

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE  
Elektronikas un Telekomunikācijas Fakultāte  
Transporta Elektronikas un Telemātikas Katedra

Mihails Kuļikovs

Doktora studiju programmas "Transporta Datorvadības,  
Informācijas un Elektroniskās Sistēmas"

PIEKĻUVES KONTROLES SISTĒMU  
EFEKTĪVU VADĪBAS ALGORITMU  
PĒTĪŠANA UN IZSTRĀDE  
TELEKOMUNIKĀCIJU TĪKLIEM

Promocijas darba kopsavilkums

Vadītājs

Dr. habil. sc. ing., profesors  
Ernests Pētersons

Rīga 2010

UDK 621.39+004.7](043.2)

Ku 323 p

Kulikovs M. Piekļuves kontroles sistēmu efektīvu vadības algoritmu pētīšana un izstrāde telekomunikāciju tīkliem. - R.:RTU, 2010.-41 p.

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes "RTU P-08" 2010.gada 30.septembrī lēmumu, protokols Nr.3

ISBN

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA  
IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2010.g  
20. janvārī, plkst. 17:00, Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un Telekomunikāciju  
fakultātē, Āzenes ielā 12, 210 auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Profesors, Dr. sc. ing. Gunārs Lauks  
Rīgas Tehniskā Universitāte, Elektronikas un Telekomunikāciju Fakultāte

Profesors, Dr. sc. comp. Guntis Bārzdiņš  
Latvijas Universitāte, Datorikas Fakultāte

Profesors, Dr. habil. Algimantas Kajackas  
Viļņas Ģedimina Tehniskā Universitāte, Elektronikas Fakultāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Mihails Kuļikovs .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas, secinājumus, lit-  
eratūras sarakstu, 5 pielikumus, 112 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 200 lpp. Literatūras  
sarakstā ir 175 nosaukumi.

# Anotācija

Šī darba pamatuzdevums – izstrādāt vadības algoritmus datu plūsmu piekļuves sistēmai pie komunikāciju resursiem, vienlaicīgi nodrošinot uzdoto apkalpošanas kvalitāti.

Tika pētīti sekojošie algoritmi: piekļuves vadības un plūsmu dispečerizācijas algoritmi, resursu pārdales algoritmi, sistēmas noslodzes maksimizācijas algoritmi ar apkalpošanas kvalitātes garantiju nodrošināšanu.

Pētījumu rezultātā tika izstrādās rekomendācijas piekļuves vadības sistēmas funkcionēšanas optimizācijai. Izstrādāto rekomendāciju pārbaudei tika izmantota *OPNET* modelēšanas sistēma.

# Vispārējais darba apraksts

Tēmas aktualitāte: Darba aktualitāti apliecina tas, ka 2010. gada beigās resursu pieprasījums ievērojami pārsniegs eksistējošā globālā tīkla kapacitāti. To apstiprina atskaite, ko izveidoja pētniecības laboratorija Nemerset Research [72]. Piedāvājamā darbā tika uzstādīts mērķis izstrādāt algoritmus un programmas tīkla resursu efektīvajai izmantošanai.

Darba mērķi: Sakarā ar to, šī darba uzdevums ir izstrādāt efektīvus plūsmu vadības algoritmus un sadalīt resursu plūsmu piekļuves vadības sistēmā. Metožu efektivitāte tiek panākta optimāli izmantojot komunikācijas sistēmas resursus, tādus kā buferatmiņa un kanāla caurlaides spēja. Resursu optimālā izmantošanu panāk, risinot optimizācijas uzdevumus, kas virzītas uz tādas buferatmiņas un caurlaides joslas attiecības aprēķina, pie kuras izpildītos prasības Quality of Service (QoS), bet sistēmas izdevumu būtu minimāli.

Pētīšanas metodika: Uzstādītā uzdevuma izpildei tiek izmantoti teorētiskie aprēķini, kuriem tika izstrādāti gan analītiskie modeļi, gan arī skaitliskie, uz kuru pamata tiek risināti optimizācijas uzdevumi. Teorētiskos aprēķinus apliecina imitēšanas eksperimentu rezultāti. Eksperimentu veikšanai tika izveidots Measurement-Based Admission Control (MBAC) modelis OPNET imitācijas vidē.

Pētīšanas rezultāti un zinātniskā novitāte: Plūsmu vadība notiek reāllaika režīmā, līdz ar to optimizācijas procedūrai jādod risinājums pēc iespējas ātrāk. Tas ir iespējams tikai tadā gadījumā, kad ir zināms analītiskais modelis, kas apraksta komutācijas mezglu. Autoram nav zināms analītiskais modelis, ar kuru varētu aprakstīt mezgla ienākošo trafiku ar sevlīdzīgu raksturu, kas prevalē mūsdienu tīklos. Tāpēc autors veica pētījumus, kas pierādīja, ka tāda komutācijas sistēma ar norādīto plūsmu var būt veiksmīgi aizvietota ar rindas modeli un grupas ienākošo datu plūsmu, kur pakešu skaits grupā tiek uzdots ar geometriskā sadalījuma koeficientu.

Kad kļuva zināms analītiskais risinājums, autors uzstādīja sev uzdevumu un izstrādāja algoritmu, kas aprēķina optimālo komunikāciju sistēmas buferatmiņas un kanāla caurlaides spējas optimālo attiecību projektēšanas stadijā, ievērojot uzdotās prasības ieejas paketēm. Arī tika parādīts, ka izstrādāto algoritmu var pielietot plūsmu kontrolei piekļuves reāllaika

vadības sistēmas funkcionēšanas laikā.

Agrāk vairākos darbos tika postulēts, un šī darba autors to pierādīja, ka piekļuves vadībai uz mērījumu pamata ir vislabākie rādītāji, salīdzinot ar sistēmām, kur tikai deklarē parametrus iepriekš. Tas fakts, ka nav nekādu rekomendāciju attiecībā uz mērījumu veikšanas procedūru, pamudināja autoru izstrādāt rekomendācijas mērījumu loga garuma un sevlīdzīgā rakstura trafika mērījumu biežuma izvēlei. Izstrādātas rekomendācijas pielietojamas trafika mērījumiem gan iepriekš izveidotajiem savienojumiem, gan arī jauniem pieļautiem savienojumiem.

Acīmredzams, ka pirms ienākošas plūsmas pieslēgšanas atļaušanas nepieciešams novērtēt sistēmas noslodzi, t.i. novērtēt iepriekš izveidoto savienojumu parametrus, kas sistēmā MBAC tiek veikts uz iepriekš izveidoto plūsmu parametru mērīšanas pamata. Pamatojoties uz informācijas apjoma novērtējuma, kas tika iegūts no mērījumiem, autors atrod optimālo tās izvilkuma apjomu.

Darbā tiek pierādīts, ka izvilkuma apjoms var variēt plašajā diapazonā, praktiski neietekmējot trafika parametru novērtēšanas precizitāti.

Darbā ir izstrādāts piekļuves vadības algoritms, kas balstās uz paketes zuduma varbūtības. Paketes zuduma varbūtību aprēķina, ievērojot trafika sevlīdzīguma parametru ( $H$ ). Lēmuma pieņemšanas ātruma palielināšanai sistēmā piedāvāts izmantot iepriekš aprēķinātus tabulas datus. Parametri  $\gamma$  un  $H$  var būt salīdzināti, izmantojot rindu modeļus grupas un sevlīdzīgā rakstura trafikiem, neievērojot buferatmiņas apjoma ierobežojumu. Tomēr,  $H$  parametrs precīzāk izsaka trafika sevlīdzīgumu, nekā grupveida trafika parametrs  $\gamma$ . Šī iemesla dēļ autors piedāvāja izmantot analītisko grupveida trafika modeli projektēšanas stadijā, bet reāllaika piekļuves vadību veikt, izmantojot skaitlisko komutācijas sistēmas modeli ar sevlīdzīgo trafiku.

Darbā ir pierādīts, ka pieņemot lēmumu par plūsmas atļaušanu, ir jāievēro statistiskās multiplēksēšanas ietekmi uz izejas trafika parametriem. Autors parāda, ka statistiskā multiplēksēšana dod ievērojamu ieguvumu pārraides ātrumā sevlīdzīgajām datu plūsmām. Darbā ir sniegts tīkla veiktspējas paaugstināšanas algoritms (atļauto savienojumu skaits) saglabājot apkalpošanas kvalitātes parametru ( $P_{Loss}$ ).

Analizējot vienādas prioritātes klases plūsmu vadības problēmas, autors izstrādāja tādu plūsmu dispečerizācijas algoritmu.

Darba praktiskā vērtība: Darba rezultātā tika iegūta praktisko rekomendāciju virkne sistēmām MBAC, kas ievērojami palielina to efektivitāti. Rekomendācijas tika pārbaudītas ar imitāciju testu kopumu OPNET sistēmā. Imitācijas testēšanas dod iespēju daudz ātrāk pārbaudīt un realizēt piedāvātus algoritmus. Darba gaitā tika izstrādāts OPNET imitācijas paketes MBAC modulis, kuru var pietiekami vienkārši iebūvēt fiziskajā komutācijas sistēmā.

Aizstāvējamās tēzes:

1. Buferatmiņas apjoma un caurlaides joslas optimālo vērtību izvēles algoritms summāro izmaksu minimizēšanai pie uzdotajiem pakešu zudumuierobežojumiem.
2. Mērījumu loga un nolašu intervāla adaptīvās izvēles metode, kas samazina kļūdas trafika parametru novērtēšanas procesā un MBAC sistēmas nepareiza lēmuma pieņemšanu.
3. Iespēja veikt kanāla papildus blīvēšanu, samazinot grupveidīgas plūsmas intensitāti un saglabājot pakešu zudumu varbūtības prasības.
4. Vienādas prioritāšu klases plūsmu dispečerizācijas metode paaugstina plūsmu apkalpošanas kvalitāti.
5. Sistēmas resursu, tadu ka buferatmiņa un caurlaides josla, pārdales algoritms, kas samazina sistēmas izmaksas, vienlaicīgi apmierinot apkalpošanas kvalitātes prasības.

Pētījumu rezultātu aprobācija un ieviešana: Disertācijas pamattēzes tika paziņotas, apspriestas un tās ieguva pozitīvo vērtējumu vienpadsmit starptautiskajās konferencēs.

1. 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering SIBIRCON-2010, Irkutskā Listvjanka, Krievija, 2010. gada 11.-15. jūlija
2. 14<sup>th</sup> International Conference ELECTRONCS 2010// Kauņa, Lietuva, 2010. gada 18.-20. maijā
3. The 19<sup>th</sup> Annual Wireless and Optical Communication Conference// Šanhaja, Ķīna, 2010. gada 14.-15. maijā
4. The Fifth Advanced International Conference on Telecommunications AICT 2009// Venēcija/Mestre, Itālija, 2009.gada 24.-28. maijā
5. The 13<sup>th</sup> International Conference ELECTRONCS// Kaunas, Lietuva, May 13, 2009
6. IADIS International Conference Telecommunications, Networks and Systems 2008// Amsterdam, Nīderlandi, 2008. gada 22.-24. jūlija
7. World Congress on Science, Engineering and Technology// Parīze, Francija, 2008. gada 4.-6. jūlija
8. The 14<sup>th</sup> Conference on Information and Software Technologies IT 2008// Kauņa, Lietuva, 2009.gada 24.-25. aprīlī

9. The 12<sup>th</sup> International Conference ELECTRONCS// Kauņa, Lietuva, 2009. gada 21. maijā
10. RTU 48<sup>th</sup> International Science Conference// Rīga, Latvija, 2007. gada 11.-13. oktobrī
11. The 11<sup>th</sup> International Conference ELECTRONCS// Kauņa, Lietuva, 2009. gadā 13. maijā

Publikācijas: Pēc pētījumu rezultātiem tika nopublicēti septiņpadsmit iespieddarbi ar starptautisko citejamību.

1. Mihails Kulikovs, Ernests Petersons, Sergeys Sharkovsky. Integral measurement process of incoming traffic for measurement-based admission control// Proceedings of the 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering SIBIRCON-2010, pp. 183-186
2. M. Kulikovs, S. Sharkovsky, E. Petersons. Comparative Studies of Methods for Accurate Hurst Parameter Estimation// ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING No. 7(103), 2010
3. Mihails Kulikovs, Ernests Petersons, Sergeys Sharkovsky. Adaptive Traffic Measurement for MBAC System// Proceedings of 2010 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC 2010), pp. 354-358
4. M. Kulikovs and E. Petersons, Optimal Dispatching of the Flows Falling in the Same Priority Class// Automatic Control and Computer Sciences, 2010, Vol. 44, No. 1, pp. 42-46. © Allerton Press, Inc., 2010.
5. Куликовс, Э. Петерсонс, Оптимальная диспетчирзация потоков, принадлежащих одному классу // АВТОМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА. 2010. No.1. С.58-64.
6. Куликовс, Э. Петерсонс, Оптимальная диспетчирзация потоков, принадлежащих одному классу // АВТОМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА. 2010. No.1. С.58-64.
7. Alfreds Asars, Mihails Kulikovs, Ernests Petersons. Buffer Size and Output Bandwidth Optimization in a MBAC system// Automatic Control and Computer Sciences, Vol. 43, No. 5, pp. 241-246.
8. А. Асарс , М. Куликовс, Э. Петерсонс. Оптимизация объема буферной памяти и пропускной способности выходного канала в MBAC системе. // АВТОМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА. N5, 2009, pp.24-31

9. Mihails Kulikovs, Ernests Peterson. Real-Time Traffic Analyzer for Measurement-Based Admission Control// Proceeding of the 2009 Fifth Advanced International Conference on Telecommunications, 24-28 May 2009, Venice/Mestre, Italy, pp 72-75
10. Mihails Kulikovs. Statistical parameters estimation of the self-similar input traffic for the Measurement-based Admission Control// Scientific Proceedings of Riga Technical University in series "Telecommunications and Electronics". - Riga, 2008, pp 37. - 42.
11. M.Kulikovs, E.Petersons, Modeling the On-line Traffic Estimator in OPNET// ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING No. 7(95) 2009, pp. 82-86
12. М. Куликовс, Э. ПЕТЕРСОНС. Оценка параметров имитационной модели системы доступа в сеть самоподобных входных потоков.// АВТОМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА. N2, 2009, pp. 47 - 56
13. M. Kulikovs and E. Petersons Parameter Estimations in a Model Imitating a Network Admission System with Self-Similar Arrival Streams// Automatic Control and Computer Sciences, 2009, Vol. 43, No. 2, pp. 88-95. © Allerton Press, Inc., 2009.
14. Kulikovs M., Petersons E. Remarks Regarding Queuing Model and Packet Loss Probability for the Traffic with Self-Similar Characteristics// Proceeding of World Academy of Science, Engineering and Technology. Volume 30,PWASET, 2008, pp. 537- 543.
15. Kulikovs M., Petersons E. REMARKS ON PACKET LOSS PROBABILITY FOR THE NETWORK TRAFFIC WITH SELF-SIMILAR BEHAVIOUR// Proceedings of WIRELESS APPLICATIONS AND COMPUTING 2008 and TELECOMMUNICATIONS, NETWORKS AND SYSTEMS 2008. 3. IADIS Press, 2008, pp. 85-90.
16. Kulikovs M., Petersons E. Packet Loss Probability Dependence on Number of ON-OFF Traffic Sources in OPNET// ELECTRONCS AND ELECTRICAL ENGINEERING. 5. E2008, 2008, pp. 77-80 Kaunas
17. Kulikovs M., Petersons E. Estimation of buffer overflow probability by OPNET// Conference Proceedings. 14th Conference on Information and Software Technologies. - Kaunas, Lithuania: Tehnologija, 2008. pp. 145-149.

