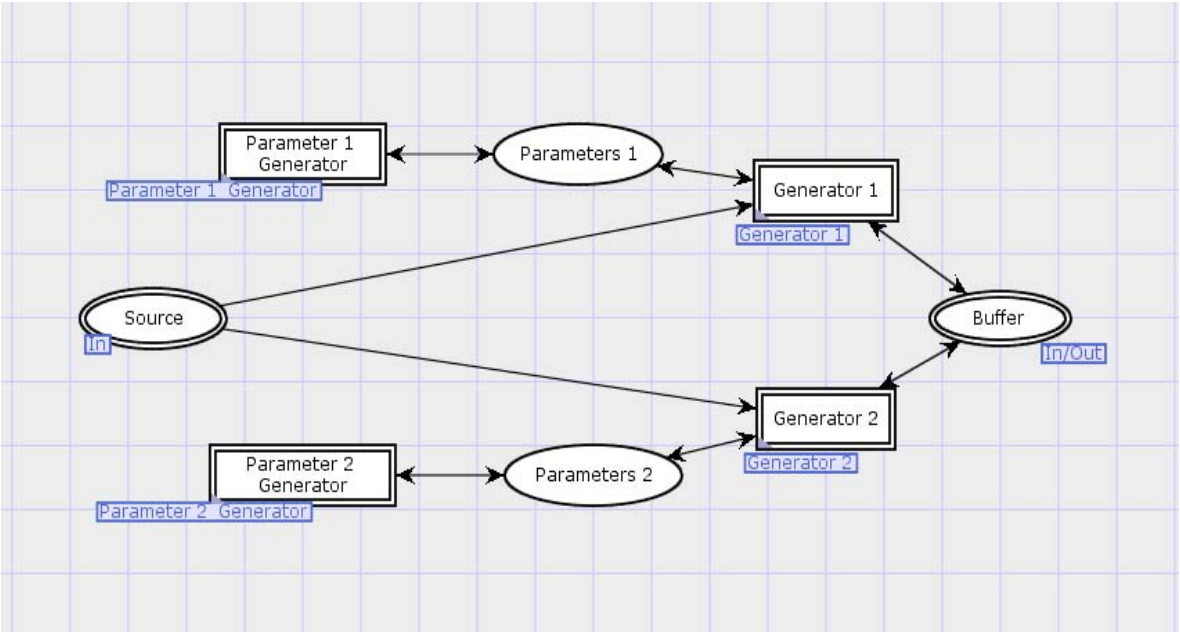
virtuālā tīkla stāvokļus un notikumus, kas var izraisīt sistēmas stāvokļu maiņu. Veicot tīkla *CPN* modeļa simulācijas ar *CPN Tools*, ir iespējams izanalizēt dažādus scenārijus un izprast sistēmas uzvedību, lai izmantotu simulāciju procesā iegūtos rezultātus ne tikai lēmuma pieņemšanas un adaptēšanas procesiem, bet arī lēmumu pieņemšanas sistēmas modificēšanai un uzlabošanai.

Simulēšanas shēma. Simulāciju eksperimentu mērķis ir pārliecināties, ka piedāvātais resursu pārdales mehānisms spēs nodrošināt sistēmas adaptāciju mainīgajā vidē, kad trafika parametru izmaiņu dēļ mainīsies virtuālo tīklu darbības rādītāji. Mēs simulējām adaptīvo joslas platuma piešķiršanas mehānismu linku līmenī. Zemāk ir apskatīta simulēšanas shēma modelim ar diviem virtuālajiem tīkliem atbilstoši diviem trafika veidiem, ko apzīmē A (uz aizturi jūtīgam trafikam) un B (uz caurlaidspēju jūtīgam trafikam). A un B krāsas tiek efektīvi izmantotas, lai modelētu un simulētu šādu sistēmu. Pirmkārt, krāsas piekārto žetoniem, kas apraksta paketes. Otrkārt, A un B krāsas mēs izmantojam arī kā attiecīgo virtuālo linku identifikatorus. Kā ierasts *CPN* modeļos, mēs izmantojam modeļa laika vienību MTU (angļu valodā — *Model Time Units*). Mēs pieņemam, ka MTU atbilst vienai ms vienībai.

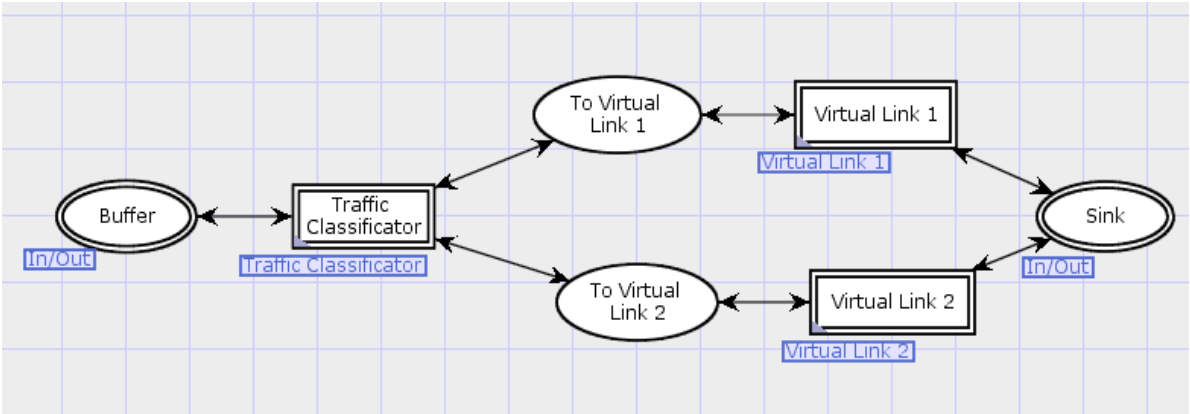
CPN Tools modelis izmanto datu pārraides moduļus un caurlaides joslas platuma adaptācijas moduļus (ar vairākiem apakšmoduļiem, kuri ir uzbūvēti pēc hierarhiskā principa un sastāv no citiem apakšmoduļiem, kuri darbojas vienā sistēmā): „*Arrivals*”, „*Link*”, „*Link Decisions*”, „*Link Performance Results*” (skat. 16. att.). Mezgls „*Source*”, pēc savas būtības, ir tikai starta mezgls. Abu klašu trafika plūsmu paketes tiek ģenerētas ģeneratoru modulī „*Arrivals*” un nonāk mezglā „*Buffer*”. Tālāk seko pakešu pārraides modulis „*Link*”. Sistēmas mērķis ir pārraidīt paketes caur linka moduli līdz mezglam „*Sink*”. Informācija par visām pārraidītajām paketēm tiek uzkrāta un apstrādāta modulī „*Link Performance Results*”. Modulis „*Link Decisions*” (pēc būtības, adaptācijas modulis) īsteno linka caurlaides joslas platuma sadales un dinamiskās pārdales politiku. Divu klašu pakešu ģenerēšanai modulī „*Arrivals*” (skat. 17. att.) ir paredzēti faktiski četri ģeneratori: divi ģeneratori katrai klasei. Pirmais ģenerē plūsmas intensitātes un pakešu garuma parametrus, bet otrais jau ģenerē plūsmas paketes. Modulis „*Link*” sastāv no trīs apakšmoduļiem (akt. 18. att.): klasifikatora un diviem pārraides moduļiem „*Link* 1” un „*Link* 2”. Klasifikatorā ne tikai klasificē paketes (t.i., sadala paketes starp divām rindām, ievērojot marķējumu), bet arī kontrolē abas divas rindas un nepieciešamības gadījumā uz laiku pazemina pakešu klasi (t.i., pāradresē paketes uz linku ar zemāko prioritāti). Katra virtuālā linka modulis ir aprakstīts atsevišķi. Paketes tiek pārsūtītas, ievērojot virtuālā linka *FIFO* rindas disciplīnu. Nosūtīšanas laiks ir atkarīgs no paketes izmēra un attiecīgā virtuālā linka caurlaides joslas platuma. Modulis „*Link Decisions*” piešķir joslas platuma vērtību katram virtuālajam linkam lēmuma pieņemšanas brīžos, bet no sākuma ir pieņemts, ka abiem linkiem ir piešķirtas vienādas daļas.



16. att. Caurlaides joslas pārdales procesa simulēšanas eksperimentu shēma *CPN Tools* vidē.



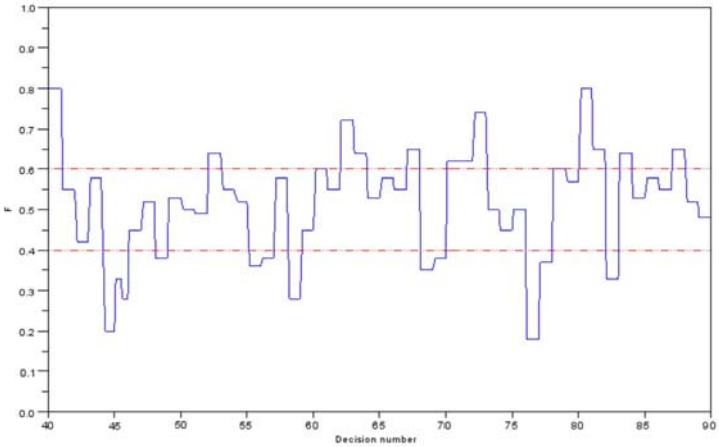
17. att. Trafika pakešu ģenerēšanas modulis *CPN Tools* vidē.



18. att. Trafika pārraides modulis *CPN Tools* vidē.

Joslas platuma sadales adaptēšanas modulis ir izveidots, lai periodiski atjauninātu pamatlinka resursu sadali starp virtuālajiem linkiem atbilstoši dinamiski mainīgajiem trafika pārraides rādītājiem. Sistēmas veiktspējas novērošanai tiek izmantotas speciālas novērošanas funkcijas gan modulī „*Link Performance Results*" (kur ir uzkrāta informācija par aizturēm, trīci un noslodzi novērošanas laika intervālā), gan klasifikācijas modulī (kurā tiek kontrolēts rindu garums). Novērošanas mehānismi tiek izmantoti ne tikai, lai kontrolētu, bet arī, lai modificētu tīklu simulāciju rezultātā. Lēmumu pieņemšanas sistēma balstās uz datu vākšanas monitoru informāciju. Lēmuma pieņemšanas kritēriji ir atkarīgi no *QoS* parametriem abos virtuālajos tīklos, līdz ar to informācija ir apkopota katram virtuālajam linkam atsevišķi par katru novērošanas intervālu. Par novērošanas intervālu mēs uzskatām laika intervālu starp lēmumu pieņemšanas brīžiem. Lēmuma pieņemšanas laika momentā informācija ir nolasīta un apstrādāta, ģenerējot lēmumu par resursu pārdali starp virtuālajiem linkiem. Adaptēšanas shēma ir realizēta saskaņā ar piedāvāto uz nestriktās loģikas balstīto lēmumu pieņemšanas sistēmu, kas tika aprakstīta iepriekšējā nodaļā.

