

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un Telekomunikāciju fakultāte
Transporta Elektronikas un Telemātikas katedra

Elans GRABS

Doktora studiju programmas

“Transporta Datorvadības, Informācijas un Elektroniskās Sistēmas” doktorants

**SEVLĪDZĪGĀ TRAFIKA PARAMETRU ANALĪZE
TĪKLA VEIKTSPĒJAS PAAUGSTINĀŠANAI,
PIELIETOJOT REĀLLAIKA DISKRĒTO
VEIVLETU TRANSFORMĀCIJU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Profesors *Dr. habil. sc. ing.*
E. PĒTERSONS

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

Grabs E. Sevlīdzīgā trafika parametru analīze tīkla veikspējas paaugstināšanai, pielietojot reāllaika diskrēto veivletu transformāciju. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2016. – 30 lpp.

Iespiests saskaņā ar ETF Promocijas Padomes “RTU P-08” 2016. gada 21. janvāra lēmumu, protokols Nr. 31.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projekta “Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai” atbalstu.

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 5. maijā Rīgas Tehniskās Universitātes Elektronikas un Telekomunikāciju Fakultātē, Āzenes ielā 12, telpā 2-38.

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Profesors *Dr. sc. ing.* Gunārs Lauks
Rīgas Tehniskā Universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Guntis Bārzdīņš
Latvijas Universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Grakovskis
Transporta un Sakaru Institūts, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

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

Elans Grabs(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 16 pielikumi, 76 zīmējumi un ilustrācijas, kopā 200 lappuses (129 lappuses bez pielikumiem). Literatūras sarakstā ir 100 nosaukumi.

Satura rādītājs

1. Promocijas darba vispārējais apraksts	5
1.1. Tēmas aktualitāte	5
1.2. Darba mērķi	6
1.3. Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	6
1.4. Aizstāvamās tēzes	7
1.5. Pētījumu metodika	7
1.6. Darba praktiskais pielietojums	8
1.7. Darba rezultātu aprobācija	8
1.8. Darba struktūra	9
2. Promocijas darba detalizētais apraksts	10
2.1. Sevlīdzīgā trafika modelis un diskrētā veivletu transformācija	10
2.2. Reāllaika diskrētā veivletu transformācija ar filtru bankām	12
2.3. Trafika sevlīdzīguma parametra novērtējums, tā kļūda un realizācija ar filtru bankām	15
2.4. Pakešu zudumu varbūtības analīze ģenerētajam sevlīdzīgajam trafikam $P/M/1/K$ un $G/M/1/K$ simulācijas modeļiem	19
Galvenie secinājumi	26
Literatūra	28

1. Promocijas darba vispārējais apraksts

1.1. Tēmas aktualitāte

Pašlaik tiek plaši uzskatīts, ka mūsdienu tīklos trafikam piemīt sevlīdzīguma īpašība [34], t.i., apskatot šādu datu plūsmu (trafiku) dažādos mērogos (sekundēs, minūtēs, stundās, diennaktīs utt.), var konstatēt, ka tās raksturs saglabājas laikā neatkarīgi no apskatāmā mēroga. Tas tika konstatēts, piemēram [16], kur autori veica trafika mērījumus dažādos *Bellcore* laboratorijas lokālajos tīklos laika posmā starp 1989. un 1992. gadu. Šajā darbā tika uzskaitītas datu paketes īsajos laika intervālos un pakešu sadalījums tika atainots grafiski atkarībā no laika. Šādi sadalījumi tika apskatīti sīkākā mērogā, samazinot pakešu uzskaitīšanas laika intervāla garumu 10 reizes patvaļīgi izvēlētajā sadalījuma apakšintervālā.

Sevlīdzīguma koncepcija ir cieši saistīta ar haosa un fraktāļu teoriju, kā arī ar pakāpju rindām. Pirmais zinātnieks, kas pievērsa uzmanību šīm parādībām, bija Benuā Mandelbrots, kurš piedāvāja veidu, kā var aprakstīt dabas sarežģītās formas ar matemātikas palīdzību [20]. Konkrētāk, runa ir par fraktāļiem – sevlīdzīgajām struktūrām, kas ir plaši sastopamas apkārtesošajā pasaulē. Parādība ar sevlīdzīguma īpašībām vienādi izskatās vai uzvedās, apskatot to dažādos mērogos. Turklāt mērogu mainīt var gan telpiskajām koordinātēm, gan laika koordinātei. Sevlīdzīgumu raksturo ar Hersta parametru.

Pastāv vairākas metodes Hersta parametra novērtēšanai, un ir veikti salīdzinošie pētījumi par šo metožu precizitātes novērtēšanu, piemēram, [6], [32]. Hersta parametra novērtēšanai pielietojamas vairākas transformācijas – frakcionālā Furjē transformācija [33], empīrisko modu dekompozīcija (*EMD*) [10], diskretā veivletu transformācija [1]. Tieši pēdējā transformācija, ievērojot tās piemērotību pēc savas dabas, arī ir paņemta par pamatu šajā promocijas darbā. Lai Hersta parametru varētu novērtēt reāllaikā, ir nepieciešams izveidot reāllaika diskretās veivletu transformācijas algoritmu. Tādi mēģinājumi jau ir sen veikti, piemēram, darbā [21]. Tādu transformāciju var veikt ar zemām skaitļošanas izmaksām, izmantojot filtru bankas [28].