18. Asars A., Petersons E., Kulikovs M. Modeling of measurement based admission control algorithm, using OPNET// Scientific Proceedings of Riga Technical University in series "Telecommunications and Electronics". -Riga, 2007, pp 16-21

Rezultāti, kas tika iegūti disertācijas darba gaitā, tika izmantoti sekojošos projektos:

1. RTU ZP-2006/10: Telekomunikāciju sistēmu imitācijas modeļu izstrāde pētniecībai un izglītībai 1.06.2006 - 31.12.2006
2. RTU V1308: Intelektuālo transporta sistēmu bezvadu datu pārraides tīklu analīze un modelēšana 1.10.2007 - 15.009.2008
3. LZP Nr. 04.1260: Tīklu resursu iedalīšana servisa kvalitātes nodrošināšanai sevlīdzīgas darba slodzes vide 2004. - 2008.g
4. LZP Nr. 06.1963 Informācijas kompleksas apstrādes adaptīvo metožu un algoritmu izstrāde transporta līdzekļu vietas noteikšanas precizitātes paaugstināšanai
5. VPP, Nr. V7408.2 "Jaunas elektronisko sakaru tehnoloģijas": Reālo stendu izveidošana datoru tīklu trafika mērīšanai un optimālai regulēšanai sakaros ar mobiliem objektiem"
6. VPP, V7552.2: Datu glābšanas modeļa izstrāde. Dispečerizācijas algoritma izpēte un implementācija 01.01.2009 - 31.03.2009
7. VPP, V7552.2: Mērījumu modeļu ar statistiskiem un dinamiskiem parametriem izpēte. 01.01.2009 - 31.12.2009

Darba apjoms un struktūra: Disertācija sastāv no ievada, piecām sadaļām, nobeiguma, kas izklāstīti 201 lappusēs, ar 17 tabulām, 112 attēliem, 4 pielikumiem, kā arī ar izmantotās literatūras sarakstu no 175 nosaukumiem.

Ievadā tika pamatota veikto pētījumu aktualitāte un aprakstīts darba virziens.

Pirmajā nodaļā autors piedāvā trafika aprakstošo modeļu pētījumu; veikta zināmo sevlīdzīgā trafika generācijas modeļu analīze komunikāciju tīklu modelēšanas sistēmās. Pamatojoties uz šo analīzi, autors izstrādāja savas rekomendācijas par sevlīdzīgo trafiku imitāciju sistēmās.

Otrā nodaļa ir veltīta grupveida ieejas plūsmu rindas modeļu apskatam. Tika aprakstīts ērts skaitliskajiem aprēķiniem rindas modelis, kur intervāls starp paketēm pakļaujas Pareto sadalījuma likumam, pieprasījumu apstrāde pakļaujas eksponenciālajam sadalījuma likumam, sistēmā ir viens apkalpošanas mezgls un ierobežots buferatmiņas apjoms ( $P/M/1/K$ ). Šeit ir izklāstītas analītiskās izteiksmes rindu modeļiem ar grupveida pakešu padošanu un eksponenciālo apkalpošanu ar vienu mezglu ( $M^X/M/1/K$ ). Tiek minēti pētījumi, kas pierāda,

ka tāds modelis raksturīgajā telekomunikāciju tīkliem noslodzes diapazonā pēc skaitliskajiem rādītājiem ir līdzīga ar  $P/M/1/K$  modeli. Tiek piedāvāti arī šī modeļa paplašinājumi

IP protokola izstrāde neparedzēja kvalitātes garantiju Quality-of-Service (QoS) skaitlisko nodrošināšanu. Reāllaika programmu izplatība lēcienuveidīgi palielināja nepieciešamību nodrošināt QoS ierobežojumus. QoS prasību nodrošināšanai tika piedāvātas metodes, kuru īsais izklāsts ir sniegts trešajā nodaļā.

Pēdējā laikā plašo izplatību apkalpošanas statistisko kvalitātes garantiju nodrošināšanai ieguva risinājums MBAC, kurš ir sīki aprakstīts ceturtajā nodaļā. MBAC sistēmai nav nepieciešamas pieslēdzamā avota parametru apriorās zināšanas, kuros lielākoties ir sarežģīti vai neiespējami aprakstīt. Jau pieslēgto plūsmu parametru raksturojumus MBAC iegūst no mērījumiem. Pieņemot lēmumu par plūsmas atļaušanu, tiek izmantotas izmērītas plūsmu parametru vērtības kopā ar vienkāršāko ienākošās plūsmas aprakstu.

Piektajā nodaļā tiek sniegtas rekomendācijas, kas attiecas uz komutāciju sistēmām ar MBAC, kuras var iedalīt divās grupās. Pirmajā grupā ir rekomendācijas, kas attiecas uz telekomunikāciju sistēmu projektēšanas stadiju. Otrajā grupā ir rekomendācijas jautājumu risināšanai, kas veidojās sistēmas funkcionēšanas procesā. Nodaļā ir parādīta buferatmiņas telpas apjoma un izejas kanāla caurlaides spējas optimālā izvēle pie minimālām izmaksām un uzdoto apkalpošanas kvalitātes parametru ievērošanu sistēmas projektēšanas stadijā.

Otrajā jautājumu grupā ir piedāvāta trafika mērījumu metode ar adaptīvo izvilkuma frekvenci un mērījumu loga izmēru, kas nodrošina visprecīzākos mērījumus dažāda veida trafikam, ieskaitot arī grupveidīgo. Aprakstīta plūsmu pieļaujamā skaita aprēķina metode pie uzdotām QoS prasībām un izejas kanāla noslodzes maksimizēšanas statistiskās multiplexēšanas režīmā.

Aprakstīts izstrādātais algoritms resursu dinamiskajai pārdalei, kurā bez veiktspējas metriku izmanto arī izmaksu metriku. Šajā pašā nodaļā ir aprakstīts algoritms, kas realizē vienādas apkalpošanas prioritātes līmeņa plūsmu optimālās dispečerizācijas funkciju.

Visiem augstāk minētie piedāvājumiem ir analītiskie un skaitliskie pamatojumi, kurus var atrast attiecīgajās sadaļās. Kompleksa risinājuma pārbaudei, kas ievēro augstāk pārskaitītus uzlabojumus, tika izmantots programmu imitācijas komplekss – OPNET. Sestā nodaļa ir veltīta MBAC realizācijai OPNET vidē. Blokskāme, datu plūsmu struktūras analīze, pārbaudē izmantojamo rezultātu apraksts un modelēšanas rezultāti ir aprakstīti šajā nodaļā.

Rezultātu analīze, pārdomas, turpmākie plāni ir pieejami pēdējā nodaļā.

Pielikumā ir sniegti tabulas datu aprēķina piemēri nepieciešamajam buferatmiņas apjomam, galvenajiem grupveida trafika rindas modeļa parametriem, rezultāti, kas iegūti ar dažādam plūsmu vadības metodēm, kā arī galvenās definīcijas, kas tika izmantotas šajā darbā.

# Nodaļu paplašinātais izklāsts

## Ievads

Pēdējos gados Interneta lietotājiem sniedzamo pakalpoju raksturs lēcienvēidīgi izmainījies. Multimēdijas pakalpojumi sāk prevalēt pāri tradicionālajiem tīrā teksta (Web, mail) un datu (ftp) pakalpojumiem. Līdz ar to, var runāt par Interneta evolūciju. Īpaši evolucionēja divas lietas:

- Trafiks – tā parametri izmainījās
- Pakalpojumi – multimēdijas programmas sāka pieprasīt apkalpošanas kvalitātes garantijas

Attīstoties trafikam, plūsmas ar „uzliesmojumiem” sāka prevalēt attiecībā uz tradicionālām Puasona plūsmām [31, 3]. Tāda tipa trafikā paketes pienākšanas laiks pakļaujas sadalījumam ar garo asti, piemēram Pareto. Analīze parāda, ka tādu trafiku var raksturot ar sevlīdzīguma parametru. Tas izpaužas statistisko parametru saglabāšanā dažādās laika asīs. Autors apskatīja iespēju mākslīgi veidot un analizēt komunikāciju tīklu imitācijas sistēmās trafiku ar sevlīdzīgu raksturu.

Trafiks ar sevlīdzīguma īpašību dramatiski ietekmē tīkla veiktspēju. Tā palielina aiztures un pakešu zudumu varbūtību [62, 21, 45]. Sevlīdzīgā trafika negatīvo ietekmi uz tīkla veiktspēju var ievērojami samazināt, ja samazināt pārslodzes komunikāciju sistēmas elementos.

Viens no variantiem, kā to var izdarīt, ir ievērot trafika raksturojumus projektēšanas stadijā, kurā tiek izvēlēti tīkla struktūras vienības, tādas kā buferatmiņas apjoms un kanāla caurlaides josla. [70, 5, 56, 71, 57, 20, 19, 4]. Parasti, tīkla struktūras elementu parametru optimālās vērtības tiek izvēlētas, pielietojot rindu modeli. Sakarā ar trafika sevlīdzīgo raksturu, tradicionāli rindu modeļi neder.

Tāpēc autors veica rindu modeļu izpēti, kuri ievērotu mūsdienu trafika īpašības. Šīs izpētes laikā autors noteica rindu modeli, kas ir ērts skaitliskajiem aprēķiniem. Šajā modelī pakešu pienākšanas process pakļaujas Pareto sadalījuma likumam, apkalpošanas apstrāde tiek sadalīta pēc eksponenciālā likuma; modelī ir viens apkalpošanas mezgls un ierobežotais buferatmiņas apjoms  $K - P/M/1/K$ .

Autors atrada vēl vienu modeli ar *analītiskām* izteiksmēm grupveida pakešu rindas parametriem, eksponenciālo apkalpošanu ar vienu mezglu ( $M^X/M/1/K$ ), kurš raksturīgajā telekomunikāciju sistēmām noslodzes diapazonā pēc skaitliskajiem raksturojumiem ir līdzīgs modelim  $P/M/1/K$ . Turpmāk modelis tika attīstīts un papildināts ar analītiskām izteiksmēm vidējam rindas garumam ( $\bar{K}$ ) un vidējo paketes gaidīšanas laiku ( $\bar{W}$ ), pieņemot, ka buferatmiņa ir ierobežota.

Pamatojoties uz izmantotām analītiskām izteiksmēm sistēmām ar grupveida plūsmu nonākšanu, autors sniedz rekomendācijas sistēmas struktūras elementu aprēķinam, tādiem kā atmiņa un caurlaides spēja pie uzdotām  $P_{Loss}$  un minimālām atmiņas, kanāla caurlaides spējas izmaksām. Šīs rekomendācijas ir lietderīgas, izvēloties komutācijas sistēmas elementus projektēšanas stadijā.

Cits veids, kā var samazināt struktūras elementu un visas sistēmas pārslodzi, ir izmantot algoritmus, kas vada plūsmas. Vadības algoritms ir paredzēts QoS garantijas tīkla klientiem.

Liela daļa no šī darba ir veltīta rekomendācijām par vadības algoritmu izstrādi. Izstrādājot vadības algoritmus, eksistē dažas problēmas:

- Funkcionālās
- Strukturālās
- Tehnologiskās

Funkcionālās problēmas attiecas uz vadības lēmuma pieņemšanas metožu izstrādi. Šeit, ar vadību saprot lēmuma pieņemšanas procesu, kas attiecas uz nepieciešamām QoS garantijām.

Šajā darbā tiek pieņemts ka QoS prasības ir jāapmierina End-to-End (e2e) režīmā. Šis režīms iekļauj sevī pieprasīta QoS izpildi visā paketes ceļā – no datu avota līdz gala punktam.

Šajā gadījumā, lai uzstādītās QoS prasības būtu garantētas, ir svarīgi lai jaunizveidotās plūsmas neveicinātu QoS garantiju pārtraukšanu jau eksistējošām. Līdz ar to, Connection Admission Control (CAC) ir jābūt galvenajai vadības algoritma mērķa funkcijai [54, 66]. Tādā veida jaunais savienojums var būt uzturēts, ja tīklam ir brīvi pieprasāmie resursi, kvalitātes nodrošināšanas prasības eksistējošiem savienojumiem ir apmierinātas un jaunais savienojums tās nepārkāps.

Reāllaika pielietojumos, tādos kā interaktīvais video, nav iespējams iepriekš novērtēt resursus, kas varētu būt nepieciešami. Šī iemesla dēļ nepieciešamie resursi tiek pieprasīti ar rezervi, lai būtu pārliecība par QoS izpildi. Tāda rīcība noveda pie CAC nesekmības, kur plūsmu prasības tiek izmantotas noslodzes novērtēšanai, piemēram, caurlaides spējas prasības. Tādas CAC sauc par Parametric-based Admission Control (PBAC), par cik tās izmanto uzdotos trafika parametrus piekļuves vadībai. PBAC var viegli realizēt. Bet tāds risinājums nodrošina zemo tīkla utilizāciju pārmērīgu prasību dēļ.

Dotajā darbā tiek piedāvāts izmantot CAC, kas saņem informāciju par tīkla noslodzi tieši no eksistējošo plūsmu veiktajiem mērījumiem. Tādu pieeju sauc par MBAC un nesēn tā palika populāra QoS garantiju nodrošināšanā [32]. Šajā darbā tiek piedāvātas jaunās struktūras un funkcionālās shēmas.

Gan eksistējošo plūsmu, gan jaunās ienākošas plūsmas parametru mērījumu veikšanas un novērtēšanas modulis ir viens no MBAC struktūras elementiem. Zemāk ir aprakstītas galvenās problēmas, ar kurām sastapās autors, izstrādājot tādu moduli. Risinājumu paņēmieni ir aprakstīti arī zemāk.

Pirmā problēma, kas rodas projektējot vadības algoritmus – funkcionālā problēma, un gadījumā ar MBAC tā ir saistīta ar mērījumu veikšanu. Datu mērījumi un apstrāde sistēmas noslodzes noteikšana ir sarežģīts uzdevums, jo trafikam ir grupveida raksturs [17, 15, 40, 26].

Meklējot risinājumu, autors piedāvā izmantot adaptīvo pieeju, kur novērtējuma intervāls un mērījumu frekvence ir atkarīgi no trafika rakstura, kas ļauj ne tikai samazināt trafika mērījumu kļūdas, bet arī samazināt vadības sistēmas noslodzi, kas saistīta ar mērījumu procesu.

Otrā vadības algoritmu izstrādes problēma ir strukturālā problēma, kas veidojās ierobežotā tīkla resursa maksimālās noslodzes dēļ. Darbā autors iepazīstina ar pētījumiem un rekomendācijām attiecībā uz sistēmas noslodzes maksimizēšanu pie ierobežotajiem sistēmas resursiem un QoS garantiju izpildes.

Vislabākā ierobežoto resursu izmantošana var būt panākta ar optimālās dispečerizācijas algoritmu, kuru piedāvā autors. Piedāvājams un aprakstītais algoritms atrisina dispečerizācijas problēmu sistēmā ar ierobežotiem resursiem, ja plūsmām ir vienādas prioritātes klases.

Trešā vadības algoritmu izstrādes problēma ir tehnoloģiskā. Tās risinājums ietekmē vadības sistēmas cenu. Ir zināms, ka plūsmu parametri ir atkarīgi no izejas kanāla caurlaides spējas un no komunikāciju mezgla buferatmiņas apjoma [64, 36]. Kā tika pieminēts augstāk, autors piedāvā rekomendācijas sistēmas struktūras elementu vērtību optimālajam aprēķinam projektēšanas stadijā. Tās pašas tehnikas var izmantot, risinot resursu optimālās pārdales uzdevumu jau sistēmas funkcionēšanas procesā.

Autors uzskata par nepieciešamo norādīt, ka visām augstāk minētās rekomendācijām ir analītiskais pamatojums. Izstrādāto rekomendāciju pārbaudei autors realizēja MBAC modeli imitācijas kompleksā OPNET. Modelēšanas rezultāti parāda, ka ieviešot tikai daļu no autora izstrādātām rezultātiem, var saņemt ievērojamu komutācijas sistēmas darbības uzlabošanās.

## 1. nodaļa Trafika raksturojumi

Piekļuves vadības modeļa izstrāde nav iedomājama bez vadāmā trafika rakstura izpratnes, tāpēc pirmā nodaļa ir veltīta eksistējošo trafika modeļu apskatīšanai. Īpaša vieta tiek

veltīta mākslīgo datu plūsmu generēšanas modeļu apskatam, kas tiks izmantots modelēšanā.