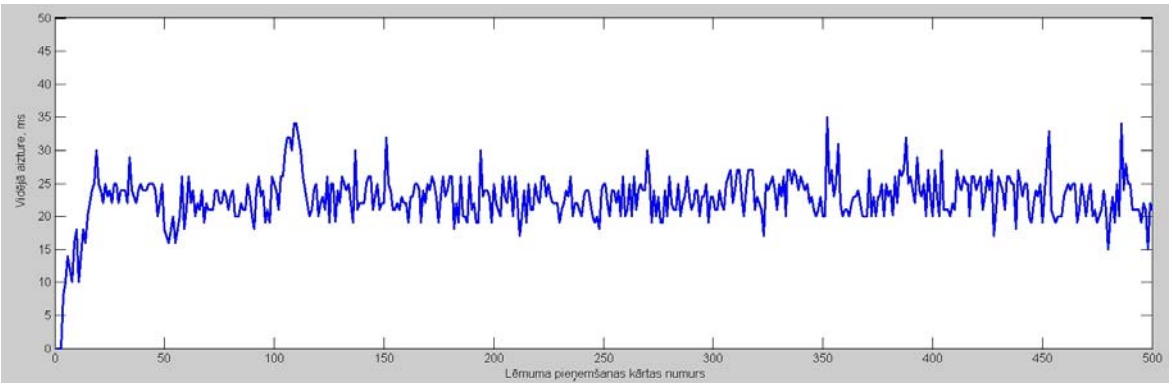
Pirmā eksperimentu sērija tika organizēta divām trafika klasēm A un B. Mūsu eksperimentos pamatlinka kapacitāte ir 100 Mbps un sākotnēji joslas platuma sadale starp virtuālajiem linkiem ir vienmērīga. A un B tipa paketes tiek ģenerētas, lietojot pieprasījumu modeli ar Veibulla sadalījumu intervāliem starp pieprasījumiem un vienmērīgi sadalītu pakešu izmēru. Ir zināms, ka Veibulla sadalījums labi apraksta mūsdienas trafika pašlīdzīgo un uzliesmojošo raksturu. Pateicoties „garās astes" īpašībai, modelī ar Veibulla sadalījumu pieaug varbūtība, ka laika intervāls starp pieprasījumiem būs garš, līdz ar to kādos laika intervālos pieprasījumi var pilnībā trūkt vai pienākt nelielā skaitā, tikmēr citos laika intervālos var būt ļoti liels pieprasījumu skaits, kas var novest pie pārslodzes. Joslas platuma resursi tiek pārdalīti katras 10 000 MTU (uzskatām, ka MTU atbilst ms). Mainot trafika parametrus, mēs novērojam modeļa adaptācijas procesu (34. att.). Atzīmēsim, ka daudzi autori uzsver, ka līdz šim nav pamatotas atbildes uz jautājumu par tīkla caurlaides joslas pārdalīšanas biežumu. Speciālistu viedokļi par to, kādam jābūt laika intervālam



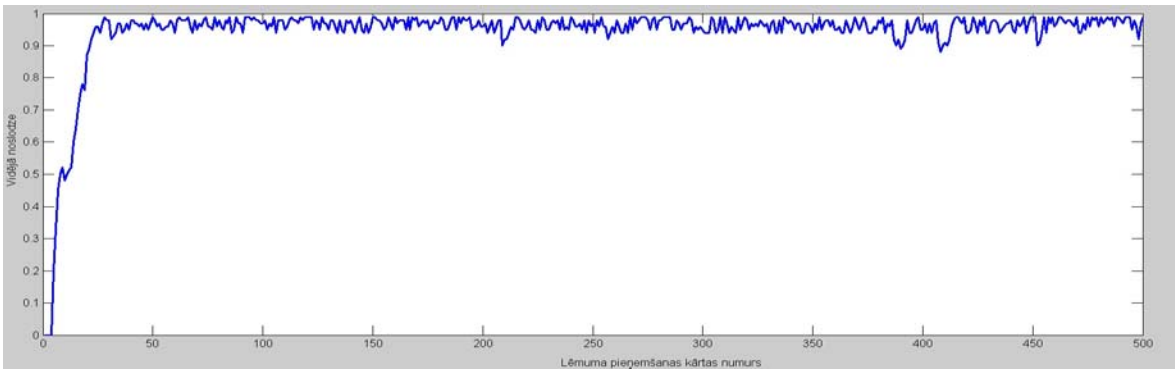
19. att. Simulēšanas eksperimentu rezultāts: lēmuma pieņemšanas indikatora vērtība.

starp lēmuma pieņemšanas brīžiem, ļoti atšķiras. Veiktajos eksperimentos joslas sadales efektivitātes kontrole tika nodrošināta pēc katrām 10 000 MTU. Tajā pašā laikā, ne katrs pieņemtais lēmums noveda pie joslas resursu pārdalīšanās (skat. 19. att.). Lēmuma pieņemšanas kritēriji ir atkarīgi no diviem parametriem d_1 un d_2. Eksperimentējot ar parametru vērtībām, ņemot tos gan simetriski, gan simetriski, gan asimetriski attiecībā pret punktu 0,5, tika izdarīts secinājums par labu vērtību $d_1 = 0,4$ un $d_2 = 0,6$ izvēlei.

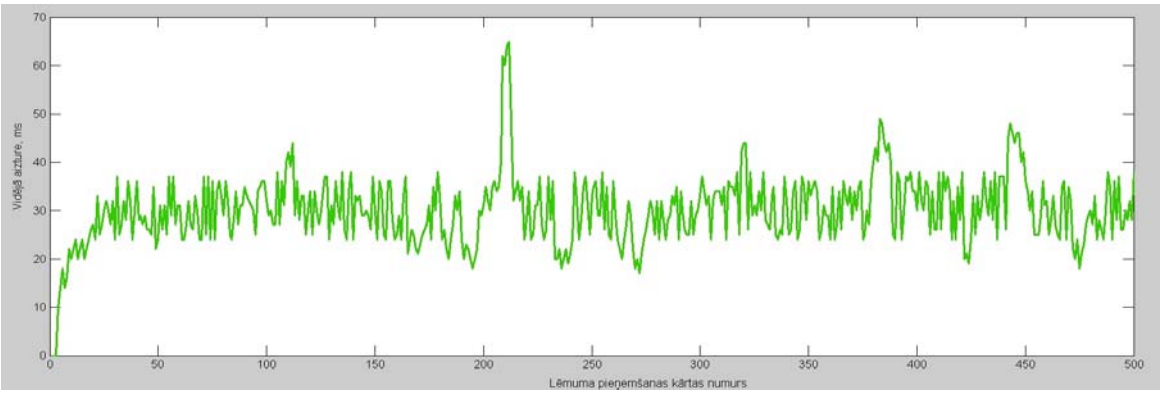
Salīdzinošā rezultātu analīze tiek veikta modeļa realizācijai ar un bez uz nestriktās loģikas balstītas lēmuma pieņemšanas atbalsta sistēmas *FuzDSS* pielietošanu. 20.–23. att. ir redzami rezultāti 500 lēmumu pieņemšanas laika intervāliem. Veicot vidējo vērtību analīzi, mēs redzam, ka vidējais pakešu aiztures līmenis uz aizturi jūtīgam trafikam (virtuālais tīkls A) samazinās no 30 ms (klasiskā algoritma pielietošanas gadījumā) līdz 23 ms, pielietojot uz nestriktās loģikas balstītu algoritmu (skat. 20. un 22. att.). Vidējās noslodzes līmenis uz caurlaidspēju jūtīgam trafikam (virtuālais links B) stabilizējas pie 0,96, kas ir labāks rezultāts, salīdzinot ar noslodzes līmeni 0,92, kuru var sasniegt, izmantojot klasisko algoritmu (skat. 21. un 23. att.).



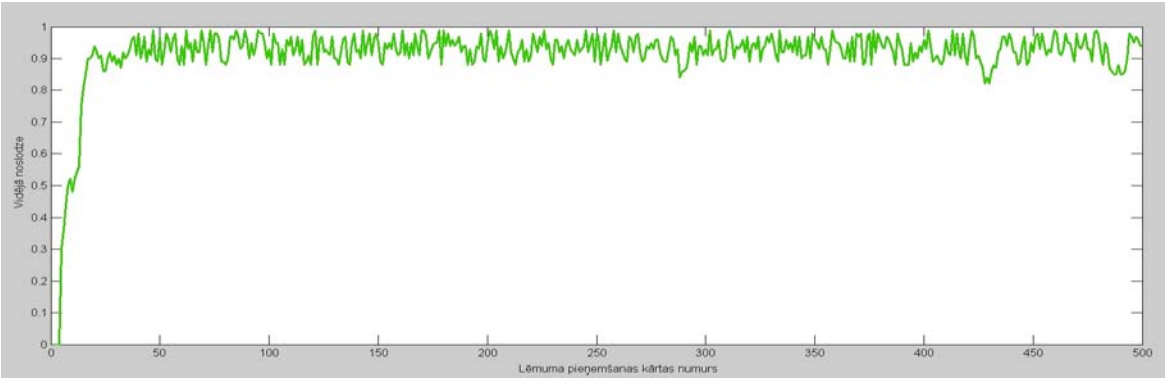
20. att. Ar *FuzDSS* veikto simulēšanas eksperimentu rezultāts: pakešu aiztures vidējā vērtība uz aizturi jūtīgam trafikam.



21. att. Ar *FuzDSS* veikto simulēšanas eksperimentu rezultāts: pakešu utilizācijas vidējā vērtība uz caurlaidspēju jūtīgam trafikam.



22. att. Bez *FuzDSS* veikto simulēšanas eksperimentu rezultāts: pakešu aiztures vidējā vērtība uz aizturi jūtīgam trafikam.



23. att. Bez *FuzDSS* veikto simulēšanas eksperimentu rezultāts: pakešu utilizācijas vidējā vērtība uz caurlaidspēju jūtīgam trafikam.

Simulācijas parāda, ka promocijas darbā piedāvātā uz nestrikto loģiku balstītā lēmuma pieņemšanas atbalsta sistēma *FuzDSS* noved pie laba rezultāta. Adaptīvās joslas platuma pārdalīšanas mehānisms ir spējīgs dinamiski un efektīvi reaģēt uz trafika izmaiņām, nodrošinot *QoS* parametru saglabāšanu pieļaujamās robežās.

Otrā eksperimentu sērija tika organizēta, iekļaujot modelī uz spēļu teorijas balstītu lēmuma pieņemšanas modeli. Mēs eksperimentējām ar divām un trijām trafika klasēm (pamatlinka joslas platums ir attiecīgi 100 Mbps un 150 Mbps). Eksperimentos ir pieņemts, ka sākotnēji pamatlinka joslas platuma resursi starp virtuālajiem linkiem ir sadalīti vienmērīgi, tas ir, katra virtuālā linka joslas kapacitāte ir 50 Mbs. Mainot trafika parametrus, mēs novērojām resursu efektīvas pārdalīšanas procesu sistēmas adaptēšanās brīžos. Divu trafiku klašu gadījumā mēs ieguvām rezultātus, kas ir salīdzināmi ar iepriekšējās tehnikas ietvaros iegūtajiem rezultātiem. Tagad apskatīsim simulēšanas eksperimentu rezultātus trīs trafika klasēm. Sāksim ar rezultātiem 6. tabulā. Simulēšanas eksperiments tika veikts trafika klasēm ar indeksiem 5, 0 un 1. Tabulas dati ļauj izanalizēt secīgi pieņemtos lēmumus 15 laika intervālos. Simulēšanas eksperimenta rezultāti parāda, ka piedāvātais caurlaides joslas platuma pārdalīšanas mehānisms var efektīvi reaģēt uz trafika parametru izmaiņām klasei $k = 2$, kad $j = 7$, un klasei $k = 1$, kad $j = 12$.

6. tabula.