Sevlīdzīgums ir stipri izteikts mūsdienīgajos tīklos. Daudzi pētījumi jau pierādīja, ka novecojušais Puasona trafika modelis vairs nav piemērojams sevlīdzīgajam trafikam, taču arī pēdējos gados jaunie pētījumi apstiprina šo faktu un pat prognozē, ka nākotnē vecais modelis nebūs piemērots nākamās paaudzes tīklos [18]. Turklāt vecos Markova ķēdes paņēmienus var izmantot papildinājumā, lai precīzāk analizētu trafiku [27]. Interessants fakts ir tāds, ka trafiks ir sevlīdzīgs ne tikai datoru tīklos – piemēram, [9] tika noteikts, ka integrēto mikroshēmu savienojuma tīklā arī ir sevlīdzīgs trafiks (runa ir par sarežģītajām mikroshēmām, tādām, kā, piemēram, *DSP*). Tāpēc ir svarīgi noteikt sevlīdzīguma pakāpi, novērtējot Hersta parametru. Šajā promocijas darbā tāda mērķa sasniegšanai tiek pielietota veivletu transformācija, ko pirmoreiz piedāvāja [1]. Šis darbs ierosināja pētnieku interesi par šo jautājumu un tika turpināti pētījumi par veivletu transformācijas Hersta parametra novērtētāju. Piemēram, darbā [17] tika parādīts, ka veivletu nulles momentu izvēle¹ nepalielina novērtēšanas precizitāti. Veivletu transformācija Hersta parametra noteikšanā ir joprojām aktuāls risinājums, par ko liecina pēdējo gadu darbi, kuros tiek

¹ M nulles momenti veivleta bāzes funkcijai nosaka ģenerējamā ar to polinoma maksimālo pakāpi $M - 1$, ar kuru bāzes funkcija būs ortogonāla. Jo vairāk nulles momentu ir bāzes veivletam, jo precīzāk un pilnīgāk tā bāze apraksta sarežģītus signālus.

meklēti jauni veivleti novērtēšanas raksturojumu uzlabošanai. Piemēram, [22] tiek izmantotas kompleksas veivletu bāzes funkcijas.

Tādam trafikam ir svarīgi veidot kontroles sistēmas, lai pārvaldītu tīkla resursus efektīvāk. Šajā jomā ir veikti ļoti daudzi pētījumi. Lai vadītu trafika plūsmu pārslogojumus, trafiku bieži iedala klasēs, katra no tām tiek apstrādāta ar dažādām *QoS* prasībām un tādā veidā tiek veikta tīkla optimizācija, kā tas ir izdarīts, piemēram, [14]. Literatūrā ir sastopams, ka klasifikāciju ir iespējams veikt tieši pēc Hersta parametra vērtībām, piemēram, to ir piedāvāts darīt publikācijā [24]. Nopietns pētījums par trafika klasifikāciju ar diskrētās veivletu transformācijas metodi ir paveikts [26]. Turklāt, tādu klašu skaits strauji pieaug, un ir nepieciešams veidot arī jaunus mehānismus savienojumu vadībai (*Connection Admission Control, CAC*) [31], [11], [30]. Ļoti aktuāls jautājums ir buferatmiņas pārvaldība, lai kontrolētu rindas garumu ar dažādiem algoritmiem [3], [2], [7].

Pētījumi parāda, ka tīkla trafika Hersta parametrs ir atkarīgs no lietotāja, viņa vajadzībām un laika sadalījuma, kuru viņš patērē tīklā. Ir mēģināts noskaidrot, vai dažādās dienās Hersta parametrs ir prognozējams pēc iepriekšējām dienām, piemēram, darbā [13] tika pētītas interneta aiztures. Pētījuma rezultāti parāda, ka tāds periodiskums patiešām eksistē, turklāt ir stipri izteikta Hersta parametra atšķirība dienas un nakts laikā.

Apkopojot visu informāciju, saprotams, ka veivletu transformācijas paņēmieni atver plašas iespējas tīklu trafika analīzē un dod iespēju novērtēt Hersta parametru, veikt trafika klasifikāciju (tajā skaitā, izmantojot novērtēto Hersta parametru), prognozēt tīkla trafiku [29]. Turklāt diskrēto veivletu transformāciju pielieto arī citos uzdevumos, kas ir saistīti ar tīkliem – gan ar vadu tīkliem, gan ar bezvadu tīkliem. Piemēram, ir piedāvāts algoritms, kas var atklāt *WPS* uzbrukumus bezvadu tīklā [23]. Pielietojot diskrēto veivletu transformāciju ar neironu tīkliem [8], ir piedāvāts arī prognozēt nepieciešamo resursu apjomu mobilajos *ad-hoc* tīklos.