Modelis līnija/avots ir pieeja resursu vadībai. Bez tehnoloģijas attīstības, ievērojami izmainījās arī trafika raksturojumi. [53, 18, 22] ir parādīts, ka pakešu komutācijas tīklos, trafika modeļus tagad vislabāk apraksta sadalījuma likumi ar garām astēm. Pirmie piedāvātie līnija/avots modeļi [29, 11, 44, 25, 13] tika aizvietoti ar piemērotiem multi-fraktālu modeļiem [42, 58, 59].

Acīmredzami, ka tīkla trafika modeļus ir jāizstrādā vienlaikus ar analīzes tehnikām un tīkla trafika evolūciju. Avota modelis nesniedz drošus līdzekļus nepieciešamu resursu novērtēšanai trafikam ar sarežģītām un mazāk izsekotajām īpašībām. Līnija/avots modeļa vietā ir nepieciešams cits, kas ievērotu mijiedarbību ar tīklu un būtu piemērots mainīgā trafika raksturošanai. Tāds tīkla modelis tika piedāvāts [69, 6, 14, 55, 27, 48, 43]. Detalizēti Web-pārlūkošanas, failu pārsūtīšanas, VoIP un Video konferenču trafika apraksti ir pieejami šajā darbā.

Sekojoša sadaļas daļa tiek veltīta mūsdienu sevlīdzīgā trafika parametru aprakstam, generēšanas veidiem un tā analīzei.

Galvenais sevlīdzīgo procesu raksturojošais parametrs ir Hersta parametrs – tas parāda sevlīdzīguma pakāpi. Vērtībai  $H = 0.5$  atbilst sevlīdzīguma trūkums, bet augstām  $H$  vērtībām (tuvām pie 1) atbilst augstā sevlīdzīguma pakāpe.

Stacionārais process  $X$  ar galīgo vidējo vērtību  $\eta = \mathbf{E}X_i < \infty$  un dispersiju  $\sigma^2 = \mathbf{Var}X_i < \infty$  tiek dēvēts par otrās pakāpes sevlīdzīgo procesu ar parametru  $0 < \beta < 1$ , ja autokorelācijas funkcija  $R(k)$  tiek pierakstīta sekojošā veidā:

$$R(k) = \frac{1}{2} \left( (k+1)^{2-\beta} - 2k^{2-\beta} + (k-1)^{2-\beta} \right) \quad (1)$$

Parametrs  $\beta$  un Hersta parametrs  $H$  ir saistīti savā starpā:  $H = 1 - \beta/2, \frac{1}{2} < H < 1$ . Sevlīdzīgā procesa autokorelācijas funkcija  $R(k)$  ir parādīta 1. att.

Kā tika parādīts [1, 2, 37, 47, 49, 50, 51], sevlīdzībai ir negatīva ietekme uz tīkla veiktspēju. Bet konkrēti – trafika uzliesmojumu dēļ vairākās laika skalās, veidojas paketes aiztures, pieaug to zuduma varbūtība [35, 67, 28, 34].

Šajā pētījumā sevlīdzīga trafika imitēšanas pamatā ir ON/OFF modelis, kuru sākotnēji piedāvāja Mandelbrots [41]. ON/OFF modelis tika izvēlēts mūsu simulācijām, jo literatūrā tika parādīts, ka sevlīdzīgo tīkla trafiku var generēt ar vairāku Pareto-sadalīto avotu ON- un OFF-periodu multiplēksēšanu [52]. Katrs avots sūta uzliesmojumus ar gadījuma rakstura ilgumu, kas sadalīts pēc Pareto likuma. Katra atsevišķā avota generētais trafiks ir neatkarīgs un identiski sadalīts.

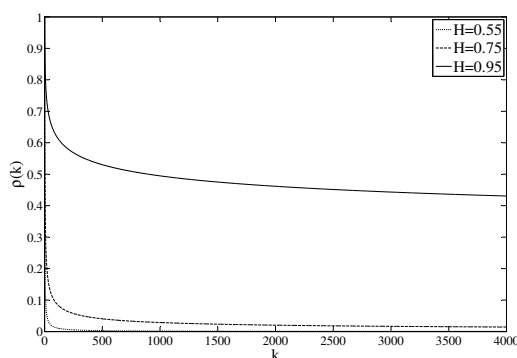
Otrais modelis – vienkāršotais – ON/OFF modelis, kur katra pakešu grupa satur tieši vienu paketi, un laika intervāli starp paketes pienākšanas brīžiem tiek aprakstīti ar Pareto sadalījuma likumu. T.i., runa iet par fraktāla rekonstruēšanas procesu ar pareto sadalīto pakešu pienākšanas laiku.

Autors veica generēto plūsmu izpēti, kas parādīja, ka trafiks, kurā laika starpība starp pakēšu pienākšanas brīžiem pakļaujas Pareto sadalījuma likumam, nav ergodisks. Ģenerētas plūsmas, kurās paketes pienāk atbilstoši ON/OFF modelim, arī nav ergodiskas. Veiktie pētījumi deva autoram iespēju izvēlēties pareizo korelācijas intervāla novērtējumu:

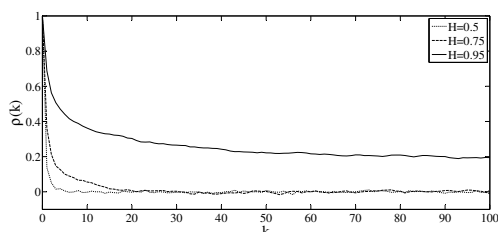
$$\tau_k = \frac{1}{2} \frac{S(0)}{R(0)}, \quad (2)$$

kur  $R(0)$  ir autokorelācijas funkcija pie nulles nobīdes, bet  $S(0)$  - spektrālais blīvums uz nulles frekvences.

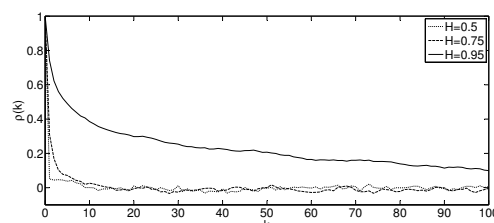
Autokorelācijas funkcijas novērtējumi norāda, ka generēto plūsmu uzvedība atbilst teorētiskajiem rezultātiem (2.a.att. un 2.b.att.).



1. att.: Sevlīdzīgo procesu autokorelācijas funkcijas, pie dažādām parametra  $H$  vērtībām



(a) Centrētā fraktālā rekonstrukcijas procesa īsā autokorelācijas funkcija



(b) Centrētā ON/OFF procesa īsā autokorelācijas funkcija

2. att.: Īsās autokorelācijas funkcijas

## 2. nodaļa Buferatmiņas apjoma novērtējums

Viens no svarīgajiem tīkla mezglu struktūras elementiem ir buferatmiņa, kurā var uzglābāt ienākošo plūsmu paketes. Buferatmiņas apjomu ir jānosaka, ievērojot ienākošo plūsmu pakešu zudumu varbūtības robežas gadījumā, kad caurlaides spēja nav pietiekama.

Sākot ar Norosa darbu [47] un turpinot to [23, 65, 62, 21, 45], tiek apgalvots, ka komutatoru un multipleksoru buferatmiņai ir jābūt lielākai, nekā to paredz tradicionālā rindu analīze.

Sakarā ar trafika sevlīdzīgo raksturu, tradicionālie rindu modeļiem neder, jo analītiskā risinājuma iegūšanai tie tika veidoti, pārsvarā, uz pieņēmuma ka ieejas plūsmi ir Puasona raksturs ( $M/M/1/K$ ), vai arī ka resursi nav ierobežoti (konkrēti, buferatmiņa -  $P/M/1$ ). Analītisko izteiksmju iztrūkumu modeļiem ar sevlīdzīgo trafika raksturu nosaka Laplasa transformācija iztrūkums sadalījumiem ar garām astēm. Sadaļā ir aprakstīti  $M^X/M/1/K$  un  $P/M/1/K$  rindu modeļi, kas ir piemēroti mūsdienu pakešu komutācijas tīkliem.

Pirmkārt, tiek aprakstīts rindu modelis  $P/M/1/K$ . Modelis, pēc savas būtības, ir skaitliskais algoritms nepieciešamās rindas garuma aprēķinam, ja ir zināmi ienākošā trafika parametri, pieprasījumu intensitāte un pieprasītais garantētais zudumu līmenis. Šajā pētījumā Pareto sadalījuma Laplasa transformācijas atvasinājuma analītiskā izteiksme PDF tiek izmantota atbilstoši [60]. Vēlāk to izmanto ar mērķi aprēķināt asimptotisko pakešu zudumu varbūtību, kuru var izteikt sekojoši:

$$P_{Loss} = \left(1 - \frac{\alpha(\alpha - 1)}{\rho} M^{\frac{\alpha}{2}-1} e^{\frac{M}{2}}\right) \left[\sqrt{M} W_{-\frac{\alpha+1}{2}, -\frac{\alpha}{2}}(M) - W_{-\frac{\alpha}{2}, \frac{1-\alpha}{2}}(M)\right] \sigma^K \quad (3)$$

kur  $M = \frac{(\alpha-1)(1-\sigma)}{\rho}$  un  $W_{\eta, \xi}(\phi)$  - Vitakera funkcija.

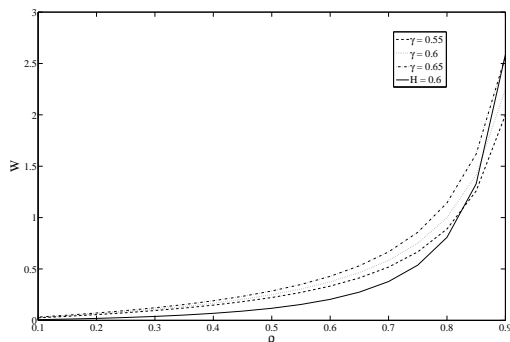
Autors novērtēja izteiksmi un atrada sakarības, kas parādītas 4.a att. 4.a att. ir parādītas sakarības starp noslodzi, buferatmiņas apjomu un pakešu zudumu varbūtību pie dažādiem Hersta parametriem, novērtējot rindas sistēmu atbilstoši [60].

Pastāv izplatītais viedoklis, ka buferatmiņas apjoma lineārais pieaugums dos gandrīz eksponenciālo pakešu zudumu varbūtības samazinājumu, un rezultātā proporcionāli palielināsies pārraides kapacitātes efektivitāte. Kā var redzēt no 4.a att., sevlīdzīgajam trafikam šie pieņēmumi nav spēkā.

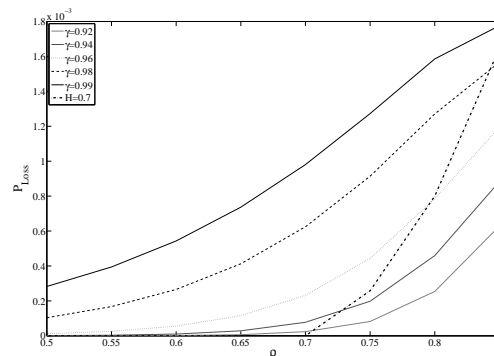
Šī modeļa trūkums ir tāds, ka tam nav izteiksmes tāda parametra aprēķinam, kā vidējais paketes gaidīšanas laiks rindā. Bet galvenais, ka šai izteiksmei ir jāveic iteratīvi skaitliskie aprēķini, kas pieprasa papildus skaitļošanas laiku.

Rindas modelis ar uzliesmojumu rakstura ienākošajiem pieprasījumiem dod iespēju atrisināt šo problēmu. Tajā ir sekojošais pieņēmums: tai ir Puasona ienākošo plūsmu grupa, pakešu grupas garums ir sadalīts pēc geometriskā likuma ar geometrisko sadalījuma koeficientu  $\gamma$ , kas raksturo pakešu skaitu vienā uzliesmojumā, eksponenciālo apkalpošanas laika sadalījumu un vienu serveri. Bez tam,  $M^X/M/1/K$  modelī tiek uzskatīts, ka tam ir līdzīgie raksturojumi salīdzinājumā ar iepriekš aprakstīto modeli. Atšķirība starp modeļiem  $M^X/M/1/K$  un  $P/M/1/K$  ir neliela, un tā izpaužas plašajā sistēmas noslodzes koeficientu  $\rho$  diapazonā, kā to var redzēt 3.a att. un 3.b att.

Šis fakts dod iespēju izmantot zemāk dotās  $M^X/M/1/K$  modeļa analītiskās izteiksmes

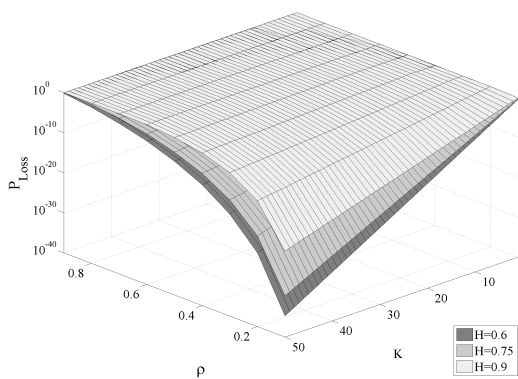


(a) Vidējais laiks, kuru pakete gaida sistēmā ar  $M^X/M/1$  un  $P/M/1$  rindu modeļiem

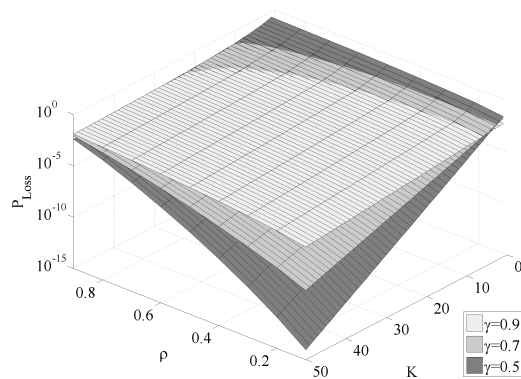


(b) Pakešu zudumu varbūtība rindu modeļiem  $M^X/M/1$  un  $P/M/1$

### 3. att.: Rindu modeļu $P/M/1/K$ un $M^X/M/1/K$ parametru salīdzināšana



(a) Sakarības starp noslodzi, buferatmiņas apjomu un pakešu zudumu varbūtību pie dažādiem Hersta parametriem, novērtējot rindas sistēmu atbilstoši [60].



(b) Pakešu zudumu varbūtība  $M^X/M/1/K$  rindu modelim.

### 4. att.: Pakešu zudumu varbūtība $P/M/1/K$ un $M^X/M/1/K$ rindu modeļiem.

turpmākajās nodaļās, kur tiek apskatīti optimizācijas uzdevumi.

Pēc [9], pakešu zudumu varbūtība  $M^X/M/1/K$  modelī var būt novērtēta šādi:

$$P_{Loss} = \frac{(1 - \rho)(\gamma + (1 - \gamma)\rho)^{K-1}((1 - \gamma)\rho)}{1 - \rho(\gamma + (1 - \gamma)\rho)^K} \quad (4)$$

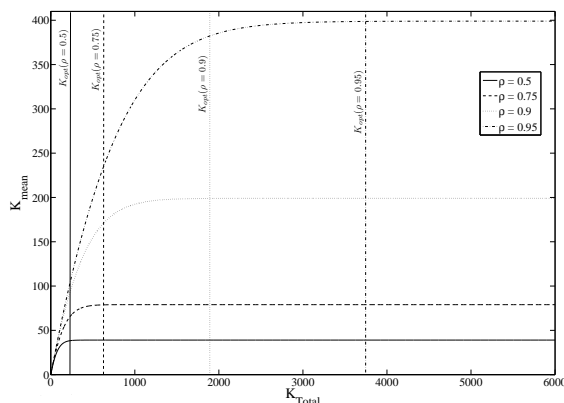
4.b att. ir parādīta pakešu zudumu varbūtība  $M^X/M/1/K$  rindu modelim.