Caurlaides joslas pārdalīšanas rezultāts trīs trafika klasēm.

	$b_l^{(k)}(t_j)$			$y_l^{(k)}(t_j)$			Noslodze
j \ k	1	2	3	1	2	3	
0				50	50	50	0,48
1	60	40	46	60	40	46	0,74
2	66	33	48	66	33	48	0,78
3	74	39	52	67	36	47	0,92
4	72	36	51	68	34	48	0,90
5	66	41	52	62	39	49	0,93
6	64	38	48	67	40	51	0,91
7	65	48	51	59	44	47	0,84
8	68	54	53	58	46	46	0,88
9	70	52	52	60	45	45	0,91
10	68	54	51	59	47	44	0,90
11	68	53	52	59	46	46	0,88
12	55	52	53	52	49	49	0,73
13	48	53	52	47	52	51	0,82
14	48	52	53	47	51	52	0,90
15	47	53	53	46	52	52	0,92

Simulācijas liecina, ka piedāvātā adaptēšanās tehnika var dot labu rezultātu: pēc trīs iterācijām abos gadījumos mēs saņemam joslas platuma sadalījumu, kas atbilst virtuālo tīklu trafikiem.

Vidēji veiktspējas rādītāji, kas ir novērtēti simulēšanas eksperimentos ar 500 novērošanas un lēmuma pieņemšanas laika intervāliem ar piedāvāto lēmumu atbalsta sistēmu un bez, ir aprakstīti zemāk (skat. 7. tab.).

7. tabula.

Simulēšanas eksperimentu rezultāti trafika klasēm ar indeksiem 0, 1 un 5.

Klases indekss	Veiktspējas parametrs	Ar *FuzDSS* veikto simulāciju rezultāts	Bez *FuzDSS* veikto simulāciju rezultāts	Uzlabojums
0	Vidējā aizture	29,5 ms	33,4 ms	12 %
0	Vidējā trīce	11,8 ms	12,3 ms	4 %
1	Vidējā aizture	102,7 ms	119,2 ms	14 %
1	Vidējā trīce	15,5 ms	16,7 ms	7 %
5	Vidējā noslodze	0,978	0,944	4 %

Eksperimentu rezultāti trafika klasēm ar indeksiem 0, 2 un 5 (ar 500 lēmumu pieņemšanas laika intervāliem) arī liecina par veiktspējas parametru uzlabojumu (skat. 8. tab.).

8. tabula.

Simulēšanas eksperimentu rezultāti trafika klasēm ar indeksiem 0, 2 un 5.

Klases indekss	Veiktspējas parametrs	Ar *FuzDSS* veikto simulāciju rezultāts	Bez *FuzDSS* veikto simulāciju rezultāts	Uzlabojums
0	Vidējā aizture	26,8 ms	31,6 ms	15 %
0	Vidējā trīce	11,1 ms	12,0 ms	7 %
2	Vidējā aizture	32,4 ms	36,2 ms	10 %
5	Vidējā noslodze	0,982	0,965	2 %

Līdzīgi rezultāti (skat. 9. tab.) tika iegūti eksperimentos trafika klasēm ar indeksiem 0, 3 un 5 (ar 500 lēmumu pieņemšanas laika intervāliem).

9. tabula.

Simulēšanas eksperimentu rezultāti trafika klasēm ar indeksiem 0, 3 un 5.

Klases indekss	Veiktspējas parametrs	Ar *FuzDSS* veikto simulāciju rezultāts	Bez *FuzDSS* veikto simulāciju rezultāts	Uzlabojums
0	Vidējā aizture	24,3 ms	29,9 ms	19 %
0	Vidējā trīce	10,8 ms	11,7 ms	8 %
3	Vidējā aizture	115,3 ms	126,8 ms	9 %
5	Vidējā noslodze	0,972	0,953	2 %

Protams, šie rezultāti tika iegūti simulāciju ceļā pie striktiem pieņēmumiem un simulācijas modeļa iestatījumiem nevis reālajos scenārijos. Tomēr šie pieņēmumi nenovērš iespēju izvērtēt piedāvāto pieeju. Eksperimentos ir parādīts, ka arī vairāku trafika klašu gadījumā nestriktās pieejas kontekstā var atrast risinājumu tīkla caurlaides joslas resursu pārdalei. Mēs pielietojām stratēģisko spēļu teorijas koncepcijas, lai modelētu lēmumu pieņemšanas procesu tīkla caurlaides joslas platuma piešķiršanai gadījumā, kad trafika klašu skaits pārsniedz 2. Trīs trafika klasēm veiktspējas rādītāji gadījumā, kad simulēšanas eksperimentos tika izmantota piedāvātā *FuzDSS* sistēma, arī uzlabojās: uz aizturi jūtīgām trafika klasēm — pakešu aiztures vidējā vērtība samazinājās par 9–19 %, uz caurlaidspēju jūtīgam trafikam — noslodze vidēji pacēlās par 2–4 %, uz trīci jūtīgām trafika klasēm — trīce vidēji samazinājās par 4–8 %.

Ceturtā nodaļa

Nodaļa ir veltīta trafika klasifikācijai ar anomāliju novērtēšanas mērķi. *ITU-T* rekomendācijās *Y.2111* (*Resource and admission control functions in next generation*

networks [18]) anomāliju detektēšana ir uzskatāma par vienu no svarīgākajiem ar trafika vadību saistītajiem uzdevumiem. Šajā sakarā īpaša uzmanība dokumentā ir pievērsta *DDoS* uzbrukumiem (angļu valodā — *Distributed Denial of Service Attack*). Nodaļā ir atspoguļoti rezultāti, kas tika iegūti pētnieciskā projekta 2013/0024/1DP/1.1.1.2.0/13/ APIA/VIAA/045 ietvaros, t.sk. ar citu projekta dalībnieku līdzdalību.

***DDoS* uzbrukumi un to konstatēšanas uzdevums.** *DDoS* uzbrukuma mērķis ir paralizēt servera darbību. Saskaņā ar *CERT* (angļu valodā — *Computer Emergency Response Team*) klasifikāciju [7] eksistē trīs *DDoS* uzbrukumu kategorijas: caurlaidspējas pārslodzes uzbrukumi; protokolu uzbrukumi; lietojumslāņa pārpludināšanas uzbrukumi. Darbā tika apskatīti trešā tipa uzbrukumi, kas izpaužas, kā pieprasījumu skaita strauja palielināšana.

Literatūrā aprakstītās metodes un pieejas *DDoS* uzbrukumu konstatēšanai (skat., piemēram, [4], [8], [26], [57], [58]) var sadalīt šādi: statistiskās metodes (piemēram, *DCD Approach*, *SPUNNID Method*, *T-test Method*, *Linear Prediction Method*); uz zināšanām balstītas metodes (angļu valodā — *Knowledge Based Methods*; piemēram, *Decission Tree Model*, *Perimeter Based System*); nestingrās skaitļošanas metodes (angļu valodā — *Soft Computing*; piemēram, *RBF Neural Net Model*, *Ensemble of Neural Net Model*). Šādā sadalījumā dominē statistiskās metodes. Neskatoties uz ļoti lielu pētījumu skaitu, uz doto brīdi nav atrasts universāls efektīvs rīks cīņai pret *DDoS* uzbrukumiem. *DDoS* uzbrukumu konstatēšanas problēma joprojām ir uzskatīta par ļoti aktuālu (skat. [4], [7]). Mūsu mērķis ir attīstīt tīkla trafika dinamikas analīzei uz nestriktās loģikas balstītas pieejas priekšrocības, pamatojoties uz nestriktajām transformācijām, nestrikto klasterizāciju un klasifikāciju ar labu skaitļošanas ātrumu un klasifikācijas parametriem.

Trafika datu reprezentēšana. Izmantosim apzīmējumu z tīkla trafika funkcijai, kuras vērtība $z(t)$ apraksta trafika apjomu laika momentā $t \geq 0$. Šī funkcija apraksta agreģēto trafiku (tas sastāv no paketēm no visiem savienojumiem ieejas serverī). Mūsu kontekstā ir svarīgi zināt, ka tipiskajā agreģētā trafika modelī trafika uzliesmojums rodas no vairākiem vienlaicīgi aktīviem savienojumiem. Pēc būtības, mēs strādājam ar trafika laikrindām $z(t_i)$, $i = 1, 2, \ldots$. Apzīmējums z tiks saglabāts gan, aprakstot nepārtraukto gadījumu ($z(t)$, $t \geq 0$), gan, analizējot diskrēto gadījumu ($z(t_i)$, $i = 1, 2, \ldots$).

Pētījumā ir izmantotas laikrindu N pirmās vērtības. Trafika laikrindām no apmācības kopas no sākuma tiek piemērotas priekšapstrādes procedūras, kuru rezultātā tiek iegūti vektori ar mazāko dimensiju. Parasti dimensija tiek samazināta, izmantojot PAA (angļu valodā — *Piecewise Aggregate Approximation*) metodi (skat., piemēram, [24]), kuru var definēt ar formulu (darbā tika izmantots apzīmējums $x = PAA[z]$):

$$x_i = \frac{k}{N} \sum_{j=1+N(i-1):k}^{Ni:k} z(t_j), \quad i = 1, 2, \ldots, k.$$

Ir vismaz divi aspekti, kas pamato laikrindu priekšapstrādes nepieciešamību. Pirmais ir saistīts ar dimensijas samazināšanu. Ņemot vērā, ka gadījumā, kad netiek veikta laikrindu priekšapstrāde, klasterzācijai un klasifikācijai nepieciešamo aprēķinu veikšana var būt ļoti laikietilpīga, uzdevuma dimensijas samazināšana ir ļoti svarīgs uzdevums, kas jārisina klasifikācijas problēmas ietvaros. Otrais aspekts izriet no klasterizācijas un klasifikācijas mērķiem — atrast līdzīgus objektus. Trafika laikrindu gadījumā, ņemot vērā laikrindu oscilējošo raksturu, līdzības mērs tiks ieviests tikai pēc viduvēšanas procedūras.

Dimensijas reducēšana, lietojot nestrikto transformāciju. Pētījumos izmanto tiešo un inverso F-transformāciju nepārtrauktu un diskrētu modeli (skat., piemēram, [39]–[41], [46]–[48]). Ar tiešo F-transformāciju [47] funkcija tiek pārvērsta par vektoru, kura komponentes apraksta transformējamās funkcijas vērtības atbilstoši definīcijas apgabala nestriktajam sadalījumam. Bet ar tiešo diskrēto F-transformāciju tiek samazināta vektora dimensija. Rezultātā tiek panākta informācijas saspiešana atbilstoši nestriktajam sadalījumam, kas sastāv no nestriktām kopām. Mēs piemērojām vienmērīgo nestrikto sadalījumu ar trīsstūrveida formas piederības funkcijām un izmantojām diskrētas formulas F-transformācijas komponentēm. Ideja izmantot nestriktās transformācijas laikrindu analīzē nav jauna (skat. [39]–[41]). Mūsu pētījuma novitāte ir skaidrojama ar to, ka mēs attīstām F-transformācijas tehniku kā īpašu instrumentu trafika datu apstrādei un parādām tās lomu ar trafika klasifikāciju saistīto uzdevumu risināšanā un skaitļošanas resursu samazināšanā. Principiālā atšķirība no *PAA* komponentēm ir pirmās kārtas F-transformācijai [48], kuras otrās komponentes raksturo trafika izmaiņas ātrumu.