Kopumā literatūras analīze parāda, ka trafika sevlīdzīgums ir joprojām aktuālā tēma un diskrēto veivletu transformāciju var pielietot daudzajos uzdevumos tāda trafika klasificēšana un kontrolē.

1.2. Darba mērķi

Darba pamatmērķis ir adaptīvi veikt trafika apstrādi saskaņā ar sevlīdzīguma parametra mērījumiem pie dažādiem tīkla apstrādes mezgla parametriem. Mērķa sasniegšanai var izvirzīt sekojošus uzdevumus:

1. Izpētīt reāllaika diskrētās veivletu transformācijas realizēšanas paņēmienus un realizēt šo transformāciju ar mērķi veikt parametru novērtēšanu;
2. Izveidot sevlīdzīguma parametra novērtēšanas bloku, ar kuru var noteikt trafika sevlīdzīguma pakāpi un mainīt tīkla apstrādes mezgla parametrus;
3. Izpētīt tīkla apstrādes mezgla buferatmiņas apjoma ierobežojuma ietekmi uz sevlīdzīgā trafika pakešu zudumu varbūtību dažādām sevlīdzīguma parametra un noslodzes koeficienta vērtībām;
4. Veikt daudzparametru optimizāciju, ievērojot reālās kanāla caurlaides spējas un buferatmiņas izmaksas, ar dinamiskās programmēšanas paņēmieni.

1.3. Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Veicot nostādīto uzdevumu izpēti un risināšanu, tika iegūti šādi rezultāti, kas nebija vēl atspoguļoti literatūrā:

1. Promocijas darbā tika veikta diskrētās veivletu transformācijas algoritma reāllaika realizācija ar filtru bankām augstlīmeņa programmēšanas valodā (dotajā promocijas darbā C++). Tās galvenā atšķirība no eksistējošajiem risinājumiem ir tāda, ka nav piesaistes pie aparātūras realizācijas un nenotiek iedalīšana segmentos, kā tas ir eksistējošajām algoritmu programmas realizācijām;
2. Uz augstāk minētās realizācijas bāzes tika realizēts algoritms procesa (kā skaitļu secības) sevlīdzīguma parametra novērtēšanai, kurš apstrādā katru ieejas procesa nolasi un atšķirībā no eksistējošajiem risinājumiem var būt pielietojams tīkla maršrutētājos trafika sevlīdzīguma parametra novērtēšanai;
3. Simulāciju kopuma rezultāti parāda, ka sevlīdzīguma parametra novērtēšanas precizitāte ir atkarīga ne tikai no diskrētās veivletu transformācijas mērogu skaita, kā tas ir aprakstīts literatūrā, bet arī no pašas novērtējamā parametra vērtības.
4. Uzkrāti un izanalizēti simulāciju dati par sevlīdzīgo trafiku dažādām Hersta parametra, noslodzes koeficienta, buferatmiņas apjoma, diskrētās veivletu transformācijas mērogu skaita/segmenta garuma vērtībām. Šie simulāciju rezultāti var būt pielietojami adaptīvās trafika kontroles vai resursu sadalīšanas shēmas realizēšanai tīkla maršrutētājos.

1.4. Aizstāvamās tēzes

Promocijas darba aizstāvēšanai tiek izvirzītas šādas tēzes:

1. Diskrētās veivletu transformācijas decimācijas procedūrā nepāra numuru koeficientu atstāšana samazina rekonstruējamā signāla laika aizturi, veicot inverso veivletu transformāciju;
2. Hersta parametra novērtēšanā ar diskrēto veivletu transformāciju eksistē optimālais mērogu skaits, kurš ir atkarīgs no mērītā Hersta parametra lieluma un veivletu transformācijas uzdotā maksimālā mērogu skaita;
3. Trafikam, kura Hersta parametrs $H = 0,8$, piemīt mazākā zudumu varbūtība un zemākā novērtēšanas kļūda, salīdzinot ar trafikiem, kuriem ir atšķirīgas Hersta parametra vērtības.

1.5. Pētījumu metodika

Uztādīto uzdevumu risināšanai ir jāizmanto dažādu metodiku kopums, kurš iekļauj:

- literatūras apskatu, lai dziļāk izpētītu problemātiku, noskaidrot eksistējošos risinājumus un noteikt mazāk izpētītus jautājumus;
- teorētisko analīzi – eksperimentālo vai simulācijas datu pamatošanai, novērojumu cēloņu noteikšanai un paskaidrošanai, likumsakarību meklēšanai rezultātos;
- datormodelēšanu – imitācijas modeļu veidošanai un izpētei, atkārtojot tos pie dažādām modeļa parametra vērtībām un apkopojot rezultātus. Modelēšana tika veikta *Matlab* un *Simulink* vidēs;
- mērījumu veikšanu – ar mērķi novērtēt algoritmu skaitļošanas efektivitāti un trafika parametru novērtēšanas kļūdas;
- daudzparametru optimizāciju – kompromisa meklēšanai, veidojot tīkla apstrādes mezgla resursu sadalīšanu sevlīdzīgā trafika apstākļos pie uzdotajiem ierobežojumiem un ievērojot kopējās izmaksas.