Vidējais pakešu skaits  $M^X/M/1/K$  sistēmā var būt novērtēts, ja papildināt iepriekšējos rezultātus [9] un pierakstīt sekojošā veidā:

$$\bar{K} = \frac{K + 1}{(\rho + \gamma - \rho\gamma)^{K+1} - 1} - \frac{K(1 - \rho - \gamma + \rho\gamma) + 1}{(1 - \rho)(\gamma - 1)} \quad (5)$$

5. att. ir parādīti grafiki sakarībām starp vidējo rindas garumu, sistēmas noslodzi, ne-

vienmērīgumu un buferatmiņas apjomu. Var viegli redzēt, ka pastāv noteiktais buferatmiņas apjoms ( $K_{opt}$ ), kas ir pietiekams vidējā rindas garuma nodrošināšanai. Tas nozīmē, ka aprēķinot komunikāciju sistēmas resursu parametrus, nav jēgas aprīkot sistēmu ar buferatmiņu, kas lielāka par  $K_{opt}$ . Līdzīgo pieeju var pielietot resursu sadalīšanai dinamiskajā režīmā.



5. att.: Vidējais darbību skaits sistēmā ar  $M^X/M/1/K$  rindas modeli pie  $\gamma = 0.95$

Kā tika norādīts ievadā un apliecināts šajā nodaļā, trafika īpatnību ievērošana projektēšanas stadijā, kad tiek izvēlēti tīkla struktūras elementu lielumi, tādi ka buferatmiņas apjoms, ļauj samazināt sistēmas pārslodzes. Nākamajā nodaļā ir izklāstīts mehānisms, kuru var izmantot tīkla veiktspējas palielināšanai.

### 3. nodaļa Apkalpošanas kvalitāte tīklos ar integrētajiem servisiem

QoS mērķis pakalpojumu pieejamības un caurlaides spējas uzlabošana pie minimālām aizturēm, kā arī bez aizkaves fluktuācijām un zudumiem [63, 39]. Šajā nodaļā tiek izklāstīts QoS izstrādes shēmu pārskats. Tiek aprakstīti IntServ, DifServ un IntServ pāri DiffServ. Shēmu apskatīšana ir vajadzīga autora izstrādāto risinājumu izmantošanas nepieciešamības pierādīšanai.

Apkalpošanas kvalitātes garantiju nodrošināšanas procesā ir svarīgi, lai jaunā plūsma nepārtrauktu garantiju izpildes jau eksistējošām tīkla plūsmām. Šī iemesla dēļ, nepieciešams mehānisms, kas izpildīs CAC [54, 66].

Tāda funkcija ir realizēta shēmā IntServ, kas ir orientēta uz ilgi eksistējošām individuālām vai multiraides plūsmām. Autors piedāvā jaunu konkurējošo plūsmu skaita regulēšanas metodi. Piedāvājamās metodes atšķirība ir mūsdienu trafika sevlīdzīguma īpašību ievērošana un esošo resursu optimālā izmantošana.

Par cik IntServ realizācija ir pietiekami sarežģīts uzdevums, izstrādātāji no Internet engi-

neering Task force (IETF) piedāvāja DiffServ modeli. Šajā modeli pakalpojumi ar vienādām prasībām tiek kombinētas vienā kopējā plūsmā. Tā saņem nepieciešamo pakalpojuma līmeni attiecībā uz pārējām plūsmām. Pakešu sastrēguma gadījumā ir jāatbrīvojas no paketēm ar zemo prioritāti augstākās prioritātes pakešu labumā. Lai realizētu šo shēmu, IETF piedāvāja DiffServ arhitektūru [46, 10].

Piedāvātajā shēmā nav aprakstīti mehānismi, kas ļautu regulēt konkurējošo plūsmu skaitu, kas pieder pie vienādas prioritātes klases, kas var veicināt apkalpošanas kvalitātes garantiju pārtraukšanu. Darbā autors risina uzdevumu par vienādas prioritātes plūsmu dispečerizāciju.

Tika piedāvāta hibrīda arhitektūra, kas ļautu izvairīties no IntServ un DiffServ trūkumiem [8]. Šī arhitektūra, IntServ pāri DiffServ, piedāvā mērogojamas vadības kontroles metodes IP tīklos. IntServ pāri DiffServ shēmā, IntServ tiek pielietots starp tīkliem, bet DiffServ tiek pielietots kā tīkla mugurkauls. Autors piedāvāja risinājumus, kas var būt pielietoti arī IntServ pāri DiffServ shēmā.

Šajā darbā tiks izmantots QoS garantiju modelis. Šis režīms paredz nepieciešamo QoS prasību izpildi visā ceļā no datu avota līdz gala punktam. Šajā gadījumā ir svarīgi pārliecināties par to, ka jaunā datu plūsma nepārtrauks QoS garantijas jau eksistējošām. Šīm mērķim jāizmanto CAC funkciju. Nākamajā nodaļā tiek aprakstīts vadības lēmuma pieņemšanas process, kura pamatā ir tīkla noslodzes mērījumi, un tam nav nepieciešams *a priori* plūsmu apraksts. Tāda piekļuves vadības kontrole tiek dēvēta par MBAC.

#### 4. nodaļa Piekļuves kontrole uz mērījumu pamata

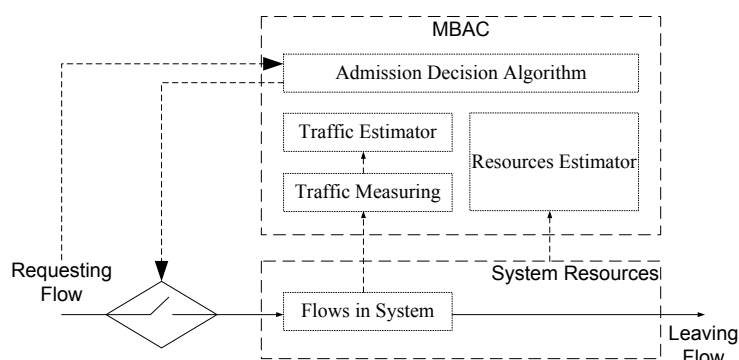
Pēdējos gados MBAC [33, 32, 30, 24] tiek arvien plašāk pielietots statistisko apkalpošanas garantiju nodrošināšanai.

Šajā gadījumā QoS parametru garantija tiek veikta pamatojoties uz mērāmo trafika parametriem *kombinācijas* (saņemto pieprasījumu intensitāte, dispersija u.t.t.), kā arī lietotāja parametriem [12].

Kā var redzēt no 6. att., MBAC mehānisms sastāv no vairākām daļām. Visaugstākais MBAC mehānisma procesu detalizācijas līmenis var būt aprakstīts ar sekojošajiem procesiem:

- ienākošās plūsmas trafika mērījumi,
- parametru novērtēšana,
- vadības lēmuma algoritms - politika.

Katra moduļa apraksts ir sniegts atbilstošajā sadaļā. Galvenais nodaļas ieguldījums ir dažādu MBAC algoritmu pārskats, ievērojot fundamentālos sākuma nosacījumus kas ir to



6. att.: Measurement-Based Admission Control modelis.

pamatā. Esošo MBAC velīto darbu apskats parādīja, ka rekomendāciju mūsdienu trafika mērījumiem nav. Tādu trafiku raksturo augstā grupveidīguma pakāpe, kas ir kritiski tā parametru turpmākajai novērtēšanai un lēmuma pieņemšanai. Autors risina darbā jautājumu par mērījumu funkcijas parametru izvēli, tādu ka mērījumu loga izmērs un izvilkuma intervāls, ar mērķi samazināt trafika parametru novērtēšanas kļūdas.

Nākamajā sadaļā tiek apskatīts MBAC parametri un piedāvātas rekomendācijas efektivitātes uzlabošanai.

## 5. nodaļa MBAC sistēmas parametru novērtēšana

Kā tika atzīmēts ievadā, MBAC sistēmas efektivitātes palielināšanai, autors piedāvā izmantot sekojošus uzlabojumus, kas formulēti algoritmu un rekomendāciju veidā:

- rekomendācijas kā izvēlēties un pārdalīt sistēmas resursus, tādus ka buferatmiņas apjoms un izejas kanāla caurlaides spēja;
- jaunās adaptīvas mērījumu pieejas izmantošanas rekomendācijas;
- piekļuves vadības algoritms, kas nodrošina augsto komunikāciju sistēmas noslodzi un garantē tādu apkalpošanas kvalitātes parametru, kā pakešu zudumu varbūtība;
- vienādas prioritātes klases plūsmu optimālās dispečerizācijas algoritms.

Tekošajā nodaļā ir izklāstīti piedāvājamie risinājumi, kas saistīti ar MBAC sistēmas efektivitātes palielināšanu.

MBAC sistēmas buferatmiņas apjoma un caurlaides spējas optimizācija: Apskatīsim datu plūsmu komutācijas sistēmu uz koncentratora (komutators) piemēra, kuram ir  $i$  ieejas kanāli un viens izejas kanāls. Apzīmēsim ar  $\lambda_i$  ienākošās plūsmas pakešu intensitāti  $i$ -jā koncentratora ieejā ( $i = 1, \bar{M}$ ).

Koncentratoram ir buferatmiņa ar apjomu  $K^*$  un maksimālā caurlaides spēja  $\mu^*$ , pie tam, resursu daļa  $K_0$  un  $\mu_0$  ir jau aizņemta. Tātad, pieņemot lēmumu par nepieciešamā resursa izdalīšanu ieejas plūsmai tiek novērtēti  $K^* - K_0 = K$  un  $\mu^* - \mu_0 = \mu$ .

Ieejas plūsmai var izdalīt optimālās buferatmiņas un caurlaides spējas vērtības  $K_{opt}$  un  $\mu_{opt}$ , pie kurām pakešu zudumu varbūtība  $P_{Loss}$  nepārsniedz uzdoto līmeni. Tādu optimālo vērtību noteikšanai minimizēsim izmaksu funkcionālu:

$$C = c_1\mu + c_2K, \quad (6)$$

kur  $c_1$  - caurlaides spējas vienības izmaksas, bet  $c_2$  - buferatmiņas apjoma vienības izmaksas.

Optimālo vērtību  $\mu_{opt}$  un  $K_{opt}$  noteikšanai izveidosim Lagranžianu:

$$L = c_1(\mu_0 + \mu) + c_2(K_0 + K) + \delta[(1 - P_{Loss}) - (1 - \epsilon)] + \lambda(\mu_0 + \mu - \mu^*) + \beta(K_0 + K - K^*), \quad (7)$$

kur  $\delta$ ,  $\lambda$  un  $\beta$ - nenoteiktie Lagranža reizinātāji, bet  $\epsilon$  - augšējā pieļaujamā zudumu varbūtības robeža.

Atradīsim Lagranžiana atvasinājumu pēc vairākiem mainīgajiem, pielīdzināsim tos nullei un atrisināsim vienādojumu sistēmu:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \mu} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial K} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Uzdevuma risināšanai izmantosim iepriekš izpētītu 2. nodaļa nodaļā modeli  $M^X/M/1/K$ , kuram eksistē pakešu zudumu varbūtības analītiskā izteiksme (11). Risinājuma vienkāršošanai no sākuma noņemsim ierobežojumus uz resursiem. Tādā gadījumā sistēmas parametra optimizāciju var veikt, diferencējot un pielīdzinot nullei Lagranžianu (9). No risinājuma izriet caurlaides spējas  $\mu$  un buferatmiņas apjoma  $K$  optimālo vērtību nosacījums - (10)

$$L = c_1\mu + c_2K - \delta[(1 - P_{Loss}) - (1 - P_{Loss}^*)], \quad (9)$$

kur  $\delta$  - nenoteiktais Lagranža reizinātājs, bet  $(1 - P_{Loss}^*)$ - uzdotais ierobežojums pakešu pārraidei bez zudumiem.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mu} \frac{1}{c_1} = \frac{\partial \Phi}{\partial K} \frac{1}{c_2} = -\frac{1}{\delta}. \quad (10)$$

kur pakešu zudumu varbūtība:

$$P_{Loss} = \Phi(\lambda, \mu, K). \quad (11)$$

No (10) izriet caurlaides spējas un buferatmiņas apjoma optimālās sadalīšanas likums: "zudumu varbūtības  $P_{Loss}$  samazināšanas attiecībām uz izmaksu vienībām ir jābūt vienādām abiem resursiem, t.i. caurlaides spējai un buferatmiņas apjomam".

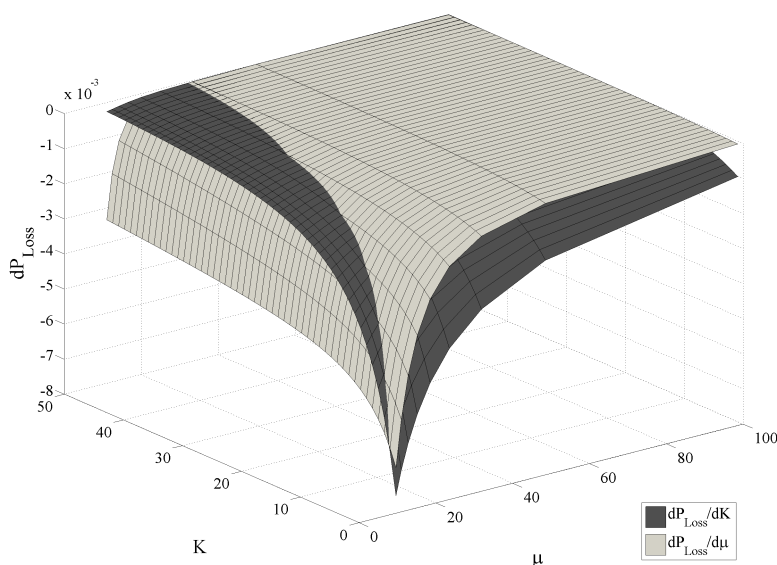
Atradīsim pakešu zudumu varbūtības atvasinājumus  $P_{Loss} = \Phi(\lambda, \mu, K)$  pēc  $\mu$  un  $K$ .

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mu} = \frac{\lambda(\gamma - 1) \left( \frac{\lambda + \mu\alpha - \gamma\lambda}{\mu} \right)^K}{\left[ \mu - \lambda \left( \frac{\lambda + \mu\alpha - \gamma\lambda}{\mu} \right)^K \right]^2} \times \frac{\left[ \lambda^2 \left( \frac{\lambda + \mu\alpha - \gamma\lambda}{\mu} \right)^K - K\lambda^2 + \mu^2\alpha + \gamma\lambda^2 - \lambda^2 - 2\mu\alpha\lambda + K\alpha\lambda^2 + K\mu\lambda - K\mu\alpha\lambda \right]}{(\lambda + \mu\alpha - \gamma\lambda)^2} \quad (12)$$

and

$$\frac{\partial \Phi}{\partial K} = \frac{\lambda \ln \left( \frac{\lambda + \mu\alpha - \gamma\lambda}{\mu} \right) (\mu - \lambda)(\gamma - 1) \left( \frac{\lambda + \mu\alpha - \gamma\lambda}{\mu} \right)^{K-1}}{\left[ \mu - \lambda \left( \frac{\lambda + \mu\alpha - \gamma\lambda}{\mu} \right)^K \right]^2} \quad (13)$$

Var konstruēt divas virsmas  $\frac{\partial \Phi}{\partial \mu} \frac{1}{c_1}$  un  $\frac{\partial \Phi}{\partial K} \frac{1}{c_2}$  trīsdimensiju telpā, atkarībā no  $\mu$  un  $K$ . Šo divu virsmu krustojums ir parādīts 7. att. un tas arī dod optimālo risinājumu, kas atbilst izteiksmei 10



7. att.:  $\frac{\partial \Phi}{\partial \mu} \frac{1}{c_1}$  un  $\frac{\partial \Phi}{\partial K} \frac{1}{c_2}$  plāksnes pie  $\rho = (0.1..0.9)$  attēlotas pie intensitātes  $\lambda = 10$  un geometriskās sadalījuma koeficientu  $\gamma = 0.9$

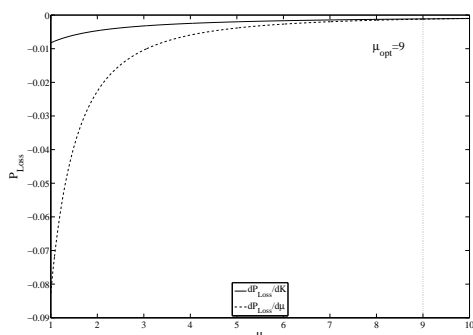
Šo optimizācijas likumu var izmantot sistēmas parametru dinamiskajā pieskaņošanas režīmā, pie tam ievērojot pieejamo resursu ierobežojumus. Izdalot papildus caurlaides joslu, vai palielinot izmantojamās buferatmiņas apjomu koncentratorā noteiktajai plūsmā, iegūstam

pakešu zudumu varbūtības  $P_{Loss} = \Phi(\lambda, \mu, K)$  samazināšanos. Pie tam, palielinās komunikāciju sistēmas izmaksas, tāpēc resursus ir jāsadala tā, lai attiecība (14) būtu minimāla.