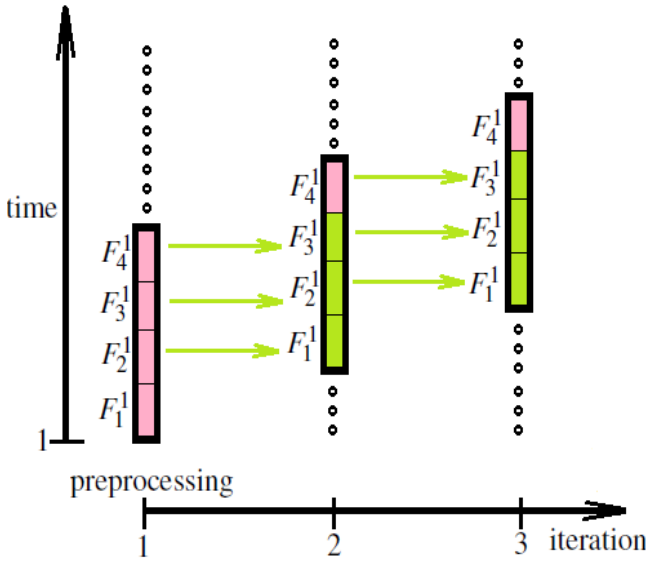
Pieņemsim, ka $A_1, A_2, \dots, A_k$ veido intervāla $[a,b]$ vienmērīgo nestrikto sadalījumu attiecībā pret klasisko sadalījumu $a = \tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_k < \tau_{k+1} = b$ ar soli $\Delta\tau$. Pieņemsim, ka intervālā $[a,b]$ ir fiksēti tādi punkti $t_1, t_2, \dots, t_N$, kā kopa $P_N = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ ir visur blīva (angļu valodā — *Sufficiently Dense*) intervālā $[a,b]$ attiecībā pret nestrikto sadalījumu, $N > k$. Izmantosim apzīmējumu V_N telpai $\{z : P_N \to \mathbb{R}\}$, kuru veido funkcijas, kas darbojas kopā P_N. Telpu V_N var uztvert kā vektoru telpu, ja katru funkciju $z \in V_N$ interpretēt kā vektoru, kura komponentes $z_j = z(t_j),\ j = 1,2,\dots,N.$

Ja ir dota funkcija $z \in V_N$ un nestriktais sadalījums $A_1, A_2, \dots, A_k$, $N > k$, tad k-dimensionālu vektoru $(F_1^1, F_2^1, \dots, F_k^1)$ ar komponentēm-funkcijām

$$F_i^1(t_j) = F_{i0}^1 + F_{i1}^1(t_j - \tau_i), \quad j = 1,2,\dots,N,\ i = 1,2,\dots,k, \text{ kur}$$

$$F_{i0}^1 = \frac{\sum_{j=1}^{N} z(t_j) A_i(t_j)}{\sum_{j=1}^{N} A_i(t_j)}, \quad F_{i1}^1 = \frac{\sum_{j=1}^{N} z(t_j)(t_j - \tau_i) A_i(t_j)}{\sum_{j=1}^{N} (t_j - \tau_i)^2 A_i(t_j)}, \quad i = 1,2,\dots,k,$$

sauc par funkcijas z diskrēto F¹-transformāciju (pirmās pakāpes F-transformāciju) attiecībā pret $A_1, A_2, \dots, A_k$. Darbā ir izmantots apzīmējums $F^0[z]=(F^1_{10}, F^1_{20}, \dots, F^1_{k0})$ un $F^1[z]=(F^1_{11}, F^1_{21}, \dots, F^1_{k1})$. Apzīmējums $F^0[z]$ ir izskaidrojams ar to, ka vektora $(F^1_{10}, F^1_{20}, \dots, F^1_{k0})$ komponentes veido funkcijas z diskrēto nultās pakāpes F-transformāciju. Mēs izmantojam vienmērīgu sadalījumu P_N ar parametru h, pieņemot, ka $t_j = a + (j-1)\Delta t, \quad j = 1,2,\dots,N,$ kur $h\Delta t = \Delta\tau$.



24. att. Trafika laikrindas F-transformācijas komponenšu aprēķināšanas shēma.

Priekšapstrāde trafika laikrindām tiek veikta šādā veidā. Uzsveram, ka trafika laikrindas ir bezgalīgas, bet algoritms, strādājot ar bezgalīgām laikrindām, katrā laika momentā ņem vērā tikai noteiktu skaitu (mēs vienojamies, ka šis skaits ir apzīmēts ar N) komponentes un to F-transformācijas (vai PAA) komponentes. Katrā nākamajā solī mēs faktiski aprēķinam tikai vienu pēdējo komponenti. Salīdzinājumā ar iepriekšējā solī izmantoto un F-transformācijas rezultātā iegūto vektoru pirmā komponente tiek noņemta un viena jauna komponente ir pievienota beigās. Šī procesa shēma ir parādīta 24. attēlā.

Izmantotie nestriktās klasterizācijas algotitmi. Nestriktās klasterizācijas metodes pieļauj, ka objekti pieder dažiem klasteriem vienlaicīgi ar dažādām piederības pakāpēm. Darbā tika izmantotas četras nestriktās klasterizācijas metodes un to modifikācijas (kopā — astoņas metodes): nestriktais C-vidējo algoritms FCM, iespējamību C-vidējo algoritms PCM, modificētais iespējamību klasterizācijas algoritms PCA un uzlabotais kombinētais nestriktais iespējamību algoritms $UPFC$ (skat., piemēram, [1], [3], [25], [55], [59]).

Pieņemsim, ka analizējamie dati veido kopu $X = \{x^1, x^2, \dots, x^n\}$ un ir k-dimensionāli vektori, t.i., $x^j = (x^j_1, x^j_2, \dots, x^j_k), \quad j = 1,2,\dots,n.$ Kopas X sadale klasteros $X_1, X_2, \dots, X_c$ var būt uzdota, lietojot atbilstības matricu $U = (u_{ij})_{c\times n}$ ar elementiem u_{ij}, kas raksturo j-tā objekta x^j piederību i-tajam klasterim X_i, $i = 1,2,\dots,c, \quad j = 1,2,\dots,n.$ Darbā ir izmantotas divu veidu matricas: U_f — nestriktās

sadales atbilstības matrica, U_p — iespējamību (angļu valodā — *Possibilistic*) atbilstības matrica. Ar C tiek apzīmēta kopa, kuru veido klasteru centroīdi $c^1, c^2, \ldots, c^c$.

FCM algoritms (angļu valodā — *Fuzzy C-Means*) balstās uz mērķa funkcijas

$$J_{\mathrm{FCM}}(X, U_f, C) = \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{n} u_{ij}^m d_{ij}^2,$$

kur $m > 1$ ir svara eksponente, $d_{ij} = d(x^j, c^i)$, d ir Eiklīda attālums. PCM algoritms (angļu valodā — *Possibilistic C-Means*) ar mērķa funkciju

$$J_{\mathrm{PCM}}(X, U_p, C) = \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{n} u_{ij}^m d_{ij}^2 + \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{n} \eta_i (1 - u_{ij})^m$$

priekš η_i izmanto formulu

$$\eta_i = \left(\sum_{j=1}^{n} u_{ij}^m d_{ij}^2 \right) : \left(\sum_{j=1}^{n} u_{ij}^m \right), \quad i = 1, 2, \ldots, c.$$

PCA algoritms (angļu valodā — *Possibilistic Clustering Algorithm*) izmanto funkciju

$$J_{\mathrm{PCA}}(X, U_p, C) = \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{n} u_{ij}^m d_{ij}^2 + \frac{\beta}{m^2 \sqrt{c}} \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{n} (u_{ij}^m \ln(u_{ij}^m) - u_{ij}^m)$$

$$\text{ar } \beta = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} d(x^j, \bar{x})^2, \text{ kur } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} x^j .$$

$UPFC$ algoritma (angļu valodā — *Unsupervised Possibilistic Fuzzy Clustering*) pamatā ir

$$J_{\mathrm{UFPC}}(X, U_f, U_p, C) = \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{n} (\alpha_f u_{ij}^m(f) + \alpha_p u_{ij}^r(p)) d_{ij}^2 +$$

$$+ \frac{\beta}{r^2 \sqrt{c}} \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{n} (u_{ij}^r(p) \ln(u_{ij}^r(p)) - u_{ij}^r(p))$$

ar pozitīviem svara koeficientiem α_f, α_p. Šeit matricas U_f un U_p sastāv atbilstoši no elementiem $u_{ij}(p)$ un $u_{ij}(f)$. Algoritmu Gustafsona-Kessela modifikācijās $FCM.GK$, $PCM.GK$, $PCA.GK$, $UPFC.GK$ (skat., piemēram, [44]) Eiklīda attālumu aizvieto ar klasteriem raksturīgo Mahalanobisa attālumu.

Validācijas process. Klasterizācijas algoritmus parasti īsteno, pieņemot, ka klasteru skaits c ir iepriekš zināms. Tā kā īstā vērtība c visbiežāk nav zināma, tad jāprot novērtēt klasterizācijas rezultātu atkarībā no c un uz tā pamata noteikt optimālo klasteru skaitu. Šādu procesu sauc par validāciju un realizē, veicot klasterizāciju visiem $c \in \{2, 3, \ldots, c_{\max}\}$, kur $c_{\max}$ ir optimālā klasteru skaita augšējās robežas novērtējums. Iegūtajām sadalēm izrēķina validācijas funkcijas vērtības, ko salīdzina savā starpā, un saskaņā ar validācijas funkcijas loģiku izvēlās optimālo c. Šajā darbā tika izmantoti četri dažādos ar klasterizāciju saistītos rakstos visvairāk pieminētie validācijas indeksi (skat., piemēram, [53]): modificētais sadales koeficients MPC (angļu valodā — *Modified*

Partition Coefficient), Fukujama un Sugeno (*Fukuyama and Sugeno*) validācijas funkcija FS, Ksī un Beni (*Xie and Beni*) validācijas funkcija XB, kā arī atdalamības un kompaktības funkcija SC (angļu valodā — *Separation and Compactness*). Ņemot vērā, ka rezultāts, kas tiek iegūts, lietojot vienu no indeksiem, var tikt interpretēts kā viena eksperta novērtējums, tālāk klasteru optimālā skaita noteikšanai tika pielietota ekspertu viedokļu agregācijas procedūra. Atbilstoši katram ekspertam (t.i., validācijas indeksam) tiek ieviesta nestrikta priekšrocību attiecība ar validācijas rezultātam atbilstošu matricu, pēc tam četras priekšrocību attiecības R_{MPC}, R_{SC}, R_{FS}, R_{XB} tiek agreģētas, un agregācijas rezultāts R izmantots klasteru optimālā skaita noteikšanai.

Klasifikācijas uzdevums ir noteikt kāda jauna objekta piederību jau izdalītajām klasēm, pamatojoties uz zināšanām par apmācības kopas klasteru struktūru. Saskaņā ar prototipu principu klasifikācija tiek veikta, izmantojot informāciju par klasteru prototipiem, kas iegūta klasterizācijas procesā. Šajā stadijā mēs pieņemam, ka trafika laikrindu klases ir uzdotas ar to prototipiem, kas iegūti no apmācības kopas. Mēs apskatām normāla un anomāla (vai nevēlama) trafika klases, un risinam klasifikācijas (jaunas trafika laikrindas atpazīšanas) problēmu. Uzdevums ir noteikt jaunai trafika laikrindai atbilstošo klasteri vai klasificēt to kā nezināmo. Ja trafiks tiek klasificēts kā nezināmais, tad tas arī tiek uzskatīts par anomālo.