1.6. Darba praktiskais pielietojums

Darbā tika izstrādāti algoritmi mikroprocesoru/mikrokontrolieru sistēmām, kas veic diskrēto veivletu transformāciju ar filtru bankām reāllaikā un novērtē pēc iegūtajiem transformācijas koeficientiem procesa sevlīdzīguma mēru – Hersta parametru. Tādus algoritmus var realizēt maršrutētājos, lai novērtētu ienākošā tīkla trafika parametrus ar mērķi klasificēt dažādus trafiklus un apkalpot šīs dažādas klases ar dažādiem *QoS* parametriem. Diskrētās veivletu transformācijas algoritms var būt pielietojams arī citos uzdevumos, kas nav saistīti ar trafika pētījumiem un kur ir jāveic transformācija pēc iespējas īsākā laika intervālā.

1.7. Darba rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie zinātniskie rezultāti tika prezentēti šādās starptautiskajās zinātniskajās konferencēs:

1. The 16th International Conference of ELECTRONICS, Palanga, Lithuania, 2012;
2. The 5th International Conference on Information Systems and Technologies, Istanbul, Turkey, 2015;
3. The 7th International Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, Riga, Latvia, 2015;
4. Advances in Wireless and Optical Communications, RTUWO'2015, Riga, Latvia, 2015;
5. The 3rd IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering AIEEE'2015, Riga, Latvia, 2015.

Promocijas darbā aprakstītie rezultāti tika publicēti šādās zinātniskās publikācijās dažādos izdevumos:

1. Grabs, E., Sarkovskis, S. Real-Time Estimation of Traffic Self-Similarity Parameter in Simulink with Wavelet Transform. Electronics and Electrical Engineering, 2013, vol. 9, no. 3, pp. 88–91;
2. Asars, A., Grabs, E., Petersons, E. Analysis of Wavelet Estimation of Self-Similar Traffic Parameters in the Simulink Model. Automatic Control and Computer Sciences, 2013, vol. 47, no. 3, pp. 132–138;
3. Grabs, E., Petersons E., Optimal Strategy Modelling for Routers Resources Allocation in Self-Similar Traffic Environment. 7-th International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks Proceedings, Latvia, Riga, 2015, pp. 70–74*;
4. Bogdanovs, N., Grabs, E., Petersons, E. Software Implementation of Real-time Discrete Wavelet Transform Algorithm with Filter Banks for Network Traffic Parameters Estimation. The 5th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST2015) Istanbul, Turkey, 21–23 March 2015 Proceedings, 2015, pp. 1–7;
5. Grabs. E., Petersons, E. Hurst Parameter Estimation with Wavelet Transform by Filter Banks for Matlab Generated Traffic. Automatic Control and Computer Sciences, 2015, vol. 49, no. 5, pp. 286–292;
6. Grabs, E., Petersons, E. Software Implementation of Real-time Hurst Parameter Estimator Algorithm with Filter Banks. Advances in Wireless and Optical Communications 2015, Latvia, Riga, 2015, pp. 78–81*;

7. Grabs, E., Petersons, E. Analysis of Self-similar Traffic Parameters for Network Performance Improvement with Real-time Discrete Wavelet Transform. Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE'2015, Latvia, Riga, 2015, pp. 1–6*;
8. Асарс, А., Грабс Э., Петерсонс Э. Анализ Вейвлет-Оценивания Параметров Самоподобного Трафика Модели Simulink. Автоматика и Вычислительная Техника, 2013, vol. 47, no. 3, с. 28–36**;
9. Граб, Э., Петерсонс Э. Оценка Параметра Херста с Помощью Вейвлет-Преобразования и Банка Фильтров для Генерированного в Среде Matlab Трафика. Автоматика и Вычислительная Техника, 2015, vol. 49, no. 5, с. 47–56**.

* Indeksēšana *IEEEExplore* datubāzē.

** Publicēts krievu valodā, tulkojums angļu valodā ir 2. un 5. attiecīgi.

Promocijas darba rezultāti tika izmantoti šādā projektā: Valsts pētījumu programma: “INOVATĪVO DAUDZFUNKCIONĀLO MATERIĀLU, SIGNĀLAPSTRĀDES UN INFORMĀTIKAS TEHNOLOĢIJU IZSTRĀDE KONKURĒTSPĒJĪGIEM ZINĀTŅU IETILPĪGIEM PRODUKTIEM” Projekts Nr. 2: “Inovatīvas signālapstrādes tehnoloģijas viedu un efektīvu elektronisko sistēmu radīšanai”.

1.8. Darba struktūra

Promocijas darba materiāls ir izklāstīts četrās nodaļās.

Pirmajā nodaļā ir sniegts teorētiskais apskats par trafika sevlīdzīgumu datortīklos, tā ietekmi un rašanās cēloņiem. Nodaļa satur literatūras apskatu, kurā ir izpētīts esošais paveiktais darbs trafika analizē, sevlīdzīguma mērīšanā un izmantošanā, kā arī diskrētās veivletu transformācijas pielietošana tīkla trafikam. Ir aprakstīti diskrētās veivletu analīzes pamati. Nodaļu noslēdz sevlīdzīgā trafika rindošanas modeļa analīze *Simulink* vidē ar sevlīdzīguma parametra novērtēšanas bloku.