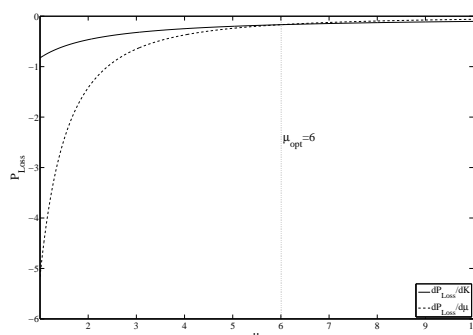
$$\frac{\Delta P_{Loss}^i}{P_{Loss}^*} / \frac{c_i}{C}. \quad (14)$$

Šeit  $\Delta P_{Loss}^i$  - pakešu zudumu varbūtības samazināšana pārdalot  $i$ -to resursu,  $P_{Loss}$  - pakešu zudumu varbūtība pirms resursu pārdalīšanas, bet  $C$  komunikāciju sistēmas izmaksas pirms resursu pārdalīšanas. Secīgi veicot lēmumu pieņemšanu, izejot no vienādības (14), iegūstam pakešu zudumu varbūtības samazināšanos. Soļu secība tiek atkārtota, kamēr  $P_{Loss} \leq P_{Loss}^*$ . Ja ieejā nonāk jaunā plūsma, bet resursu pārdalīšana negarantē pieprasīto pakešu zudumu varbūtību, tāda plūsma netiek atļauta.

Grafikos 8.a. - 9.b att. ir redzamas pakešu zudumu varbūtības atvasinājumu līknes pēc  $K$  ( $dP_{Loss}/dK$ ) un  $\mu$  ( $dP_{Loss}/d\mu$ ), atkarībā no tādu parametru kā: pakešu nonākšanas intensitāte ( $\lambda$ ), grupveidīguma koeficients ( $\gamma$ ), paketes apstrādes intensitāte ( $\mu$ ) un buferatmiņas apjoms. Izmantojot grafikus 8.a att. un 9.a att., var noteikt optimālo risinājumu bez izmaksu koeficientu ievērošanas, savukārt pēc grafikiem 8.b att. un 9.b att. to var izdarīt ar ievērošanu.



(a) Optimālā izejas caurlaides spēja  $\mu_{opt}$  bez resursu izmaksu ievērošanas



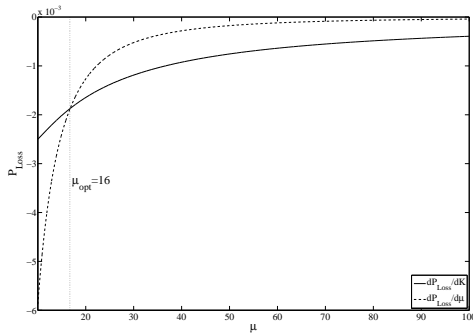
(b) Optimālā izejas caurlaides spēja  $\mu_{opt}$ , ievērojot resursu izmaksas

8. att.: Optimālā izejas caurlaides spēja  $\mu_{opt}$ .  $\lambda = 1$ ,  $K = 1$

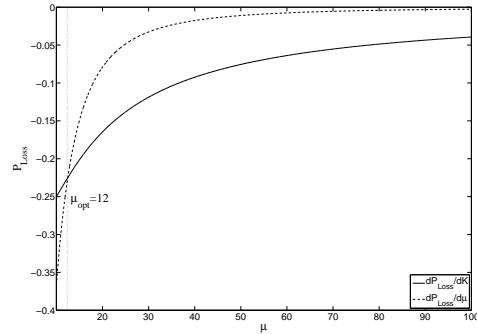
Šajā gadījumā izmaksu koeficienti  $c_i$  tika izvēlēti, izejot no atmiņas vienības un caurlaides spējas vienības cenu datiem 2009. Gadā. Optimālajam risinājumam atbilst grafika līkņu krustojuma punkti.

Iegūtie komunikācijas sistēmas parametru optimizācijas uzdevuma risinājuma rezultāti var tikt izmantoti vairākos gadījumos.

1. Projektējot sistēmu, kamēr nav uzstādīti ierobežojumi uz resursiem, var izvēlēties optimālo buferatmiņas apjoma vērtību  $K^*$  un optimālo izejas kanāla caurlaides spējas vērtību  $\mu^*$ , ja ir zināma komutatorā ienākošo datu plūsmu summārā intensitāte  $\Lambda$ .



(a) Optimālā izejas caurlaides spēja  $\mu_{opt}$  bez resursu izmaksu ievērošanas



(b) Optimālā izejas caurlaides spēja  $\mu_{opt}$ , ievērojot resursu izmaksas

9. att.: Optimālā izejas caurlaides spēja  $\mu_{opt}$ .  $\lambda = 10$ ,  $K = 10$

2. Lēmuma pieņemšanai par jaunās plūsmas pieslēgšanas iespējamību, ja sistēma saņem pieprasījumu papildus datu plūsmas veidošanai ar apriori zināmu intensitāti  $\Lambda_2$ .
3. Trešais gadījums ir saistīts ar vienlaicīgo resursu pieprasījumu ar vismaz divām konkurējošām plūsmām. Šajā gadījumā, tiek izvēlēta prioritātes plūsma, kā optimālās dispečerizācijas uzdevuma risināšanas rezultāts.

Otrais MBAC struktūras elements ir mērījumu bloks. Darbā tiek veikts pētījums, kas vērsts uz šī bloka parametru noteikšanu.

MBAC sistēmas ieejas trafika parametru integrālais mērīšanas process: Mērījumu mērķis – noteikt ienākošās pakešu plūsmas intensitāte un ieejas trafika sevīdzīguma parametru. Tas ir nepieciešams, lai varētu noteikt ieejas kanāla noslodzi un buferatmiņas apjomu turpmākajai lēmuma pieņemšanai par plūsmas atļaušanu sistēmā (komutators/maršrutētājs – sakaru kanāls) ar ierobežotu buferatmiņu.

Ienākoša plūsma tiek analizēta (t.i. tiek uzkrāti dati par to) vairāku laika intervālu  $T$  ilgumā. Pēc šiem intervāliem sistēma var paziņot ienākošās plūsmas analīzes rezultātus, kuri tiek izmantoti lēmuma pieņemšanai par jaunās plūsmas atļauju sistēmā.

Plūsmas parametru mērījumi tiek veikti diskrētajos momentos ar intervālu  $\Delta t$  un šos datus varam apzīmēt ar  $x(i)$ , kur  $i$  - intervāla  $\Delta t$  numurs. Tomēr, sistēmā bez pēdējā intervāla tiek uzkrāti dati par vienu vai citu parametru ilgākajā laikā. Noskaidrosim to optimālās izmantošanas iespējamību

Galvenais meklējamais parametrs ir ieejas plūsmas intensitāte  $i$ -jā novērošanas intervālā -  $\lambda_i$ . Plūsmas intensitāte, tāpat ka citi ieejas plūsmas parametri, tiek deklarēta ar avotu resursu pieprasīšanas laikā. Lielums, kas tiek deklarēts, piemēram ieejas plūsmas intensitāte, pasūtītājam nav precīzi zināms un, visdrīzāk, tiek uzdots ar kļūdu. Pēc [16] un [68],

novērtējamā parametra optimālā vērtība būs vienāda ar:

$$a_{opt} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r a_i. \quad (15)$$

vai savādāk:

$$a_{opt}(r) = a_{opt}^*(r-1) + \frac{1}{r} [a_r - a_{opt}^*(r-1)]. \quad (16)$$

No pēdēja vienādojuma izriet parametra novērtēšanas algoritms: kārtējā  $r$ -jā novērošanas etapā optimālā parametra vērtība sanāk vienāda ar parametra matemātisko cerību, kas iegūts iepriekšējos  $r-1$  novērošanas etapos, plus labojums, kas vienāds ar  $\frac{1}{r}(a_r - a_{opt}^*(r-1))$ . Tādā veidā, intervāla  $T$  beigās, aprakstītās aproksimācijas procedūras rezultāta, sistēmā veidojas dati par vienu vai vairākiem parametriem.

Parametru novērtēšanas kļūdu samazināšanai nepieciešams, vispirms, noteikt novērošana intervālu  $T$ . To nevar izvēlēties pārāk garu, jo esošā trafika raksturs var lēcieneidīgi izmainīties un sistēma šo lēcienus nepamanīs. Tāpēc darbā tika pieņemts, ka par objektīvu intervāla  $T$  novērtējumu var izvēlēties korelācijas intervālu  $\tau_k$ , pēc kura plūsmas var mainīties statistiskie parametri.

Otrais MBAC parametrs, kuru nepieciešams noteikt, ir intervāls starp nolasēm  $\Delta t$ . Ja tas būs pārāk liels, tad veidosies plūsmas parametru novērtēšanas lielā nenoteiktība. Visprecīzākais variants – novērot katru ienākošo paketi, kas apstrādes laika zudumu dēļ nav realizējams [61, 17].

Šī intervāla pamatotajai noteikšanai ir jāievēro plūsmas raksturu, kā tas ir novērojams sevlīdzīgajam trafikam [7]. Izmantojot šī darba rekomendācijas, šeit tiek izvirzīts sekojošais pieņēmums. Izejot no izteiksmes (17), var izveidot līkņu  $I(x, y)$  saimi atkarībā no  $\Theta$  pie dažādām  $\Delta t$ . No tā seko, ka (10.a - 10.b att.) var noteikt intervālu starp nolasēm  $\Delta t^*$ , kad  $I(x, y)$  būs maksimālās:

$$I(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + (t - \Theta)^{2H} \left[ 1 - \frac{[t^{2H} + (t - \Theta)^{2H} - \Theta^{2H}]^2}{4t^{2H}(1 - \Theta)^{2H}} \right] \frac{(\Theta - \Delta t)}{b} \right\} \quad (17)$$

kur  $I(x, y)$ - informācijas apjoms, kas tiek saņemts mērījumu laikā  $\Theta$ , pirms momentam  $t$ ;  $H$ -Hersta parametrs; bet  $b = (\Theta - \Delta t)\sigma_z^2$ , kur  $\sigma_z^2$  - pakešu skaita dispersija vienam mērījumam.

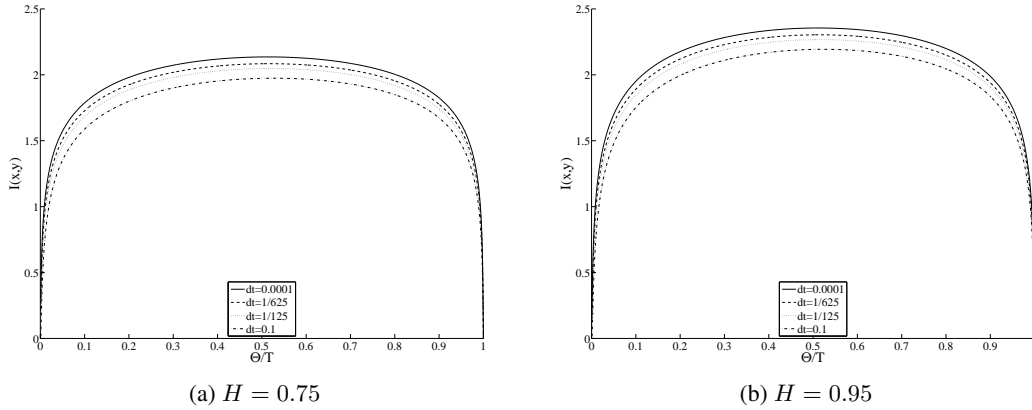
No grafikiem redzams, ka vērtība  $\Theta$ , kas dod  $I(x, y) \rightarrow max$ , atrodas plašajā diapazonā: tā nevar būt ļoti maza  $\Theta < 20\%$  vai ļoti liela  $\Theta > 80\%$ . Tā atrodas intervāla 20%...80% robežās, sākot ar pēdējo parametru novērtējumu  $T_i$  un beidzot ar lēmuma pieņemšanas momentu -  $T_Z$ .

Jaunai plūsmas nonākot nav nepieciešams gaidīt intervāla  $T$  beigas. Darbojošās plūsmas novērtējumu veicam, izmantojot uzkrātos datus intervālā  $\Theta \ll T$  no izteiksmes (17).

Ja konstruēt  $I(x, y)$  atkarību no  $\Theta$  - laiks, kas nepieciešams mērījumu pārbaudei un ap-

strādei, tad var redzēt, ka  $I(x, y) \rightarrow max$ , ja  $\Theta$  sastāda  $\frac{1}{2}$  no pēdējiem uzkrātiem mērījumiem.

No (10.a - 10.b att.) konstruēšanas ir redzams, ka nepieciešamais mērījumu un apstrādes intervāls samazinās ar sevlīdzīguma koeficienta ( $H$ ) pieaugumu. To arī varēja sagaidīt, jo palielinoties  $H$ , pieaug plūsmas korelācija un līdz ar to plūsmu var novērot īsākajā laika intervālā.



10. att.:  $I(x, y)$  atkarība no  $\Theta$  pie dažādām  $\Delta t$  vērtībām

Apskatīsim gadījumu, kad MBAC *tikko ieslēdzies* darbā. Sistēmā sāk nonākt pieprasījumi pirmās plūsmas piekļuvei sistēmā. Šajā gadījumā tiek izvēlēts sākotnējais datu uzkrāšanas intervāls  $S$  un sākotnēja novērošanas frekvence  $\delta$ . Pieņemsim vissliktāko gadījumu, kad plūsmai ir Puasona raksturs, tātad, tā nav korelēta.

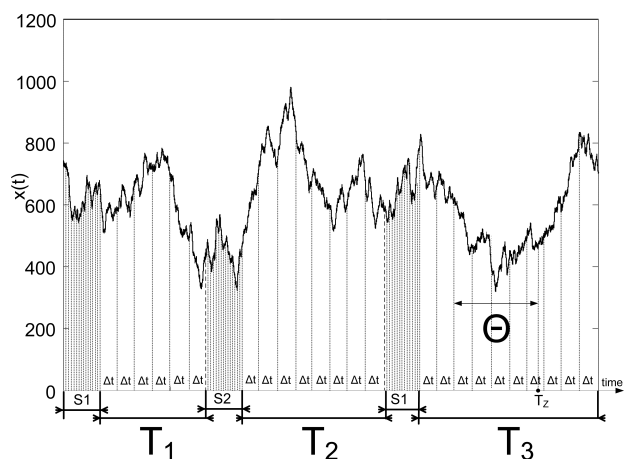
Ja ir zināmas deklarētas plūsmas intensitātes  $\lambda$ , tad  $\delta$  intervālu starp nolāsēm var pieņemt vienādu ar Puasona plūsmas korelācijas intervālu, kas vienāda ar  $\delta = \frac{1}{\lambda}$ . Jo lielāks novērošanas intervāls  $S$ , jo precīzāki ir mērījumi. Mērījumu kļūda  $\beta = \frac{D}{(m-1)}$ , kur  $D$  - procesa dispersija, bet  $m$  - mērījumu skaits ( $m = \frac{S}{\delta} = S\lambda$ ). Savukārt, Puasona procesa dispersija ir  $D = R_x(0) = 1$ , un mērījumu kļūda

$$\beta = \frac{D}{m-1} = \frac{1}{S\lambda-1} \approx 1/S\lambda. \quad (18)$$

Rezultātā, procesa novērošanas un mērīšanas diagramma izskatīsies tā, kā tas ir parādīts 11. att.