Klasifikācijas metode balstās uz klasteru centroidiem c^i, $i=1,2,\dots,c$, kuri tika iegūti klasterizācijas stadijā. Jaunai trafika laikrindai x piederības pakāpes p_i, $i=1,2,\dots,c$, attiecīgajiem klasteriem tiek novērtētas, balstoties uz visiem attālumiem $d(x, c^i)$, $i=1,2,\dots,c$. Darbā piedāvātajā klasifikācijas algoritmā lēmumu pieņemšana notiek, izmantojot anomāliju riska parametru

$$a(x)=\max\{1-\max_{i\in I_{\mathrm{n}}} p_i, \max_{i\in I_{\mathrm{a}}} p_i\},$$

kuru novērtē, balstoties uz piederības pakāpēm un informāciju par klasteriem ar normālu un anomālu trafiku. Formulā ir izmantotas divas klasteru indeksu kopas: kopa I_{n}, kas sastāv no normālam trafikam atbilstošo klasteru indeksiem, un kopa I_{a}, kas sastāv no anomālam trafikam atbilstošo klasteru indeksiem.

Apmācības kopa. Pētot trafika klasifikācijas tehniku, ir svarīgi izmantot bāzes informāciju — apmācības kopu trafika klasifikācijai, kas tiks ņemta kā atskaites punkts. Vispār tas ir sarežģīts uzdevums iegūt trafika datu kopu, kas raksturo reālo tīkla trafiku un satur gan normāla, gan anomāla trafika laikrindas. Cita iespēja ir izmantot ģenerēto trafiku (ģenerējot gan normālu trafiku, gan trafiku ar anomālijām). Promocijas darbā piedāvātā klasifikācijas tehnika ir pārbaudīta, izmantojot ģenerētā trafika datus.

Tīkla agreģēto trafiku raksturo ar šādām īpašībām (skat., piemēram, [27], [54]): pašlīdzības īpašība un *LRD* īpašība (angļu valodā — *Long-Range Dependence*), kura nozīmē lielu korelāciju plašā laika diapazonā. Eksperimentālajos pētījumos daudzi autori (skat., piemēram, [28], [38], [45]) norāda, ka frakcionālais Gausa troksnis var tikt izmantots agreģētā trafika funkciju modelēšanai daudziem trafika tipiem.

Frakcionālais Gausa troksnis ir frakcionālās Brauna kustības procesa pieaugums: $G_H(t) = B_H(t+1) - B_H(t)$, kur $B_H(t)$ ir frakcionālā Brauna kustība laika momentā t ar Hersta eksponenti H. Vidējā vērtība un dispersija simulētiem trafika datiem ir kontrolētas, izmantojot formulu $Y_H(t) = \alpha(t) + \beta(t)G_H(t)$ ar diviem no laika atkarīgiem parametriem $\alpha(t)$ un $\beta(t)$. Ņemot vērā, ka uzģenerētai trafika funkcijai $Z_H(t)$ ir jābūt nenegatīvai, visas ģenerētā lieluma $Y_H(t)$ negatīvās vērtības tiek apgrieztas līdz nullei. Trafika ģenerēšanai tika izmantota *R* programmas [51] pakete *fArma* [56]. Parametru $\alpha(t)$ un $\beta(t)$ izvēle ļauj modelēt dažādus uzbrukumu scenārijus: straujus vai lēnus. Atzīmēsim, ka ir svarīgi konstatēt ne tikai straujus uzbrukumus, bet arī uzbrukumus ar zemu ātrumu, jo uzbrucēji kļūst gudrāki un mēģina slēpt savu klātbūtni, uzsākot uzbrukumus ar ļoti zemu pieaugumu.

Mēs izmantojam datus no ģenerēšanas eksperimentiem un izveidojam apmācības kopu, ņemot 10 000 vērtības no katras ģenerētās trafika laikrindas. Izpildot apmācības kopas trafika laikrindu priekšapstrādi, tiek iegūta to vienkāršota reprezentācija ar mazāko dimensiju (priekšapstrādes parametru izvēle ir aprakstīta tālāk). Trafiks tika ģenerēts, par pamatu ņemot frakcionālo Gausa troksni ar vidējo vērtību μ, dispersiju σ^2 un Hersta parametru H. Frakcionālais Gausa troksnis ir ģenerēts, lietojot programmas *R* paketes *fArma* iebūvēto funkciju *fgnSim*, procesa ģenerēšanai izmantojot Berana metodi (programmas kods ir darba pielikumā). Apmācības kopas izveidei tika uzģenerētas laikrindas, kas reprezentē piecpadsmit veidu trafika paraugus. Ir trafika pamatklases, kas tika iegūtas ar frakcionālo Gausa troksni:

1) ar vidējo vērtību $\mu = 0$ un parametru σ, kas ģenerēts atbilstoši normālajam sadalījuma likumam ar parametriem μ_1 un σ_1;
2) kas ģenerēts līdzīgi pirmās klases paraugam, bet ir ar pievienoto trendu, kas aug vienmērīgi no 0 līdz u ar normālo sadalījuma likumu ar parametriem μ_2 un σ_2;
3) kas ģenerēts līdzīgi pirmās klases paraugam, bet ir ar pievienoto trendu, kas dilst vienmērīgi no v ar normālo sadalījuma likumu ar parametriem μ_2 un σ_2 līdz 0.

Katras pamatklases ģenerēšanas process tiek modificēts, laika intervālā $[T_1, T_2]$ pievienojot uzbrukumu:

1) ar normāli sadalītu intensitāti ar parametriem μ_3 un σ_3, kur laika momenti T_1 un T_2 ir vienmērīgi sadalīti starp t_{3000} un t_{4000} un starp t_{6000} un t_{7000} attiecīgi;
2) ar intensitāti ar augošu trendu no 0 līdz normāli sadalītai vērtībai ar parametriem μ_4 un σ_4, kur laika momenti T_1 un T_2 ir vienmērīgi sadalīti starp t_{3000} un t_{4000} un starp t_{6000} un t_{7000} attiecīgi;
3) ar normāli sadalītu intensitāti ar parametriem μ_3 un σ_3, kur $T_1 = 0$, bet laika moments T_2 ir vienmērīgi sadalīts starp t_{2000} un t_{4000};

4) ar intensitāti ar augošu trendu no 0 līdz normāli sadalītai vērtībai ar parametriem μ_4 un σ_4, kur $T_1 = 0$, bet laika moments T_2 ir vienmērīgi sadalīts starp t_{2000} un t_{4000}.

Apmācības kopa sastāv no 1500 uzģenerētajām laikrindām z: $z(t_i)$, $i = 1, 2, \ldots, N$. Visiem objektiem z mēs piemērojam vienu no priekšapstrādes procedūrām:

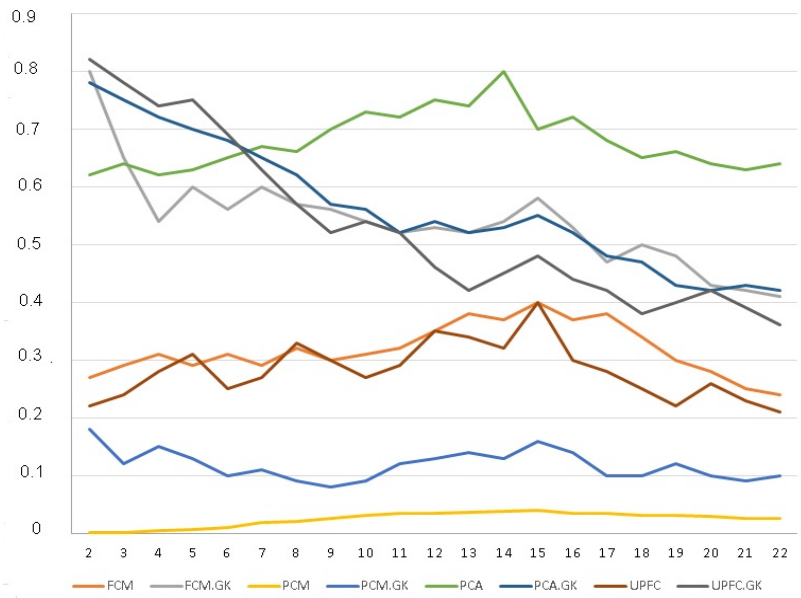
$x = PAA[z]$, $x = F^0[z]$ vai $x = F^1[z]$.

Klasterizācijas rezultāti. Kopa, kas sastāv no vektoriem x, tiek sadalīta klasteros, izmantojot iepriekš aprakstītās klasterizācijas metodes (programmas kods ir darba pielikumā). Lai atrastu klasteru skaitu mēs novērtējam četrus validācijas indeksus katrai klasterizācijas metodei. 10. tab. satur optimālo klasteru skaitu, ko iegūst, risinot optimizācijas problēmas atbilstošajām validācijas funkcijām katrai no astoņām klasterizācijas metodēm (skat. 25. un 26. att.). Izmantojot aprakstīto agregāciju, klasteru skaits eksperimenta apmācības kopai tika novērtēts ar skaitli 15. Mēs pielietojām klasterizācijas tehniku un noteicām klasteru centroīdus, izmantojot visas augstāk minētās metodes. Klasteru centroīdi, kurus ieguvām klasterizācijas rezultātā, nākamajā etapā tiek izmantoti kā prototipi.

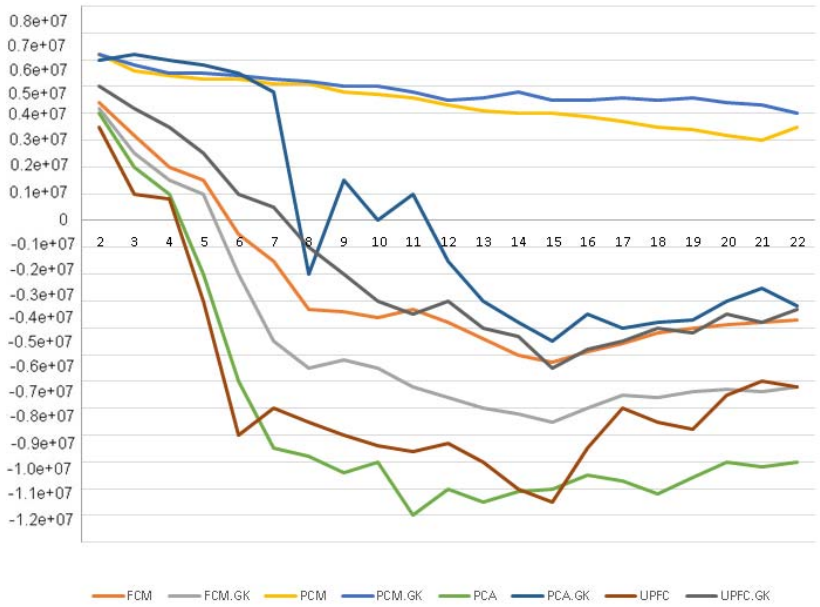
10. tabula.

Klasteru skaita novērtējums validācijas rezultātā.

Validācijas funkcijas	Klasterizācijas metodes							
	FCM	*FCM GK*	*PCM*	*PCM GK*	*PCA*	*PCA GK*	*UPFC*	*UPFC GK*
MPC	15	2	15	2	15	2	15	2
SC	17	19	19	15	8	15	17	15
FS	15	15	19	20	11	15	15	15
XB	15	15	7	2	15	2	15	3



25. att. Validācijas indeksa *MPC* vērtības atkarībā no klasteru skaita.