Otrā nodaļā ir veltīta diskrētās veivletu transformācijas praktiskās realizācijas jautājumiem augstā līmeņa programmēšanas valodā C++. Ir veikts literatūras apskats, kas pamato tādu nepieciešamību. Piedāvātas vairākas realizācijas tiešās un inversās diskrētās veivletu transformācijas realizācijas algoritmiem, izmantojot filtru bankas: tiešā, polifāzes un kāpņveida filtru struktūra.

Trešajā nodaļā ir izpētīta sevlīdzīguma (Hersta) parametra novērtēšana ar diskrēto veivletu transformāciju un tādas novērtēšanas precizitāte. Tika veikta simulāciju sērija un tās rezultāti tika apkopoti tabulu veidā. Izpētītas dažādas likumsakarības, pētot nepieciešamo mērogu skaitu un analizējamā segmenta garumu. Nodaļu noslēdz sevlīdzīguma parametra novērtēšanas mezgla algoritms ar diskrētās veivletu transformācijas filtru banku pielietošanu un tā realizācija C++ programmēšanas valodā.

Ceturtajā nodaļā ir veikta simulāciju sērija, kurā tika pētīta sevlīdzīguma parametra ietekme uz tīkla apstrādes mezgla buferatmiņas apjomu un pakešu zudumu varbūtību. Nodaļa ir noslēgta ar rindošanas sistēmas optimizācijas uzdevuma risināšanu, izmantojot dinamiskās programmēšanas paņēmieni ar mērķi samazināt kopējās izmaksas uzdotās pakešu zudumu varbūtības sasniegšanai dažādām sevlīdzīguma parametra vērtībām.

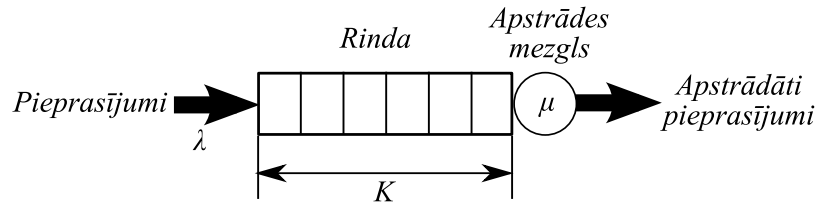
Promocijas darba nobeigumā ir apkopoti promocijas darba galvenie rezultāti un secinājumi. Pielikumos ir pievienoti ar darba izklāstu saistītie modeļošanas rezultāti un algoritmu realizācijas kodi.

2. Promocijas darba detalizētais apraksts

2.1. Sevlīdzīgā trafika modelis un diskrētā veivletu transformācija

Datortīklu sfērā bieži nepieciešams prognozēt sistēmas noteikto izmaiņu rezultātus, piemēram, noslodzes palielināšanu. Citos gadījumos nepieciešams izveidot datortīkla projektu pēc noteiktām prasībām. Visos gadījumos visvairāk interesē tieši sistēmas veiktspēja – atkarībā no konkrētā uzdevuma runa var būt par reakcijas laiku, caurlaides spēju vai citiem parametriem. Lai novērtētu sistēmas veiktspēju, jālieto prognozēšanas mehānismus, un tādu problēmu risināšanai var izmantot analītiskos modeļus no rindošanas teorijas [35]. Jāatzīmē, ka pati rindošanas teorijas matemātiskā sastāvdaļa ir sarežģīta, taču šīs teorijas praktiskais pielietojums daudzos gadījumos ir pietiekami vienkāršs.

Rindu modelēšanā galveno pieņēmumu apzīmēšanai lieto tā saucamo **Kendala notācību** ar šādu veidu: $X/Y/N/K$, kur X uzdod sadalījumu starp pieprasījumu intervāliem, Y uzdod apstrādes laika sadalījumu, N – apstrādes mezglu skaitu un K – buferatmiņas apjomu, kas nosaka maksimālo rindas garumu. Tādā veidā modeli $P/M/1/K$ veido viens apstrādes mezgls, laika intervāliem starp pieprasījumiem ir Pareto sadalījums, apstrādes laikam ir eksponenciāls sadalījums un buferatmiņas apjoms sastāda K vienības². Tāda visvienkāršākā modeļa struktūra ir parādīta 1.1. att.



1.1. att. Vienkāršāka rindošanas sistēma ar vienu apstrādes mezglu.