Sākotnēji pētot plūsmu ar garumu  $S$ , novērojumus ņem ar intervālu  $\delta \ll \Delta T$ , t.i. ar intervālu starp pakešu nonākšanu. Tālāk, pamatojoties uz uzkrāto statistiku, nosakām korelācijas intervālu  $\tau_k$ , kas vienāds ar  $T_1$ . Tālāk, pēc intervāla  $T_1$  beigām atkārtojas plūsmas analīze  $S$  laikā un tiek aprēķināts jaunais korelācijas intervāls, tiek piešķirts jaunais periods  $T_2$ .

Ja līdz perioda  $T_2$  beigām sistēmai mēģina pieslēgties jaunā plūsma momentā  $T_z$ , tad izejot no iepriekšējā perioda  $\Theta$  datiem, kas tika noteikti pēc formulas (17), tiek precizēti



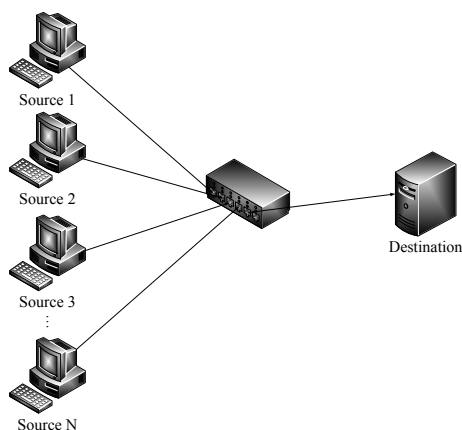
11. att.: MBAC sistēmas ieejas trafika parametru integrālais mērīšanas process.

eksistējošās plūsmas parametri un palikušie sistēmas resursi jaunās plūsmas pieslēgšanai pie sistēmas.

Nākamais MBAC bloks ir "Admission Decision", kurš pamatojoties uz pieprasījumiem un pieejamajiem resursiem pieņem lēmumu par jaunās plūsmas atļaušanu sistēmā.

Piekļuves vadības algoritma resursu sadalīšanas metode: Šī sadaļa apskata resursu sadalīšanu komunikāciju tīklos noteiktās pakešu zudumu varbūtības nodrošināšanai jauniem savienojumiem.

Modelis sastāv no vairākiem vienādas QoS prioritātes avotiem. Vairāku avotu trafiks iziet cauri komutatoram, kur tiek veikta multipleksēšana (12. att.). Ir svarīgi atzīmēt, varbūtība, ka pārraides ātrums kopējam trafikam būs vienāds ar maksimālo individuālā avota ātrumu, tiecas uz nulli. Tieši tāpēc ir iespējams panākt augsto tīkla utilizāciju, tajā pašā laikā nodrošinot QoS pakešu zudumu garantijas.



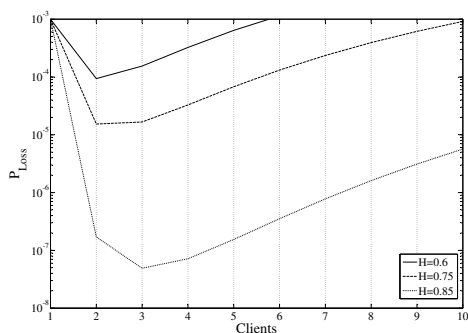
12. att.: Modeļa shēma

Trafika formēšana ir iebūvēta komutatorā. Mēs pieņemam sekojošo formēšanas politiku: ja ierobežoto komutatora resursu nepietiek pakešu zudumu garantiju nodrošināšanai, tad trafika formētājs samazina katra izveidota savienojuma caurlaides joslu. Gadījumā ar vienādas QoS prioritātes klases vairākiem avotiem tas nozīmē, ka caurlaides josla katram individuālām avotam ir apgriezti proporcionāla šo avotu skaitam.

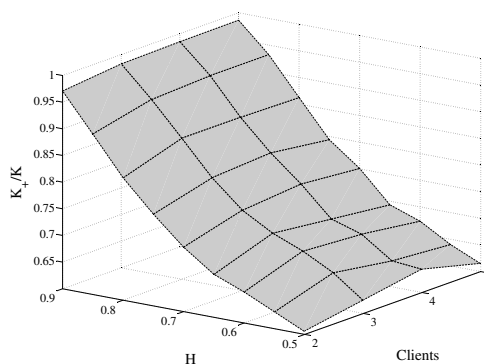
13.a att. parādīta  $P_{Loss}$  varbūtība atsevišķajam savienojumam, pēc [60]. Laiks starp pakešu pienākšanas brīžiem samazinās proporcionāli izveidoto savienojumu skaitam. Katra avota buferatmiņas apjoms ir izdalīts proporcionāli savienojumu skaitam.

Var parādīt, ka pakešu zudumu varbūtība samazinās, ja pakešu padošanas intensitāte samazinās proporcionāli klientu skaitam, ka arī samazinās atvēlētās buferatmiņas apjoms, tātad  $P_{Loss}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^{ClientNumber} P_{Loss}$  arī samazinās multipleksētajam trafikam. Šajā darbā tiek parādīts, ka lielāko ieguvumu no blīvēšanas var panākt pie augstākas utilizācijas, vai arī trafikam ar lielāku Hersta parametru -  $H$ .

13.b att. parādīts buferatmiņas apjoma ieguvums pēc trafika blīvēšanas.



(a) Pakešu zudumu varbūtība avotam ar intervālu starp paketēm, kas samazinās proporcionāli pievienoto klientu skaitam. Viena klienta pakešu intensitāti, kas atbilst  $\rho = 0.5$



(b) Buferatmiņas apjoms blīvējot trafiku pie  $\rho = 0.75$

### 13. att.: Ieguvums no statistiskas multipleksācijas

Priekšrocība, kuru var iegūt ar šī rezultāta izmantošanu – lietotāju skaita palielināšana pie uzdotās pakešu zudumu garantijas. Ar citiem vārdiem, mums būs vairāk brīvās buferatmiņas jaunajiem savienojumiem. Tādam "bezmaksas" resursam mēs izmantosim terminu "pārutilizācija". Tādā veidā, var vadīt kanāla resursu sadalīšanu, piebremzējot ieejas plūsmas, pamatojoties uz Service Level Agreement (SLA) līgumu starp klientu un provaideru.

Mūsdienu komutācijas mezglos kvalitātes garantiju nodrošināšanai izmanto shēmu Diff-Serv. Pie tam, pirmajā kārtā nodrošina augstās prioritātes plūsmu kvalitāti. Tomēr, pat vienas prioritātes klases robežās plūsmas var atšķirties ar saviem statistiskajiem raksturojumiem. Darbā ir izstrādāts vienādas prioritātes klases plūsmu optimālās dispečerizācijas algoritms.

Algoritms risina pieslēdzamās plūsmas izvēles uzdevumu (ja resursu visām plūsmām nepietiek) tā, lai visām pieslēgtām plūsmām nodrošinātu uzdoto apkalpošanas kvalitāti.

Vienādas prioritātes klases plūsmu optimālā dispečerizācija: Efektīvajai plūsmu vadībai tika ieviestas plūsmu klases un piešķirti tām atbilstošās prioritātes. Resursu izdalīšanas uzdevums paliek sarežģītāks, ja ieejā vienlaicīgi nonāk divas vai vairāk plūsmas ar vienādām prioritātes klasēm. Apskatīsim koncentratoru, kura ieejā nonāk  $n$  plūsmas ar intensitātēm  $\lambda_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ). Katrai plūsmai izejas kanālā tiek piešķirti resursi: apkalpošanas intensitāte  $\mu_i$  ( $\frac{1}{sek}$ ). Katru plūsmu raksturo apkalpošanas laika variācijas koeficients  $v_i$ . Katra  $i$ -tā plūsma veido koncentratora un izejas kanāla noslodzi ( $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ ), kas ir daļa no summārās noslodzes  $\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i$ .

Koncentratoram ir kopējā buferatmiņa ar apjomu  $r$  paketes, kura dalās uz zonām tādā veidā, lai katrai plūsmai tiktu izdalīts savs apjoms  $r_i$ . Pieņemsim, ka notiek plūsmu apkalpošana ar relatīvām prioritātēm, t.i. ja atmiņa ir pilnīgi aizņemta, jaunās paketes pazūd neatkarīgi no to prioritātes.

Pēc [38], pakešu zudumu varbūtība  $k$ -tās prioritātes plūsmai (pirmo prioritāti piešķir  $k = 1$ ):

$$P_{Loss_k} = \frac{\rho_{\Sigma_k}}{\rho_k} \frac{1 - \rho_{\Sigma_k} \frac{2r_k}{1+v_k^2}}{\frac{2r_k}{1+v_k^2} + 1} \rho_{\Sigma_k} \frac{2r_k}{1+v_k^2}, \quad (19)$$

kur  $\rho_{\Sigma_k} = \sum_{i=1}^k \rho_i$ ,  $r_k$  - buferatmiņas zonas apjoms  $k$ -tai plūsmai.

Plūsmu prioritāšu noteikšanu ir jāveic pēc sekojošā algoritma. Apskatīsim divas plūsmas,  $n = 2$ . Pirmajai plūsmai tiek piešķirta prioritāte  $k = 1$ . Paketes zuduma varbūtība tādai plūsmai sastāda:

$$P_{Loss_1} = \frac{1 - \rho_1 \frac{2r_1}{1+v_1^2}}{\frac{2r_1}{1+v_1^2} + 1} \rho_1 \frac{2r_1}{1+v_1^2}. \quad (20)$$

Paketes zuduma varbūtība plūsmai ar otro prioritāti sastāda:

$$P_{Loss_2} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_2} \frac{1 - (\rho_1 + \rho_2) \frac{2r_2}{1+v_2^2}}{1 - (\rho_1 + \rho_2) \frac{2r_2}{1+v_2^2} + 1} (\rho_1 + \rho_2) \frac{2r_2}{1+v_2^2}. \quad (21)$$

kur  $r_2 = r - r_1$ , bet  $r$  - koncentratora pilnais buferatmiņas apjoms.

Kopējā paketes zuduma varbūtība abām plūsmām sastāda:

$$P_{\Sigma} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \approx P_1 + P_2 \quad (22)$$

Pieņemot, ka plūsmu aranžēšana nav zināma, uzskatīsim ka ir divas plūsmas  $A$  un  $B$ ,

kas veido noslodzes  $\rho_A$  un  $\rho_B$ .

Apskatīsim divus gadījumus:  $a$  gadījums – prioritāte tiek piešķirta plūsmai  $A$ ;  $b$  gadījums – prioritāte tiek piešķirta plūsmai  $B$ . Ja  $P_{Loss\Sigma}^a < P_{Loss\Sigma}^b$ , tad prioritāti jādod plūsmai ar indeksu  $A$ , un otrādi.

Salīdzināšanas procedūras vienkāršošanai var pieņemt, ka variācijas koeficienti ir vienādi:  $v_A^2 = v_B^2 = 1$ . Apskatīsim gadījumu, kad  $\rho_A \ll 1$ , bet  $\rho_B \rightarrow 1$ , un pieņemsim, ka  $r_A = r_B = r_x$ . Tad pakešu zudumu varbūtību var aptuveni novērtēt šādi:

$$P_{\Sigma}^1 \cong \rho_A^{r_x} + \frac{\rho}{\rho_B} \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{r_x+1}} \rho_x^r. \quad (23)$$

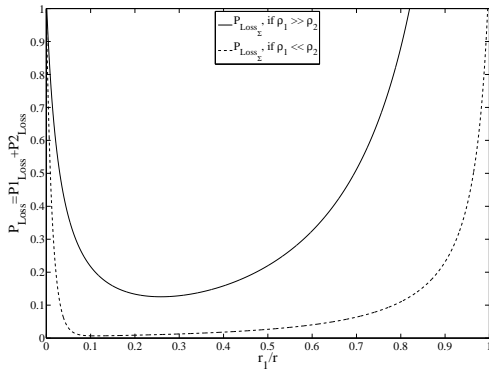
Ja  $\rho_A \rightarrow 1$ , bet  $\rho_B \ll 1$ , tad:

$$P_{\Sigma}^2 \cong \frac{1 - \rho_A}{1 - \rho_A^{r_x+1}} \rho_A^{r_x} + \frac{\rho}{\rho_B} \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{r_x+1}} \rho_x^r. \quad (24)$$

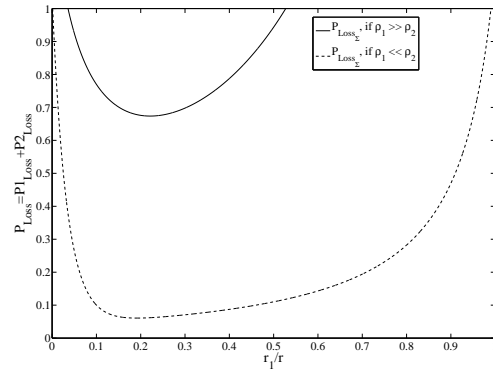
Otrajā gadījumā pirmais saskaitāmais mainās  $\frac{1 - \rho_A}{1 - \rho_A^{r_x+1}}$  reizēs, bet otrais mainās  $\cong \frac{1}{\rho_B}$  reizēs.

Tātad otrā prioritāšu piešķiršanas politika nav izdevīga. No šejienes var secināt: prioritāti jāpiešķir tai plūsmai, kura veidos mazāku komunikāciju sistēmas noslodzi.

Šo secinājumu apstiprina grafiks, kas parādīts 14.a att. No grafika ir redzams, ka augstāk veiktais secinājums ir patiess. Priekšrocība, kas rodas piešķirot prioritāti plūsmai, kas veido zemāku noslodzi, kļūst acīmredzama pie noslodzes attiecības palielināšanas, kā arī palielinot apkalpošanas laika variāciju (14.b.att.).



(a)  $v_1 = v_2 = v = 1$



(b)  $v_1 = v_2 = v = 2$

14. att.: Kopējā pakešu zudumu varbūtība. Noslodze, ko veido pirmā plūsma ir vienāda ar 0.8, un otrās plūsmas noslodze - ar 0.1, kur  $r = 31$ . Ar nepārtrauktu līniju apzīmēts grafiks, kad prioritāti deva pirmajai plūsmai, ar punktētu – kad prioritāti deva otrajai plūsmai.

Noteiksim buferatmiņas optimālo apjomu  $r_i^*$  ( $i = \overline{1, n}$ ) konkurējošām plūsmām. Šīm nolūkam konstruēsim grafikus, kuros parādīsim pirmās plūsmas atmiņas attiecības atkarību pie kopējā atmiņas apjoma ( $r_{opt}/K$ ). Optimālā buferatmiņas vērtība, kas tiek izdalīta pri-

oritātes plūsmai, tiek noskaidrota no grafiku saimes, kas parādīti 14.a.att. un 14.b.att. Tas fakts, ka neeksistē analītiskā izteiksme optimālās vērtības  $r_{opt}$  aprēķinam, piespied mūs izmantot vai nu iepriekš aprēķināto optimālo vērtību tabulu, vai nu izmantot skaitliskās metodes.

Dažu augstāk aprakstītu rekomendāciju pārbaudei tiek izmantota imitācijas vide OPNET. Tālāk var atrast piedāvājamā algoritmu kompleksa pamat-aprakstu un struktūras shēmas iMBAC realizācijai, kas orientēta uz sevlīdzīgu trafiku, kura raksturojumi piemīt mūsdienu telekomunikāciju sistēmu trafikam.