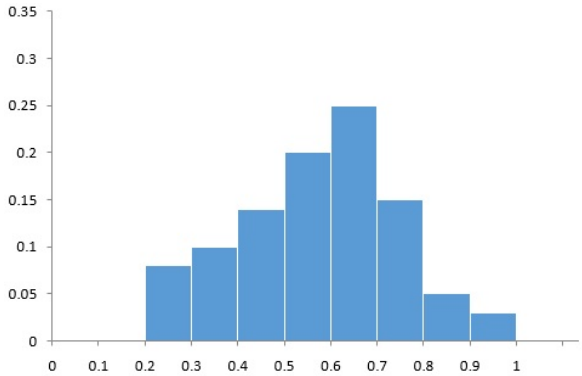
26. att. Validācijas indeksa *FS* vērtības atkarībā no klasteru skaita.

Lai izvērtētu klasterizācijas efektivitāti, mums, pēc būtības, ir jārisina klasifikācijas uzdevums (programmas kods ir darba pielikumā). Mēs izmantojam no jauna uzģenerētās 1500 trafika laikrindas ar izmainītām parametru vērtībām. Jaunu laikrindu klasifikācijas rezultāti ir atkarīgi no pielietotās trafika datu transformācijas metodes un izmantotā klasterizācijas algoritma. Salīdzināsim rezultātus divām metodēm: *FCM* (skat. 11. tab. un 27. att.) un *UPFC.GK* (skat. 12. tab. un 28. att.). Atzīmēsim, ka zemāk aprakstītās tendences ir spēkā arī pārējām sešām metodēm.

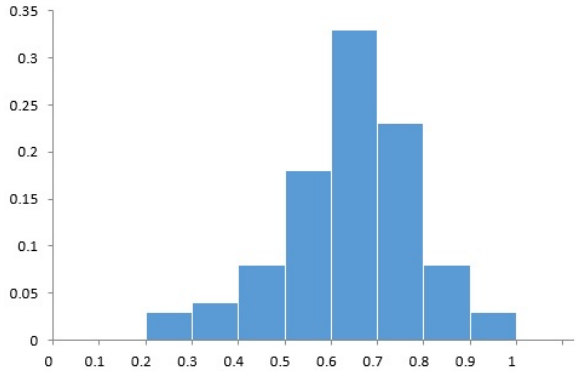
Ņemot vērā, ka mums ir zināma īstā klase katrai uzģenerētajai laikrindai, mēs varam novērtēt, ar kādu piederības pakāpi jaunā laikrinda ir attiecināta uz īsto klasteri. 27. un 28. att. parāda šādi novērtētās piederības pakāpes histogrammu (stabiņa augstums skaitliski vienāds ar īpatsvaru, kas ir aprēķināts laikrindām, kurām iepriekš aprakstītā piederības pakāpe pieder attiecīgajam histogrammas intervālam). 11. un 12. tab. ir veidota pēc līdzīga principa. Viegli redzēt, ka abos gadījumos rezultāts, kas iegūts, lietojot *PAA* metodi, ir tuvs rezultātam, kas iegūts, lietojot F-transformācijas pirmās komponentes. Bet rezultāts, kas iegūts, lietojot F-transformācijas otrās komponentes, ir ievērojami labāks. Gadījumā, kad tika pielietotas F-transformācijas otrās komponentes, klasifikācija, kas balstīta uz sešām klasterizācijas metodēm (FCM, $FCM.GK$, PCA, $PCA.GK$, $UPFC$, $UPFC.GK$), bija veiksmīga 100 % gadījumos (mēs uzskatām jaunas laikrindas klasifikāciju par veiksmīgu, ja iepriekš aprakstītā piederības pakāpe pie īstā klastera pārsniedz 0,5).

Transformācijas parametra izvēle. Algoritms sastāv no diviem posmiem: nestriktā klasterizācija, kas var tikt veikta tikai vienu reizi, un reālā laika nestriktā klasifikācija. Mēs izvērtējām, ka var panākt labu klasifikācijas rezultātu otrajā posmā, nodrošinot klasifikācijai nepieciešamo skaitļošanu reālajā laikā. 13. tab. satur vidējā

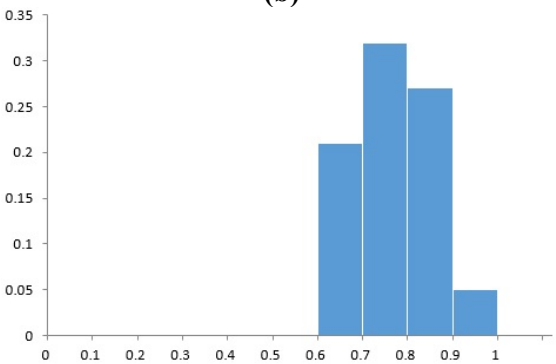
skaitļošanas laika novērtējumu vienai klasifikācijai atkarībā no F-transformācijas procesā izmantotā parametra h vērtības. Lai sasniegtu kompromisu starp skaitļošanas laiku un klasifikācijas kvalitāti, tika izvēlēta parametra h vērtība 1000.



(a)

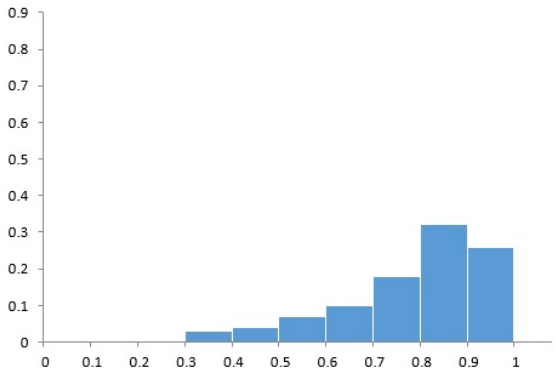


(b)

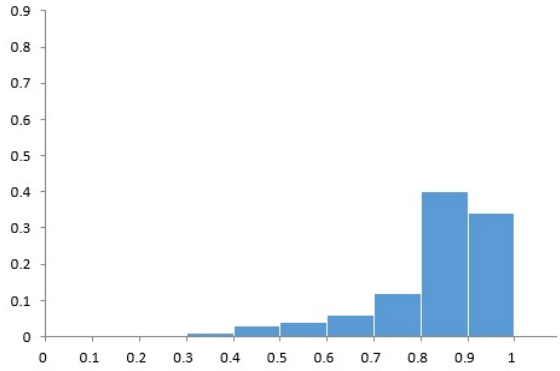


(c)

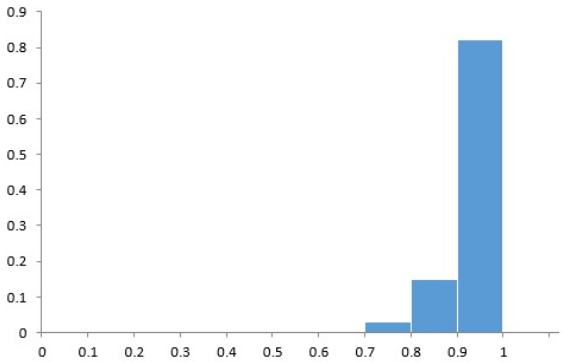
27. att. Klasifikācijas rezultāts, kas iegūts, lietojot *FCM* klasterizācijas metodi un trafika datu transformāciju:
(a) *PAA*;
(b) F-transformāciju;
(c) F^1-transformāciju.



(a)



(b)



(c)

28. att. Klasifikācijas rezultāts, kas iegūts, lietojot *UPFC.GK* klasterizācijas metodi un trafika datu transformāciju:
(a) *PAA*;
(b) F-transformāciju;
(c) F^1-transformāciju.

11. tabula.

Klasifikācijas rezultāti, kas iegūti, lietojot *FCM* klasterizācijas metodi.

Piederības pakāpe īstajam klasterim	Transformācijas metode		
	PAA	F-transformācijas pirmās komponentes	F-transformācijas otrās komponentes
> 0,2	100 %	100 %	100 %
> 0,3	92 %	97 %	100 %
> 0,4	82 %	93 %	100 %
> 0,5	68 %	85 %	100 %
> 0,6	48 %	67 %	85 %
> 0,7	23 %	34 %	64 %
> 0,8	8 %	11 %	31 %
> 0,9	3 %	3 %	5 %

12. tabula.

Klasifikācijas rezultāti, kas iegūti, lietojot *UPFC.GK* klasterizācijas metodi.

Piederības pakāpe īstajam klasterim	Transformācijas metode		
	PAA	F-transformācijas pirmās komponentes	F-transformācijas otrās komponentes
> 0,2	100 %	100 %	100 %
> 0,3	100 %	100 %	100 %
> 0,4	97 %	99 %	100 %
> 0,5	93 %	96 %	100 %
> 0,6	86 %	92 %	100 %
> 0,7	76 %	85 %	98 %
> 0,8	58 %	73 %	95 %
> 0,9	26 %	34 %	82 %

13. tabula.

Parametra *h* ietekme uz klasifikācijas procesu.

h	Skaitļošanas vidējais laiks vienai klasifikācijai (ms)	Veiksmīgo klasifikāciju īpatsvars (%)
100	0,052	100,0
1000	0,015	100,0
5000	0,060	24,1

Anomāliju konstatēšanas rezultāti. Šajā etapā tika pielietotas sešas klasterizācijas metodes un F-transformācijas otrās komponentes, ņemot vērā iepriekš izdarītos secinājumus. Lai izvērtētu metožu efektivitāti anomāliju konstatēšanas uzdevuma risināšanai, mēs novērtējām anomālijas riska līmeni katrai no jauna uzģenerētajai trafika laikrindai ar anomāliju. Anomālijas risku līmenis tika novērtēts, izmantojot piederības pakāpes visiem 15 klasteriem. 14. tab. apkopo rezultātus, kas iegūti, izmantojot dažādus klasterizācijas algoritmus. Katra tabulas kolonna atbilst gadījumam, kad anomāliju risks ir lielāks vai vienāds ar kādu no līmeņiem (attiecīgi, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8 un 0,9). Atbilstošā vērtība parāda, cik lielai laikrindu daļai izpildās šis nosacījums. Viegli redzēt, ka visas sešas apskatītās metodes (FCM, $FCM.GK$, PCA, $PCA.GK$, $UPFC$, $UPFC.GK$) konstatēja trafika anomāliju, piešķirot anomālijas indikatoram vērtību, kas ir lielāka par 0,5, 100 % gadījumos ar anomālajām trafika laikrindām. Taču labākie rezultāti tiek iegūti, izmantojot $PCA.GK$ un $UPFC.GK$ metodes.

14. tabula.

Klasifikācijas rezultāti trafikam ar anomālijām.