Lai ģenerētu sevlīdzīgo trafiku simulācijās, ir jāpārreķina modeļa parametri – pieprasījumu intensitāte λ un sevlīdzīguma parametrs H Pareto procesa varbūtību blīvuma funkcijā:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\beta}{x} \right)^{\alpha+1}, \quad (1.1)$$

kur sadalījuma parametri ir nosakāmi šādi:

$$\alpha = 3 - 2H, \quad (1.2)$$

$$\beta = \frac{\alpha - 1}{\alpha \lambda}, \quad 1 \leq \alpha \leq 2. \quad (1.3)$$

Saskaņā ar 1.1. att. parādīto shēmu tika izveidots *Simulink* modelis, kurā tika izpētīts rindas

²Piemēram, tīkla trafika gadījumā par tādu vienību var uzskatīt paketi.

garums un tā vidējā vērtība pie dažādām sevlīdzīguma (Hersta) parametra H un noslodzes koeficienta ρ vērtībām. Kopējais pieprasījumu skaits rindošanas sistēmā visos eksperimentos sasniedza apmēram $2 \cdot 10^6$ vienības. Sevlīdzīguma parametra vērtība tika mainīta robežās no $H = 0,5$ līdz $H = 0,9$ ar soli 0,1 un pēdējo vērtību $H = 0,99$, kas atbilst procesam ar visaugstāko sevlīdzīgumu.

Modelēšanas rezultātā tika uzkrāti *Simulink* dati katrai noslodzes koeficienta ρ vērtībai no 0,5 līdz 1,0 visām H parametra vērtībām. Šīs vērtības ir apkopotas tabulās, kuru piemērs ir dots 1.1. tabulā:

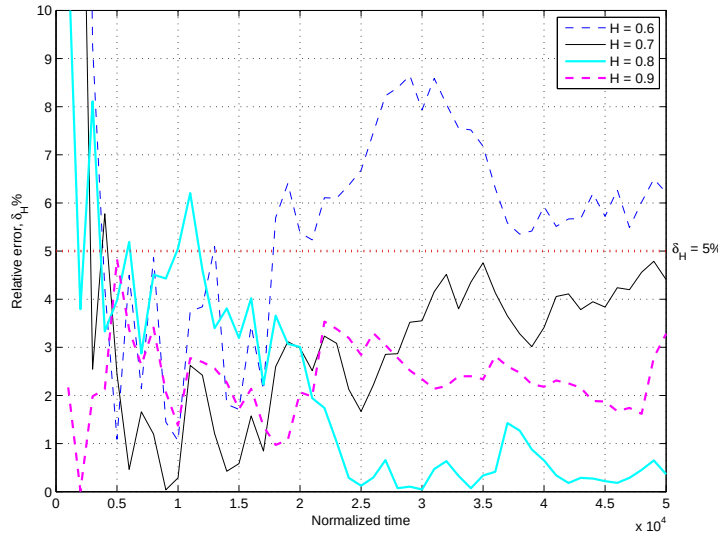
1.1. tabula. Rindas garuma K salīdzinājums pie noslodzes koeficienta $\rho = 0,5$.

	<i>Simulink</i>	<i>GPSS</i>	Vid. vērt.	Aprēķins
$H = 0,5$	0,29 (15)	0,29 (12)	0,39	1,00
$H = 0,6$	0,35 (18)	0,35 (15)	0,5	1,19
$H = 0,7$	0,49 (21)	0,49 (17)	0,73	1,59
$H = 0,8$	0,88 (28)	0,87 (25)	1,41	2,83
$H = 0,9$	4,02 (86)	3,94 (81)	7,08	16,00
$H = 0,99$	$2,46 \cdot 10^5$ ($4,41 \cdot 10^5$)	$9,91 \cdot 10^5$ ($2,004 \cdot 10^6$)	$2,38 \cdot 10^5$	$5,63 \cdot 10^{14}$

Rekomendētais buferatmiņas apjoms K_{buf} , kas aprēķināts saskaņā ar (1.4) no [35]:

$$K_{\text{buf}} = \frac{\rho^{\frac{1}{2(1-H)}}}{(1-\rho)^{\frac{H}{(1-H)}}}. \quad (1.4)$$

No rezultātu tabulām var konstatēt, ka (1.4) analītiskā izteiksme nevar būt lietojama, jo šī formula nav atkarīga no pakešu zudumu varbūtības P_{loss} , no kuras ir atkarīgs buferatmiņas apjoms.



1.2. att. Sevlīdzīguma parametra novērtējumu $E[\hat{H}[n]]$ relatīvās kļūdas procentos attiecībā pret avotā uzstādīto vērtību H pie noslodzes koeficienta $\rho = 0,8$.

Izveidotais modelis tālāk tika papildināts ar Hersta parametra novērtēšanas bloku, kurš ir aprakstīts 3. nodaļā. Šis mezgls novērtē momentānu Hersta parametra vērtību $\hat{H}$ un vidējo vērtību $E[\hat{H}]$. Vidējai vērtībai tika novērtēta relatīvā kļūda:

$$\delta\hat{H} = \frac{|\hat{H}_{\text{avg}}[n] - H|}{H} \cdot 100, \%. \quad (1.5)$$

Aprēķinātas pēc (1.5), kļūdas visām $H = \{0, 6, 0, 7, 0, 8, 0, 9\}$ vērtībām ir parādītas 1.2.att. kopā ar 5 % intervālu. Kopumā var konstatēt, ka pie zemākām H parametra vērtībām novērtējumu $\hat{H}_{\text{avg}}[n]$ deviācija no uzstādītās vērtības ir augstāka, taču visos gadījumos sevlīdzīguma parametra novērtējums tiecās pie uzstādītās vērtības pēc noteikta laika intervāla. Izskatās, ka šis laika intervāls nav īpaši atkarīgs no sevlīdzīguma parametra H vērtības.