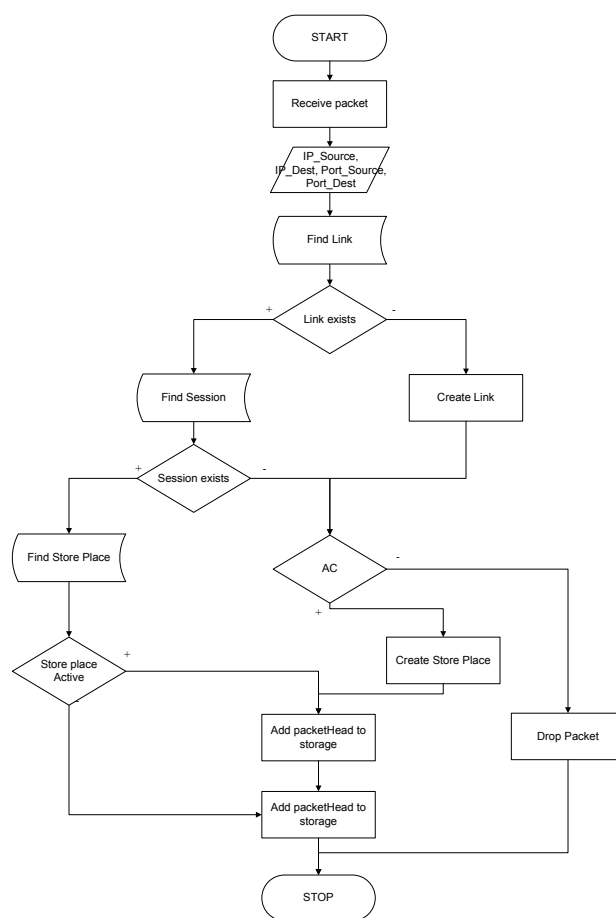
## 6. nodaļa MBAC intelektuālās sistēmas imitācijas modelēšana

Izstrādātais iMBAC modulis var būt aprakstīts ar sekojošiem trim apakšmoduļiem:

1. Mērījumu modulis fiksē sistēmas ienākošās paketes. Nonākšanas momentā tiek analizēta paketes galvene. Tālāk tiek noteikts, vai tā pieder tekošajai sesijai. Ja pieder, informāciju par paketes galveni pārraida trešajam modulim, kurš saglabā mērījumus. Ja pakete nepieder nevienai sesijai, tā pieprasa jaunā savienojuma izveidošanu. Šajā gadījumā, kvalitātes garantiju prasības tiek pārraidītas otrajam modulim. Apakšmoduļa shēma ir parādīta 15. att.
2. Lēmuma pieņemšanas modulis, kas aprēķina komutācijas sistēmas iespējamību nodrošināt pieprasītus resursus jaunajam savienojumam, tā lai eksistējošajiem savienojumiem nepārkāptu kvalitātes garantijas. Lēmums tiek pieņemts pamatojoties uz uzkrāto statistiku par sistēmas noslodzi. Ja resursi var būt nodrošināti, tad inicializējošā savienojumu pakete tiek pārraidīta, bet informācija par to tiek padota trešajam modulim. Piedāvājamās lēmuma pieņemšanas metodes blokshēma ir parādīta 16. att.
3. Modulis, kas uzkrāj mērījumus. Saņemot no iepriekšējiem moduļiem informāciju par nonākušo paketi, pieņem lēmumu par šīs informācijas saglabāšanas nepieciešamību, lai nodrošinātu ticamu statistiku lēmuma pieņemšanas modulim. Moduļa blokshēma ir parādīta 17. att.

Iepriekš veikto secinājumu un sniegto rekomendāciju patiesīguma pārbaudei tika izstrādāts MBAC modulis OPNET imitēšanas videi. Funkcijas MBAC realizēšanai OPNET tika integrēts modulis Real-Time Traffic Analyzer (RTTA). Galvenais RTTA uzdevums ir trafika savākšana, novērošana un glabāšana. Tas sastāv no diviem savstarpēji atkarīgajiem apakš-moduļiem: trafika mērītāja un trafika novērtētāja. Piedāvājamais modelis tiek raksturots ar zemām sistēmas nelietderīgām izmaksām reāllaika trafika parametru novērtēšanā un to var pielietot gan ar IntServ, gan ar DiffServ pieejām.

18. att. ir parādīts, kā tiek apstrādāti dati. 18. att. ir parādīta galvenā datu apstrādes blokshēma. Šajā diagrammā ir attēlots MBAC modelis kopumā. *Data Capturing* apskata



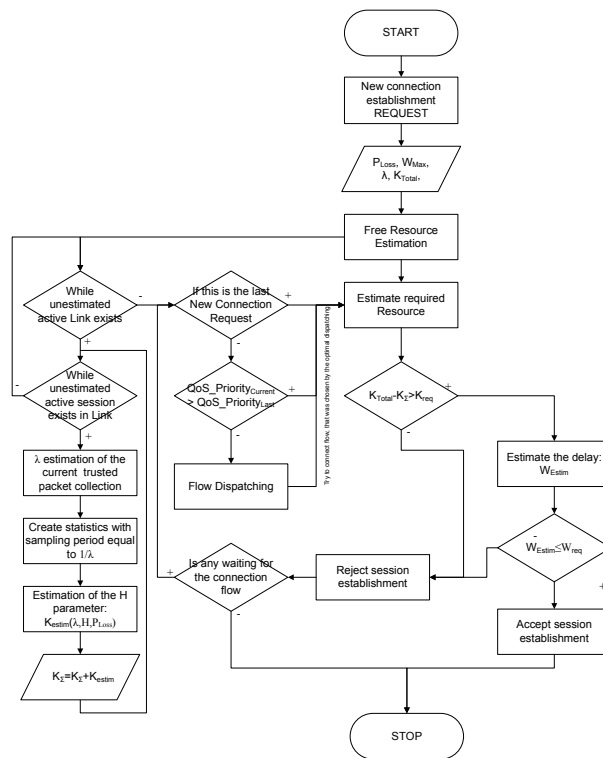
15. att.: Mērījumi

izveidoto plūsmu mērījumus. *Analyze* nozīmē ir novērtēt mērāma trafika parametrus. *Force-casting* moduļa funkcija ir paredzēt tīkla trafiku. *Decision Enforcement* modulis realizē piekļuves vadības funkcijas. Piekļuves lēmumu ietekmē novērtētie un prognozētie parametri. Lēmuma pieņemšana nosaka, vai pakete tiks pārraidīta, vai izmesta.

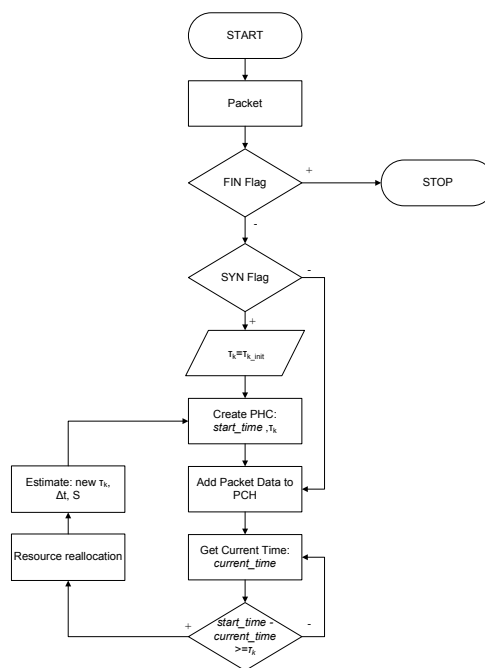
Piedāvātajā modeli ievērojami samazinātas nelietderīgas izmaksas, kas tiek panākts ar *Data Capturing* procesu. *Packet Analyze* modulis analizē paketes galveni. Ja pakete pieder datu sesijai ar šavākšanasstatusu, tad informācija ar paketi tiek pielikta *STORE* objektā. Pretējā gadījumā, informācija par paketi tiek ignorēta. Mēs piedāvājam veidot savstarpēji saistītus *Data Capturing* un *Analyze* komponentus tā, lai novērtējamie parametri ietekmētu mērīšanas procesu.

Savāktais process ir parādīts diagrammā 19.a att. Komponenti *Force Capturing* atbild par attiecīgā laika un korelācijas intervāla vadību.

Modelis tika veidots, ievērojot, ka parametru novērtēšana var būt veikta vai nu vienai sesijai, vai nu visam kanālam. Tas atbilst *Objektam*, kas tiek pārraidīts *Data Estimator* (skat. 19.b att.)

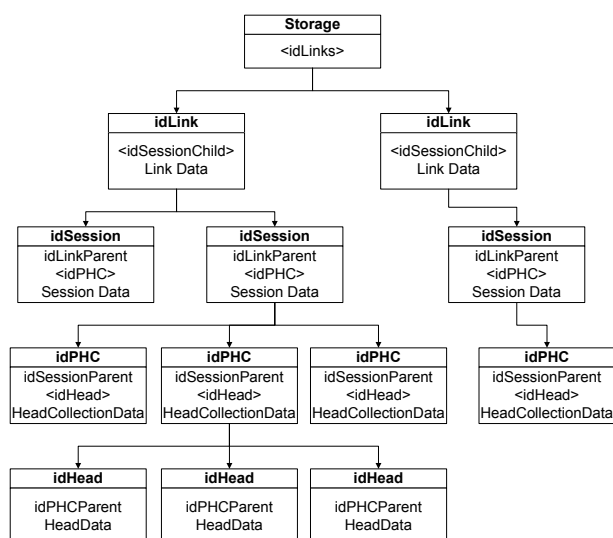


16. att.: Piekļuves vadība



17. att.: PHC

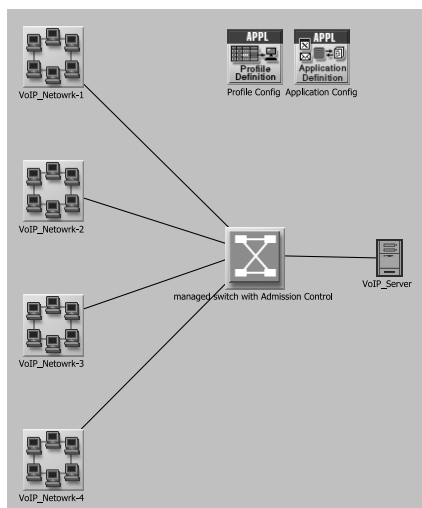




20. att.: Glabātuves hierarhija

Tālāk ir veikts scenāriju apraksts, kuri tiek izmantoti piedāvāto (MBAC) metožu efektivitātes pārbaudei.

21. att. ir parādīta datu pārraides tīkla scenārija struktūras shēma. Piedāvājamo MBAC vadības algoritma rekomendāciju efektivitātes pārbaudei tika izvēlēta speciāli samazināta komutatora caurlaides josla.



21. att.: VoIP scenārija OPNET projekts.

Realizētā modeļa moduļveidīga struktūra ļauj veidot MBAC ar dažādiem mērījumu, novērtēšanas un politikas algoritmiem.

Tekošajā versijā tika realizēti šādi novērtēšanas un politikas algoritmi:

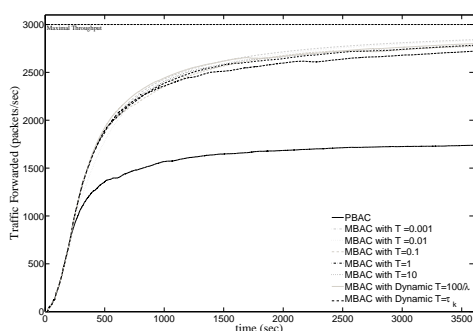
- Vienkārša AC-AR (P-AR) politika, kuras pamatā ir sistēmas noslodzes koeficients;

- Utilizācijas parametru novērtē pēc momentānās utilizācijas metodes (Instantaneous Utilization, E-IU).

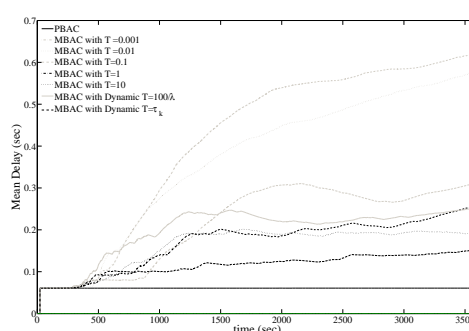
Modelis realizē 4 mērījumu algoritmus:

- Statiskais – mērījumu intervāls tiek iestādīts pirms palaišanas un paliek nemainīgs visas simulācijas gaitā.
- Dinamiskas – mērījumu intervāls tiek izvēlēts atkarībā no ienākošās plūsmas intensitātes.
- Otrais dinamiskais – mērījumu intervāls ir vienāds ar korelācijas intervālu.
- Trešais dinamiskais – iepriekš minētā algoritma papildinātā versija. Uzlabojumi attiecas uz sistēmas noslodzes samazināšanu attiecībā uz mērījumu veikšanu.

Rezultāti: 22.a att. un 22.b att. ir parādīti modelēšanas rezultāti, kas ataino vidējās caurlaides spējas un pakešu aiztures izmaiņu dinamiku rindā, kas veidojas centrālajā vadāmajā komutatorā. Tika modelētas sekojošās metodes ar vienkāršo politiku P-AR un novērtēšanu E-IU.



(a) Vidējā caurlaides spējas vērtība.



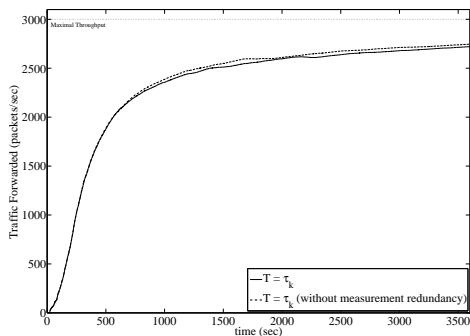
(b) Vidējā rindas aiztures vērtība.

22. att.: Vidējās vērtības dažādiem piekļuves vadības mehānismiem.

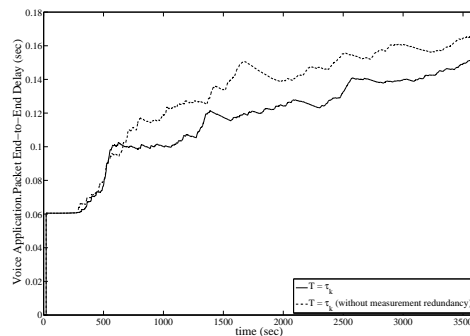
Tālāk ir sniegti salīdzinošie veiktspējas rezultāti vadības algoritmam ar loga izmēru, kas iestādīts vienāds ar korelācijas intervālu, bet pie mazākas mērījumu redundances.

23.a att. parāda, ka abos gadījumos aktīvo sesiju skaits un noslodzes ir samēra tuvi. No 23.b att. var redzēt, ka samazinot mērījumu pārmērīgumu, aizture ir palielinājusies, bet joprojām tā ir pieņemamās robežās. Pie tam, pēc simulācijas rezultātiem var apgalvot, ka tāda pieeja samazinās nepieciešamo mērījumu skaitu par  $\approx 17\%$ .

Rezultāti sakrīt ar izvirzīto pieņēmumu, ka vislabākus rezultātus var panākt, pielietojot trafika parametriem adaptīvo loga izmēru. Pie tam, vislabākais loga izmērs ir vienāds ar korelācijas intervālu  $T = \tau_k$ . Imitēšanas rezultāti parāda arī to, ka izmaksas korelētajam trafikam, kas saistītas ar mērījumu procesu, var tikt samazinātas.



(a) Trafiks, kas izeja caur vadāmo komutatoru.



(b) Balss pakalpojuma kopējā aizture no viena gala līdz otram.

23. att.: Piedāvāto metožu salīdzināšana.

## 7. nodaļa Nobeigums

Darbā ir sniegtas rekomendācijas vadības algoritmu izstrādei ar mērķi palielināt tīkla veiktspēju pie apkalpošanas kvalitātes garantiju izpildīšanās.

Piedāvājamo algoritmu īpašība ir tāda, ka tie ievēro trafika nevienmērīguma raksturu. Izmantojot rindu modeli ar ienākošo grupveida plūsmu, tika izstrādāts telekomunikāciju sistēmas strukturālo elementu vērtību, piemēram, buferatmiņas apjoma, izvēles algoritms. Tas ļauj izvēlēties tīkla struktūras elementus komunikāciju sistēmas projektēšanas stadijā pie uzdotās  $P_{Loss}$  vērtības un, tātad, minimizēt izmaksas.