Klasterizācijas metodes	Anomālijas riska līmenis				
	> 0,5	> 0,6	> 0,7	> 0,8	> 0,9
FCM	100 %	99 %	97 %	65 %	0 %
FCM.GK	100 %	100 %	94 %	57 %	0 %
PCA	100 %	100 %	99 %	98 %	96 %
PCA.GK	100 %	100 %	100 %	99 %	98 %
UPFC	100 %	100 %	99 %	98 %	96 %
UPFC.GK	100 %	100 %	100 %	99 %	98 %

Šīs metodes ir konstatējušas anomāliju, piešķirot anomālijas riska indikatoram vērtību, kas ir lielāka par 0,7, 100 % gadījumos ar anomālajām trafika laikrindām. Nestriktās klasterizācijas un klasifikācijas gadījumos, kad rezultāti tiek novērtēti pēc piederības pakāpēm, ir svarīgi pareizi noteikt tādu slieksni anomālijas riska indikatoram, lai ar šo sliekšņa vērtību klasifikācija būtu efektīva. Vēlamies uzsvērt, ka ir svarīgi, lai sliekšņa vērtība būtu stipri lielāka par 0,5. Divas metodes $PCA.GK$ un $UPFC.GK$ tika aprobētas, lietojot sliekšņa vērtību 0,7, anomālijas riska līmenim. Eksperimentos ar 6000 laikrindām, no kurām 3000 bija ar anomālijām, anomālija tika konstatēta 99,2 % no visiem anomālijas gadījumiem (anomālijas konstatēšanas līmenis; angļu valodā — *Detection Rate*, *DR*). Savukārt riska līmenis pārsniedza slieksni 0,7 tikai 0,97 % no visiem gadījumiem bez anomālijas (viltus trauksmes līmenis; angļu valodā — *False Alarm Rate*, *FAR*).

Piedāvātās metodes novērtēšanai salīdzināsim iegūtos rezultātus ar citu zināmo metožu efektivitātes rādītājiem, kas apkopoti 15. tabulā, balstoties uz publikācijas [4] datiem (uz zināšanām balstītas metodes izmanto iepriekš definētās uzbrukumu

likumsakarības vai paraugus). Tabulas trešā aile satur norādi uz iespēju nodrošināt trafika klasifikāciju reālajā laikā (angļu valodā — *Real-time or Non-real time*).

Var redzēt, ka piedāvātā metode ir konkurētspējīga minēto metožu saimē. Turklāt, ja mēs varētu pamatoti spriest par metožu priekšrocībām, balstoties uz šādiem datiem, tad divu rādītāju *DR* un *FAR* kopvērtējumā būtu jāizdara secinājums par piedāvātās metodes priekšrocībām salīdzinājumā ar citām minētajām metodēm. Atzīmēsim, ka šādu secinājumu varētu uzskatīt par pilnībā pamatotu tikai gadījumā, kad rādītāju *DR* un *FAR* novērtējumos izmantoti vienādi dati. Tomēr pieminētais ierobežojums nenovērš iespēju novērtēt piedāvāto metodi kā konkurētspējīgu.

15. tabula.

***DDoS* uzbrukumu konstatēšanas metožu salīdzinājums.**

Metode	Izmantotā pieeja	*R / N*	*DR*	*FAR*
DCD approach	statistiskā	*R*	98 %	< 1 %
SPUNNID model	statistiskā	*R*	94,9 %	5 %
Decision tree model	uz zināšanām balstīta	*R*	98 %	2,4 %
Clustering model	statistiskā	*N*	98,65 %	1,12 %
RBF neural net model	nestingrā skaitļošana	*R*	98,2 %	0,1 %
T-test model	statistiskā	*R*	98 % – 100 %	5 % – 7 %
Perimeter based system	uz zināšanām balstīta	*R*	93 %	0,05 %
K-NN classifier approach	statistiskā	*R*	91,88 %	8,11 %
Linear prediction model	statistiskā	*R*	96,1 %	0,8 %
Ensemble of neural net model	nestingrā skaitļošana	*N*	99,4 %	3,7 %

Šis pētījums ļauj mums dot priekšroku divām klasterizācijas metodēm: *PCA.GK* un *UPFC.GK*. Aprobējot klasifikācijas mērķim trīs trafika datu priekšapstrādes metodes, tika noteikts, ka labāka pēc trafika anomālijas konstatēšanas kritērija ir pirmās pakāpes F-transformācija. Ir izdarīts secinājums par sliekšņa vērtību anomālijas riska novērtēšanai. Lietojot *PCA.GK* un *UPFC.GK* metodi ar datu priekšapstrādi uz pirmās pakāpes F-transformācijas pamata un izmantojot sliekšņa vērtību 0,7 anomālijas riska novērtēšanai, tika konstatēts, ka simulācijas eksperimentos anomālijas konstatēšanas līmenis *DR* ir lielāks par 99 %, bet viltus trauksmes līmenis *FAR* ir ap 1 %.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Saskaņā ar *ITU* ieceri, *NGN* būs spējīgs vadīt daudzus virtuālos tīklus uz vienotās fiziskās infrastruktūras bāzes, kurā katrs virtuālais tīkls tiks loģiski izolēts no citiem un ir domāts specifiskās trafika klases apkalpošanai. Prognozē, ka virtualizācija kļūst par interneta arhitektūras vienu no svarīgākajiem risinājumiem.

Promocijas darbā tika izstrādāts *NGN* tīklu caurlaides joslas resursu vadības mehānisms, kas balstās uz nestriktās loģikas principiem un nodrošina lēmumu pieņemšanu

virtuālo tīklu mainīgā vidē, kas spēj efektīvi pārdalīt joslas platumu starp trafika klasēm ar dažādām *QoS* prasībām. *CPN Tools* vidē tika realizēts piedāvātā mehānisma simulācijas modelis. Simulēšanas eksperimentu rezultātā tika pilnveidoti uz nestriktā izvedumu modeļa *FIS* bāzes izveidotās lēmumu pieņemšanas sistēmas elementi un rīki, kā arī uzlaboti lēmumu pieņemšanas sistēmas parametri. Sākotnēji tīkla caurlaides joslas resursu vadības algoritms tika aprakstīts divu virtuālo tīklu gadījumā. Vēlāk tika parādīts, ka arī gadījumā, kad virtuālo tīklu skaits pārsniedz 2, nestriktās pieejas kontekstā var atrast risinājumu tīkla caurlaides joslas resursu pārdalei, iesaistot spēļu teorijas principus.

Promocijas darba izstrādes laikā trafika klasifikācijas uzdevuma risināšanai tika aprobētas vairākas nestriktās klasterizācijas un klasifikācijas metodes, īpašu uzmanību pievēršot trafika datu transformācijai un uzdevuma dimensijas samazināšanai. Skaitlisko eksperimentu rezultātā ir noskaidrotas vispiemērotākās metodes, kā arī ir izteiktas rekomendācijas metožu parametru izvēlei. Ir parādīts, ka trafika datu pareizas transformācijas izmantošana ļauj uzlabot klasifikācijas rezultātus. Ir pamatotas nestriktās transformācijas priekšrocības salīdzinājumā ar klasisko viduvēšanas metodi pēc trafika anomālijas konstatēšanas kritērija.

Rezumēsim paveikto promocijas darba izstrādes laikā:

1) Integrējot uz nestriktās loģikas balstītas metodes, spēļu teorijas principus un *DaVinci* pieeju, promocijas darbā tika izstrādāts *NGN* tīklu caurlaides joslas resursu vadības mehānisms, kas nodrošina lēmumu pieņemšanas atbalstu mainīgajā vidē.
2) Iegūtā modeļa testēšana tika realizēta *CPN Tools* vidē ar autores izstrādāto procedūru. Testi parādīja izstrādātā mehānisma spēju ātri reaģēt uz trafika izmaiņām un nodrošināt trafika klašu *QoS* parametru saglabāšanu pieļaujamās robežās.
3) Izstrādātā lēmumu pieņemšanas atbalsta sistēma ir realizēta *Matlab* vidē, lietojot uz nestriktās loģikas balstītus rīkus.

Balstoties uz promocijas darba izstrādes laikā paveikto, ir iegūti šādi galvenie secinājumi:

1) Simulēšanas eksperimentos ar trafika klasēm ar atšķirīgām *QoS* prasībām ir parādīts, ka izstrādātais caurlaides joslas platuma dinamiskās pārdales mehānisms *FuzDSS* spēj ātri reaģēt uz trafika izmaiņām un nodrošināt trafika klašu *QoS* parametru saglabāšanu pieļaujamās robežās.
2) Simulēšanas eksperimenti ar divām trafika klasēm *DST* un *TST* parādīja, ka lēmumu pieņemšanas atbalsta sistēmas *FuzDSS* izmantošana spēj uzlabot svarīgus *QoS* rādītājus: uz aizturi jūtīgam trafikam pakešu aiztures vidējā vērtība samazinājās par 23 %; vienlaicīgi uz caurlaidspēju jūtīgam trafikam virtuālā linka noslodze vidēji pacēlās par 5 %.
3) Trīs trafika klasēm veiktspējas rādītāji gadījumā, kad simulēšanas eksperimentos tika izmantota izstrādātā *FuzDSS* sistēma, arī uzlabojās: uz aizturi jūtīgām trafika klasēm — pakešu aiztures vidējā vērtība samazinājās par 9 % līdz 19 %, uz caurlaidspēju

jūtīgam trafikam noslodze vidēji pacēlās par 2 % līdz 4 %, uz trīci jūtīgām trafika klasēm — trīce vidēji samazinājās par 4 % līdz 8 %.

4) Ir dotas rekomendācijas piedāvātās metodes parametru izvēlei: lēmuma pieņemšanas mainīgo lingvistisko vērtību parametriem, *FAM* tabulu vērtībām, lēmuma pieņemšanas sliekšņa parametriem (rekomendēts izmantot $d_1 = 0,4$ un $d_2 = 0,6$).
5) Veicot vairāku klasterizācijas un transformācijas algoritmu salīdzināšanu, tīkla trafika anomāliju konstatēšanas uzdevuma risināšanai ir rekomendēta trafika datu klasifikācijas metode, kas balstās uz nestriktās klasterizācijas algoritmiem *PCA.GK* un *UPFC.GK* un izmanto pirmās pakāpes F-transformācijas otrās komponentes.
6) Ir dotas rekomendācijas sliekšņa vērtības izvēlei (rekomendētā sliekšņa vērtība 0,7) anomālijas riska indikatoram, veicot trafika klasifikāciju ar anomālijas konstatēšanas mērķi. Lietojot *PCA.GK* un *UPFC.GK* metodes ar datu priekšapstrādi uz pirmās pakāpes F-transformācijas pamata, eksperimentos tika novērtēts, ka anomālijas konstatēšanas līmenis *DR* ir lielāks par 99 %; bet viltus trauksmes līmenis *FAR* ir ap 1 %, kas liecina par piedāvātās metodes konkurētspējību salīdzinājumā ar citām zināmajām metodēm.
7) Ir izstrādātas rekomendācijas nestriktās transformācijas parametra izvēlei (rekomendēts lietot h = 1000), veicot trafika datu priekšapstrādi ar pirmās pakāpes F-transformāciju trafika klasifikācijas mērķim. Ir novērtēts vienas klasifikācijas vidējais skaitļošanas laiks (0,015 ms), kas liecina par labu kompromisu starp skaitļošanas laiku un klasifikācijas kvalitāti pie šādas parametra izvēles.

Uzskatu, ka izvirzītais mērķis ir sasniegts un darba uzdevumi ir izpildīti. Rezumējot promocijas darbu, gribu uzsvērt, ka iegūtie rezultāti ir daudzsološi. Tie parāda, ka arī ar tīkla resursu vadību saistītajos uzdevumos uz nestriktās loģikas balstītie risinājumi spēj nodrošināt dinamisku vadību un kontroli mainīgā vidē nepilnas informācijas apstākļos.