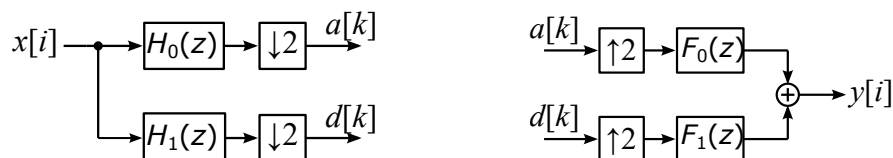
2.2. Reāllaika diskrētā veivletu transformācija ar filtru bankām

Literatūras analīze parādīja, ka daudzmērogu diskrētās veivletu transformācijas realizācija reāllaikā nav pietiekami labi apskatīta. Nekur neizdevās atrast šādu algoritmu, lai viņu varētu lietot sevlīdzīguma parametra novērtēšanai reāllaikā. Šeit ir jāatzīmē, ka interesē tieši tāds veivletu transformācijas algoritms, kurš apstrādātu katru nolasi visos mērogos, nevis uzkrātu datu segmentu un apstrādātu to tālāk.

Tieši šādā veidā pārsvarā literatūrā ir sastopams tiešās un inversās diskrētās veivletu transformācijas algoritms – pēc daudzajos teorētiskajos līdzekļos (piem., [28]) labi aprakstīta, t.s., Malata piramidālā filtru bankas algoritma [19]. Saskaņā ar šo algoritmu tiek uzkrāts datu segments, kas tālāk tiek apstrādāts ar $j = 1$ mēroga filtru banku (viss segments), pēc tam iegūtie aproksimācijas koeficienti tiek apstrādāti ar $j = 2$ mēroga filtru banku utt. Šādu pieeju veiksmīgi izmanto pat reāllaika apstrādē, piemēram, maģistra darbā [5] audio signālu reāllaika apstrādei. Citos darbos tiek apskatīta iedalīšana segmentos – ar pārklāšanās, lai samazinātu segmentu robežas efektu (piem., [25]).

Tomēr, ja veivletu transformācija tiek aprēķināta ar filtru banku pieeju (skat. 2.1a. att.), reāli pirmos rezultātus varētu sākt izmantot pirms visa segmenta apstrādes, ja realizēt šo filtru darbību tiešajā veidā laikā, nerēķinot diskrēto konvolūciju no visiem datiem. Tas ir iespējams, jo pati transformācijas procedūra, pēc savas būtības, ir nekas cits kā ciparu filtrācija, kuru ir iespējams veikt reāllaikā. Turklāt veivletu transformācijas gadījumā ļoti bieži tiek lietoti nerekursīvie ciparu filtri, kuru impulsa reakcijai ir ierobežots garums, tātad arī laika aizture līdz pirmajam rezultātam ir prognozējama un, kas ir svarīgāk, nesasniedz augstas vērtības.

2.1a. att. ir parādīta 1 mēroga diskrētā veivletu transformācija ar filtru banku. Savukārt 2.1b. att. – inversā diskrētā veivletu transformācija. Šeit $H_0(z)$ ir aproksimācijas (zemfrekvenču) filtra pārvades funkcija, bet $H_1(z)$ – detalizācijas (augstfrekvenču) filtra impulsa reakcija. Filtru izejās no ieejas signāla nolasēm $x[i]$ veidojas attiecīgi aproksimācijas koeficienti $a[k]$ un detalizācijas koeficienti $d[k]$. Lai kopējais nolašu skaits paliktu bez izmaiņām, divreiz jāsamazina katru koeficientu skaitu, ko panāk ar decimācijas operāciju ($\downarrow 2$), ar kuru no signāla tiek saglabātas tikai nepāra (vai pāra) numura nolases. No šīs izvēles ir atkarīgs transformācijas rezultāts, jo koeficientu vērtības šajos divos gadījumos sanāk atšķirīgas. Simulācijas gaitā tika noteikts, ka atstājot nepāra numura nolases un veicot rekonstruēšanu ar filtru banku, kas ir parādīta 2.1b. att., rekonstruētajam signālam ir par 1 nolasi mazāks aiztures lielums, salīdzinot ar gadījumu, kad tika saglabātas pāra numura nolases.



2.1. att. Diskrētā veivletu transformācija ar filtru banku: a) tiešā, b) inversā.