Darbā ir pieejamas rekomendācijas pieminētā algoritma pielietošanai izmaksu minimizēšanai komunikāciju sistēmas ekspluatācijas laikā. To var panākt ar resursu pārdalīšanu tādā veidā, lai visdārgākais resurss tiktu izmantots minimāli.

Tiek apgalvots, ka grupveida trafikam ir izteikta negatīvā ietekme uz tīkla veiktspēju. Tiek apgalvots arī tas, ka vairāku grupveida rakstura plūsmu apvienošana vienā plūsmā dod ievērojamu ieguvumu, jo varbūtība, ka izmantojamā caurlaides josla būs vienāda ar atsevišķu joslu maksimālo ātrumu joslām ir ļoti zema. Tādā veidā var paaugstināt tīkla utilizāciju, izpildot kvalitātes garantijas pēc parametra  $P_{Loss}$ , jo iegūtais ieguvums no plūsmu apvienošanas var būt izmantots papildus plūsmu pieslēgšanai.

Plūsmas savienojuma veidošana ir iespējama tikai tādā gadījumā, kad ir pietiekošais resursu daudzums. Darbā ir izstrādāts un aprakstīts plūsmas izvēles algoritms gadījumam, kad resursu nepietiek visām jaunām ienākošām plūsmām ar vienādu prioritātes klasi. Lai novērtētu iespējamus resursus tika piedāvāts izmantot tiešus sistēmas mērījumus. Darbā tika izstrādātas rekomendācijas mērījumu loga un nolašu perioda izvēlei. Bez tam, darba var atrast arī rekomendācijas sistēmas noslodzes samazināšanai, kas tieši ietekmē mērījumu procesu.

Piedāvātās rekomendācijas tika pārbaudītas, izmantojot MBAC logisko un struktūras shēmas, kas tika realizētas imitēšanas vidē OPNET. Modelēšanas rezultāti apstiprina iepriekš

izstrādātas rekomendācijas.

Turpmākais darbs: Šī darba rezultāti un rekomendācijas paredz ievērojamu turpmāku darbu, it īpaši bezvadu tīklu jomā

## Literatūras saraksts

- [1] Adas, A. and Amarnath Mukherjee: *On resource management and qos guarantees for long range dependent traffic*. In *in Proc. IEEE INFOCOM '95*, pages 779–787, 1994.
- [2] Addie, Ronald G.: *Fractal traffic: measurements, modelling and performance evaluation*. In *in Proc. IEEE INFOCOM '95*, pages 977–984, 1995.
- [3] Allman, Mark and Ethan Blanton: *Notes on burst mitigation for transport protocols*. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 35(2):53–60, 2005, ISSN 0146-4833.
- [4] Amogh, Dhamdhere and Dovrolis Constantine: *Open issues in router buffer sizing*. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 36(1):87–92, 2006, ISSN 0146-4833.
- [5] Appenzeller, Guido, Isaac Keslassy, and Nick McKeown: *Sizing router buffers*. In *IN PROCEEDINGS OF ACM SIGCOMM*, pages 281–292, 2004.
- [6] Arvidsson, A. and P. Karlsson: *On traffic models for tcp/ip*. In *Teletraffic Engineering in a Competitive World, Proc. ITC-16*, pages 457–466, 1999.
- [7] Asars, A. and E. Petersons: *Determining the optimal interval of the parameter identification of self-similar traffic*. Journal Automatic Control and Computer Sciences, 43(4):211–216, August 2009, ISSN 0146-4116.
- [8] Bernet, Y., P. Ford, R. Yavatkar, F. Baker, L. Zhang, M. Speer, R. Braden, B. Davie, J. Wroclawski, and E. Felstaine: *A framework for integrated services operation over diffserv networks*. Technical report, IETF, United States, 2000.
- [9] Bistrov, V. and E. Peterson: *Analytic estimation of packet loss probability in communication systems with self-similar input flow*. Journal Automatic Control and Computer Sciences, 42(4):197–202, August 2008.
- [10] Blake, S., D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss: *An architecture for differentiated service*. Technical report, IETF, United States, 1998.
- [11] Brady, P. T.: *A statistical analysis of on-off patterns in 16 conversations*. Bell System Technical, 47(1):73–91, 1968.

- [12] Breslau, Lee, Sugih Jamin, and Scott Shenker: *Comments on the performance of measurement-based admission control algorithms*. In *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, pages 1233–1242, April 2000.
- [13] Buffet, E. and N.G. Duttield: *Exponential upper bounds via martingales for multiplexers with markovian arrivals*. *Journal of Applied Probability*, 31:1049–1061, 1994.
- [14] Cardwell, Neal, Stefan Savage, and Thomas Anderson: *Modeling tcp latency*. In *IEEE INFOCOM*, pages 1724–1751, 2000.
- [15] Choi, Baek Young, Jaesung Park, and Zhi Li Zhang: *Adaptive random sampling for load change detection*. In *SIGMETRICS '02: Proceedings of the 2002 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems*, pages 272–273, New York, NY, USA, 2002. ACM, ISBN 1-58113-531-9.
- [16] Cil'kin, Ja.Z.: *Osnovy informacionnoj teorii informacii*. M.: Nauka, 1984.
- [17] Claffy, Kimberly C., George C. Polyzos, and Hans Werner Braun: *Application of sampling methodologies to network traffic characterization*. In *SIGCOMM '93: Conference proceedings on Communications architectures, protocols and applications*, pages 194–203, New York, NY, USA, 1993. ACM, ISBN 0-89791-619-0.
- [18] Crovella, Mark E. and Azer Bestavros: *Self-similarity in world wide web traffic: evidence and possible causes*. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 5(6):835–846, 1997, ISSN 1063-6692.
- [19] Dhamdhere, A., H. Jiang, and C. Dovrolis: *Buffer sizing for congested internet links*. In *In roceedings of IEEE INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2005.
- [20] Enachescu, Mihaela, Yashar Ganjali, Ashish Goel, Nick McKeown, and Tim Roughgarden: *Part III: routers with very small buffers*. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 35(3):83–90, 2005, ISSN 0146-4833.
- [21] Erramilli, Ashok, Onuttom Narayan, and Walter Willinger: *Experimental queueing analysis with long-range dependent packet traffic*. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 4(2):209–223, 1996, ISSN 1063-6692.
- [22] Feldmann, A., A. C. Gilbert, W. Willinger, and T. G. Kurtz: *The changing nature of network traffic: scaling phenomena*. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 28(2):5–29, 1998, ISSN 0146-4833.
- [23] Floyd, S.: *Hightspeed tcp for large congestion windows*. Technical report, IETF, United States, 2003.

- [24] Grossglauser, Matthias and David N. C. Tse: *A framework for robust measurement-based admission control*. IEEE/ACM Trans. Netw., 7(3):293–309, 1999, ISSN 1063-6692.
- [25] Guerin, R., H. Ahmadi, and M. Naghshineh: *Equivalent capacity and its application to bandwidth allocation in high-speed networks*. IEEE Journal on Selected Areas In Communications, 9(7):968–981, September 1991.
- [26] Hernandez, Edwin A., Matthew C. Chidester, and Alan D. George: *Adaptive sampling for network management*. J. Netw. Syst. Manage., 9(4):409–434, 2001, ISSN 1064-7570.
- [27] HORI, Yoshiaki, Hidenari SAWASHIMA, Hideki SUNAHARA, and Yuji OIE: *Performance evaluation of udp traffic affected by tcp flows*. IEICE TRANSACTIONS on Communications, 81(8):1616–1623, 1998.
- [28] Ilnickis, S. and E.Petersons: *Nonstationary behavior research of terminal-server system with self-similar approximated input flow*. Journal Automatic Control and Computer Sciences, 39(4):48–59, 2005.
- [29] Jaffe, Joseph, Louis Cassotta, and Stanley Feldstein: *Markovian model of time patterns of speech*. Science Magazine, 144(3620):1049–1061, May 1994.
- [30] Jamin, Sugih, Scott J. Shenker, and Peter B. Danzig: *Comparison of measurement-based admission control algorithms for controlled-load service*. In *INFOCOM '97: Proceedings of the INFOCOM '97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Driving the Information Revolution*, page 973, Washington, DC, USA, 1997. IEEE Computer Society, ISBN 0-8186-7780-5.
- [31] Jiang, Hao and Constantinos Dovrolis: *Why is the internet traffic bursty in short time scales?* In *SIGMETRICS '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems*, pages 241–252, New York, NY, USA, 2005. ACM, ISBN 1-59593-022-1.
- [32] Jiang, Yuming, Peder J. Emstad, Anne Nevin, Victor Nicola, and Markus Fidler: *Measurement-based admission control for a flow-aware network*. In *EuroNGI 1st Conference on Next Generation Internet Networks (NGI)*, 2005.
- [33] Jiang, Yuming, Peder J. Emstad, Victor Nicola, and Anne Nevin: *Measurement-based admission control: A revisit*. In *Seventeenth Nordic Teletraffic Seminar, Fornebu*, pages 25–27, 2004.

- [34] Kulikovs, M. and E. Petersons: *Packet loss probability dependence on number of on-off traffic sources in opnet*. ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING, 85(5):77–80, 2008.
- [35] Kulikovs, Mihails and Ernests Petersons: *Remarks regarding queuing model and packet loss probability for the traffic with self-similar characteristics*. International Journal of Computer Science, 3(2):84–90, 2008.
- [36] Kuokkwee, Wee, Mohamed Othman, Subramaniam Shamala, and Ahmad Ariffin: *Enhanced dynamic bandwidth allocation proportional to queue length with threshold value for vbr traffic*. The International Arab Journal of Information Technology, 4(2):117–124, 2007, ISSN 1683-3198.
- [37] Likhanov, N., B. Tsybakov, and N. D. Georganas: *Analysis of an atm buffer with self-similar ("fractal") input traffic*. In *INFOCOM '95: Proceedings of the Fourteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies (Vol. 3)-Volume*, page 985, Washington, DC, USA, 1995. IEEE Computer Society, ISBN 0-8186-6990-X.
- [38] Lipaev, V. V. и S. F. Jashkov: *Jeffektivnost' metodov organizacii vychislitel'nogo processa v ASU*. M.: Statistika, 1975.
- [39] Ma, Qingming and Peter Steenkiste: *Quality-of-service routing for traffic with performance guarantees*. In *In Proc. IFIP International Workshop on Quality of Service*, pages 115–126, 1997.
- [40] Ma, Wenhong, James Yan, and Changcheng Huang: *Adaptive sampling methods for network performance metrics measurement and evaluation in mpls-based ip networks*. In *In proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2003. IEEE CCECE 2003*, volume 2, pages 1005–1008, 2003, ISBN 0-7803-7781-8.
- [41] Mandelbrot, Benoit: *Long-run linearity, locally gaussian process, h-spectra and infinite variances*. International Economic Review, 10(1):82–111, February 1969. <http://ideas.repec.org/a/ier/iecrev/v10y1969i1p82-111.html>.
- [42] Mandelbrot, Benoit B.: *Intermittent turbulence in self-similar cascades: divergence of high moments and dimension of the carrier*. Journal of Fluid Mechanics, 62(2):331–358, 1974.
- [43] Mena, A. and J. Heidemann: *An empirical study of real audio traffic*. In *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, pages 1001–1010, April 2000.
- [44] Minoli, D.: *Issues in packet voice communications*. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, August 1979.

- [45] Morin, Patrick R.: *The impact of self-similarity on network performance analysis*. Technical report, Carleton University, Dec 1995.
- [46] Nichols, K., S. Blake, F. Baker, and D. Black: *Definition of the differentiated services field (ds field) in the ipv4 and ipv6 headers*. Technical report, IETF, United States, 1998.
- [47] Norros, I.: *A storage model with self-similar input*. Queueing System, 16:387–396, 1994.
- [48] Pan, Davis Yen: *Digital audio compression*. Digital Tech. J., 5(2):28–40, 1993, ISSN 0898-901X.
- [49] Park, Kihong: *Afec: An adaptive forward error-correction protocol and its analysis*. In *In Proc. IEEE IC3N*, pages 196–205, 1997.
- [50] Park, Kihong, Gitae Kim, and Mark Crovella: *On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similar network traffic*. Technical report, Boston University, Boston, MA, USA, 1996.
- [51] Park, Kihong, Gitae Kim, and Mark Crovella: *On the effect of traffic self-similarity on network performance*. In *In Proceedings of the SPIE International Conference on Performance and Control of Network Systems*, pages 296–310, 1997.
- [52] Park, Kihong and Walter Willinger: *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2000, ISBN 0471319740.
- [53] Paxson, Vern and Sally Floyd: *Wide-area traffic: The failure of poisson modeling*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 3:226–244, 1995.
- [54] Perros, H.G. and K.M.F. Elsayed: *Call admission control schemes: A review*. IEEE Magazine on Communications, 34(11):82–91, 1996.
- [55] Postel, J.: *User datagram protocol*. Technical report, IETF, United States, 1980.
- [56] Raina, G. and D. Wischik: *Buffer sizes for large multiplexers: Tcp queueing theory and instability analysis*. In *Next Generation Internet Networks '05*, pages 173–180, Rome, Italy, 2005.
- [57] Raina, Gaurav, Don Towsley, and Damon Wischik: *Part II: control theory for buffer sizing*. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 35(3):79–82, 2005, ISSN 0146-4833.
- [58] Riedi, R. and J. Levy Vehel: *Tcp traffic is multifractal: a numerical study*, 1997.
- [59] Riedi, Rudolf H., Matthew S. Crouse, Vinay J. Ribeiro, and Richard G. Baraniuk: *A multifractal wavelet model with application to network traffic*. IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, 45:992–1018, 1998.

- [60] Rodriguez-Dagnino, R. M.: *Some remarks regarding asymptotic packet loss in the pareto/m/1/k queueing system*. IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, 9(10):927–929, 2005.
- [61] Rushby, John: *Systematic formal verification for fault-tolerant time-triggered algorithms*. IEEE Trans. Softw. Eng., 25(5):651–660, 1999, ISSN 0098-5589.
- [62] Sahinoglu, Zafer and Sirin Tekinay New: *On multimedia networks: Self-similar traffic and network performance*. IEEE Communications Magazine, 37:48–52, 1999.
- [63] Shenker, S., C. Partridge, and R. Guerin: *Specification of guaranteed quality of service*. Technical report, IETF, United States, 1997.
- [64] Sivaradje, G. and P. Dananjayan: *Efficient resource allocation scheme for real-time mpeg video traffic over atm networks*. In *ICCS '02: Proceedings of the The 8th International Conference on Communication Systems*, pages 747–751, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society, ISBN 0-7803-7510-6.
- [65] Takano, Ryousei, Tomohiro Kudoh, Yuetsu Kodama, Motohiko Matsuda, Hiroshi Tezuka, and Yutaka Ishikawa: *Design and evaluation of precise software pacing mechanisms for fast long-distance networks*. In *In Proceedings of PFLDNet 2005*, 2005.
- [66] Tang, N., S. Tsui, and L. Wang: *A survey of admission control algorithms*. Technical report, Computer Science Department, University of California Los Angeles (UCLA), Dec 1998.
- [67] Ulanovs, P. and E. Peterson: *Modelling methods of self-similar traffic for network performance evaluation*. In *Scientific Proceedings of RTU, Series 7, Telecommunications and Electronics*, pages 40–49, 2002.
- [68] Vazan, M.: *Stohasticheska ja aproksimacija*. M.: Mir, 1973.
- [69] Veres, Andras and Miklos Boda: *The chaotic nature of tcp congestion control*. In *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, pages 1715–1723, April 2000.
- [70] Villamizar, Curtis and Cheng Song: *High performance tcp in ansnet*. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 24(5):45–60, 1994, ISSN 0146-4833.
- [71] Wischik, Damon and Nick McKeown: *Part I: buffer sizes for core routers*. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 35(3):75–78, 2005, ISSN 0146-4833.
- [72] Wucher, Karen: *The internet singularity, delayed: Why limits in internet capacity will stifle innovation on the web*. Technical report, Nemertes Research, November 2007.