LITERATŪRA

1. L. Aleksejeva, O. Užga-Rebrovs un A. Borisovs, Klasifikācija un klasteranalīze izplūdušajā vidē, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2012.
2. T. Anderson, L. Peterson, S. Shenker and J. Turner, Overcoming the Internet impasse through virtualization, IEEE Computer, vol. 38, no. 4, 2005, pp. 34–41.
3. J. C. Bezdek, Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms, Plenum Press, New York, 1981.
4. M. H. Bhuyan, H. J. Kashyap, D. K. Bhattacharyya and J. K. Kalita, Detecting distributed denial of service attacks: methods, tools and future directions, Computer Journal, vol. 57, 2014, pp. 537–556.
5. N. M. Chowdhury and R. Boutaba, A survey of network virtualization, Computer Networks, vol. 54, no. 5, pp. 862–876, 2010.
6. Cisco visual networking index: forecast and methodology, 2014–2019, White paper. [Online]

Available:http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.html [retrieved: June, 2015]

7. Computer Emergency Response Team (CERT-EU), DDoS overview and incident response guide, 2014. [Online]
   Available: http://cert.europa.eu/static/WhitePapers [retrieved: May, 2015]
8. C. Douligeris and A. Mitrokotsa, DDoS attacks and defense mechanisms: classification and state-of-the-art, Computer Networks, vol. 44, 2004, pp. 643–666.
9. M. L. Dramitinos, A bandwidth allocation mechanism for 4G, Proceedings of European Wireless Technology Conference, Rome, 2009, pp. 96–99.
10. V. Gehlo and C. Nigro, An introduction to system modeling and simulation with coloured Petri nets, Proceedings of Winter Simulation Conference, Baltimore, Maryland, USA, 2010, pp. 104–118.
11. A. Haider, R. Potter and A. Nakao, Challenges in resource allocation in network virtualization, Proceedings of the 20th ITC Specialist Seminar, Hoi An, Vietnam, 2009.
12. Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Basar and A. Hjorungnes, Game theory in wireless and communication networks: theory, models, and applications, Cambridge University Press, 2012.
13. J. He, R Zhang-Shen, Y. Li, C.-Y. Lee, J. Rexford and M. Chiang, DaVinci: dynamically adaptive virtual networks for a customized Internet, ACM CoNEXT Conference, ACM, New York, 2008.
14. International Telecommunication Union, Framework of virtualization for future networks, Series Y: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks, Recomendation ITU-T Y.3011, 2012. [Online]
    Available: http://www.itu.int/ITU-T/recommendations [retrieved: June, 2014]
15. International Telecommunication Union, Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters, Series Y: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks, Recomendation ITU-T Y.1540, 2011. [Online]
    Available: http://www.itu.int/ITU-T/recommendations [retrieved: August, 2013]
16. International Telecommunication Union, Network performance objectives for IP-based services, Series Y: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks, Recomendation ITU-T Y.1541, 2011. [Online]
    Available: http://www.itu.int/ITU-T/recommendations [retrieved: August, 2013]
17. International Telecommunication Union, Requirements of network virtualization for future networks, Series Y: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks, Recomendation ITU-T Y.3012, 2014. [Online]
    Available: http://www.itu.int/ITU-T/recommendations [retrieved: January, 2015]
18. International Telecommunication Union, Resource and admission control functions in next generation networks, Series Y: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks, Recomendation ITU-T Y.2111, 2011. [Online]
    Available: http://www.itu.int/ITU-T/recommendations [retrieved: February, 2014]
19. J. Jeļinskis, Faziloģikas balstīta piekļuves vadība MPLS-TE/GMPLS tīklos, Promocijas darbs, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, 2011.
20. K. Jensen, Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use, vol. 1, Springer-Verlag, London, 1992.
21. K. Jensen, Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use, vol. 2, Springer-Verlag, London, 1995.
22. K. Jensen, Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use, vol. 3, Springer-Verlag, London, 1997.

23. K. Jensen, L. Kristensen and L. Wells, Coloured Petri nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems, International Journal on Software Tools for Technology Transfer, vol. 9, 2007, pp. 213–254.
24. E. Keogh, K. Chakrabarti, M. Pazzani and S. Mehrotra, Dimensionality reduction for fast similarity search in large time series databases, Knowledge and Information Systems, vol. 3, 2001, pp. 263–286.
25. R. Krishnapuram and J. M. Keller, The possibilistic C-means algorithm: insights and recommendations, IEEE Fuzzy Systems, vol. 4, no. 3, 1996, pp. 385–393.
26. K. Lee, J. Kim, K. H. Kwon, J. Han and S. Kim, DDoS attack detection method using cluster analysis, Expert Systems with Applications, vol. 34, 2008, pp. 1659–1665.
27. W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger and D. V. Wilson, On the self-similar nature of Ethernet traffic, Networking, IEEE/ACM Transactions, vol. 2, no. 1, 1994, pp. 1–15.
28. M. Li, C.-H. Chi and D. Long, Fractional Gaussian noise: a tool of characterizing traffic for detection purpose, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3309, 2004, pp. 94–103.
29. X. Lin and N. Shroff, Utility maximization for communication networks with multi-path routing, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 51, 2006, pp. 766–781.
30. W. Liu, S. Li, Y. Xiang, and X. Tang, Dynamically adaptive bandwidth allocation in network virtualization environment, Advances in Information Sciences & Service Sciences, vol. 4, no. 1, 2012.
31. E. H. Mamdani and S. Assilian, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, International Journal of Man-Machine Studies, vol. 7, no. 1, 1975, pp. 1–13.
32. A. Masuda, A. Isogai, T. Miyamura, and K. Shiomoto, Experiments of operating multiple virtual networks over IP-optical network, Proceedings of the 37th European Conference on Optical Communication ECOC, Geneva, Switzerland, 2011.
33. M. Mellia, A. Pescapč and L. Salgarelli, Traffic classification and its applications to modern networks, Computer Networks, vol. 53, 2009, pp. 759–760.
34. F. Meshkati, A. Goldsmith, H. Poor and S. Schwartz, A game-theoretic approach to energy-efficient modualtion in CDMA networks with dealy QoS constraints, IEEE Transactions on Communications, vol. 25, no. 6, 2007, pp. 11–14.
35. T. Miyamura, A. Masuda, and K. Shiomoto, High-performance network virtualisation for multilayer GMPLS networks, International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, vol. 6, no. 3, pp. 283–301, 2011.
36. Nākamās paaudzes platjoslas elektronisko sakaru tīklu attīstības koncepcija 2013.–2020. gadam, apstiprināta ar LR Ministru kabineta 2012. gada 7. decembra rīkojumu Nr. 589, Rīga, 2012.
37. A. Nakao, Network virtualization as foundation for enabling new network architectures and applications, IEICE Transactions on Communications, vol. E93-B, no. 3, 2010, pp.454–457.
38. I. Norros, On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks, Selected Areas in Communications, vol. 13, 1995, pp. 953–962.
39. V. Novák, V. Pavliska, I. Perfilieva, M. Stepnička, F-transform and fuzzy natural logic in time series analysis, Advances in Intelligent Systems Research, vol. 32, 2013, pp. 40–47.
40. V. Novák and I. Perfilieva, Time series mining by fuzzy natural logic and F-transform, Proceedings of the 48th Hawaii International Conference on System Sciences HICSS, 2015, pp. 1493–1502.
41. V. Novák, I. Perfilieva, M. Holčapek and V. Kreinovich, Filtering out high frequencies in time series using F-transform, Information Sciences, vol. 274, 2014, pp. 192–209.
42. F. O. Oderanti and P. De Wilde, Dynamics of business games with management of fuzzy rules for decision making, International Journal on Production Economics, vol. 128, 2010, pp. 96–109.
43. F. O. Oderanti and P. De Wilde, Automatic fuzzy decision making system with learning for competing and connected businesses, Expert Systems with Applications, vol. 38, 2011, pp.14574–14584.

44. J. V. De Oliveira and W. Pedrycz, Advances in fuzzy clustering and its applications, John Wiley and Sons, 2007.
45. V. Paxson, Fast approximate synthesis of fractional Gaussian noise for generating self-similar network traffic, Computer Communication Review, vol. 27, 1997, pp. 5–18.
46. I. Perfilieva, Fuzzy transforms and their applications to image compression. Fuzzy Logic and Applications, LNAI 3849, 2005, pp. 19–31.
47. I. Perfilieva, Fuzzy transforms: Theory and applications, Fuzzy Sets and Systems, vol. 157, 2006, pp. 993–1004.
48. I. Perfilieva, M. Danková and B. Bede, Towards a higher degree F-transform, Fuzzy Sets and Systems, vol. 180, 2011, pp. 3–19.
49. A. Piegat, Fuzzy modeling and control, Physica-Verlag, Heidelberg, 2001.
50. A. V. Ratzer, L. Wells, H. M. Larsen, M. Laursen, J.F. Qvortrup, M. S. Stissing, M. Westergaard, S. Christensen and K. Jensen, CPN Tools for editing, simulating and analysing coloured Petri net, Lecture Notes in Computer Science, vol. 2679, 2003, pp. 450–462.
51. R Core Team, R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014. [Online]
Available: http://www.R-project.org [retrieved: May, 2014]
52. T. E. Ross, Fuzzy logic with engineering applications, McGraw-Hill, New York, 1995.
53. W. Wang and Y. Zhang, On fuzzy cluster validity indices, Fuzzy Sets and Systems, vol. 158, 2007, pp. 2095–2117.
54. W. Willinger, M. S. Taqqu, W. E. Leland and D. V. Wilson, Self-similarity in high-speed packet traffic: analysis and modeling of Ethernet traffic measurements, Statistical Science, vol. 10, 1995, pp. 67–85.
55. X. Wu, B. Wu, J. Sun and H. Fu, Unsupervised possibilistic fuzzy clustering, Journal of Information & Computational Science, vol. 7, no. 5, 2010, pp. 1075–1080.
56. D. Wuertz, fArma: ARMA Time Series Modelling, 2013. [Online]
Available: http://CRAN.R-project.org/package=fArma [retrieved: April, 2014]
57. Z. Xia, S. Lu, J. Li and J. Tang, Enhancing DDoS flood attack detection via intelligent fuzzy logic, Informatica, vol. 34, 2010, pp. 497–507.
58. Z. Xiong, Y. Wang and X. F. Wang, Distributed collaborative DDoS detection method based on traffic classification features, Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering ICCSEE, Atlantic Press, Paris, 2013, pp. 93–96.
59. M.-S. Yang and K.-L. Wu, Unsupervised possibilistic clustering, Pattern Recognition, vol. 39, 2006, pp. 5–21.
60. L. A. Zadeh, Fuzzy sets, Information and Control, vol. 8, 1965, pp. 338–353.
61. L. A. Zadeh, The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems, Fuzzy Sets and Systems, vol. 11, 1983, pp. 199–227.
62. L. A. Zadeh, Towards a theory of fuzzy systems, Aspects of Network and System Theory, Rinehart and Winston, New York, 1971.
63. Y. Zhang, C. Wang and Y. Gao, A virtualized network architecture for improving QoS, International Journal on Information Engineering and Electronic Business, vol. 1, 2009, pp. 17–24.
64. Y. Zhou, Y. Li, G. Sun, D. Jin, L. Su and L. Zeng, Game theory based bandwidth allocation scheme for network virtualization, Proceedings of the Global Communications Conference IEEE GlobeCom 2010, Miami, Florida, USA, 2010.