Ideālajai rekonstruēšanai $H_0(z)$ un $F_0(z)$, kā arī $H_1(z)$ un $F_1(z)$ ir jābūt savstarpēji ortogonāliem. Turklāt $H_0(z)$ un $H_1(z)$ atdala dažādas frekvenču apakšjoslas – viens filtrs ir zemajām frekvencēm ($H_0(z)$) un otrs – augstajām ($H_1(z)$). Tādā gadījumā var izteikt visu filtru pārvades funkcijas, zinot $H_0(z)$:

$$H_1(z) = z^{-N} H_0(-z^{-1}), \quad (2.1)$$

$$F_0(z) = z^{-N} H_0(z^{-1}), \quad (2.2)$$

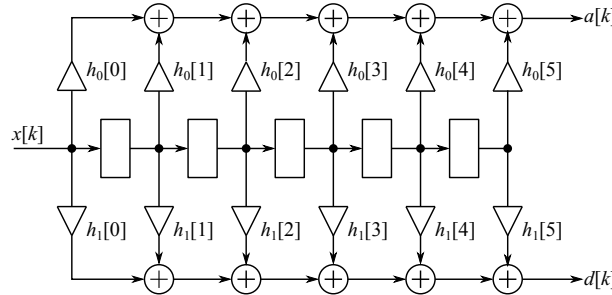
$$F_1(z) = -H_0(-z), \quad (2.3)$$

kur N ir filtra kārtā. Filtru pāris $H_0(z)$ un $H_1(z)$ veido analīzes filtru banku, kas veic signāla dekompozīciju koeficientos, savukārt filtru pāris $F_0(z)$ un $F_1(z)$ veido sintēzes filtru banku, kas veic signāla rekonstruēšanu no koeficientiem. Šajā promocijas darbā tika pielietoti Dobeši-3 diskrētie veivleti [12] kā vieni no plašāk pielietojamajiem. Izveidotajās programmās var uzdot arī citu veivletu filtru impulsa reakcijas, ja tas ir nepieciešams. Dobeši-3 diskrēto veivletu filtru bankas pārvades funkciju koeficienti ir šādi:

2.1. tabula. Dobeši-3 diskrēto veivletu filtru bankas pārvades funkciju koeficienti.

$h_0[k]$	$\{0,0352 \ -0,0854 \ -0,1350, \ 0,4599 \ 0,8069 \ 0,3327\}$
$h_1[k]$	$\{-0,3327 \ 0,8069 \ -0,4599 \ -0,1350 \ 0,0854 \ 0,0352\}$
$f_0[k]$	$\{0,3327 \ 0,8069 \ 0,4599 \ -0,1350 \ -0,0854 \ 0,0352\}$
$f_1[k]$	$\{0,0352 \ 0,0854 \ -0,1350 \ -0,4599 \ 0,8069 \ -0,3327\}$

Analīzes filtru banku veido divi *FIR* filtri, kuru impulsa reakciju koeficienti ir uzdoti ar pirmajām divām 2.1. tabulas rindinām. Sintēzes filtru banka nav nepieciešama Hersta parametra novērtēšanai, kura tiek realizēta dotā promocijas darba saturā. Ievērojot to, ka šo divu *FIR* filtru ieeja ir kopēja, var apvienot arī filtru aiztures elementus un izveidot shēmu, kas ir parādīta 2.2. att.

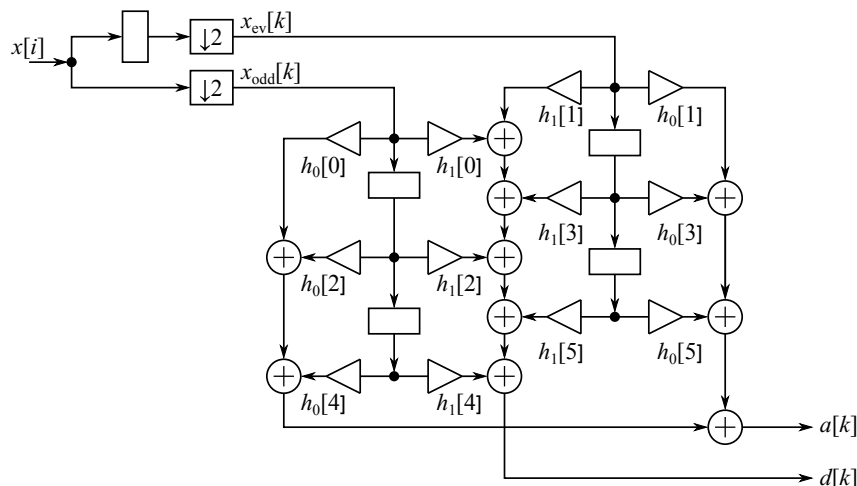


2.2. att. Ciparu filtru banka ar kopējo aiztures līniju Dobeši-3 veivletiem.

2.2. att. ir parādīta diskrētās veivletu transformācijas filtru bankas tiešā realizācija, pieņemot ka izejas koeficientiem $a[k]$ un $d[k]$ pēc filtrēšanas atsevišķi tiks veikta decimācijas operācija ($\downarrow 2$, nav norādīta attēlā). Tas ir neefektīvi, jo puse no filtrējamajām vērtībām tiek aprēķināta un ignorēta. Efektīvāks risinājums – polifāzes filtru bankas struktūra, kura ir parādīta 2.3. att.

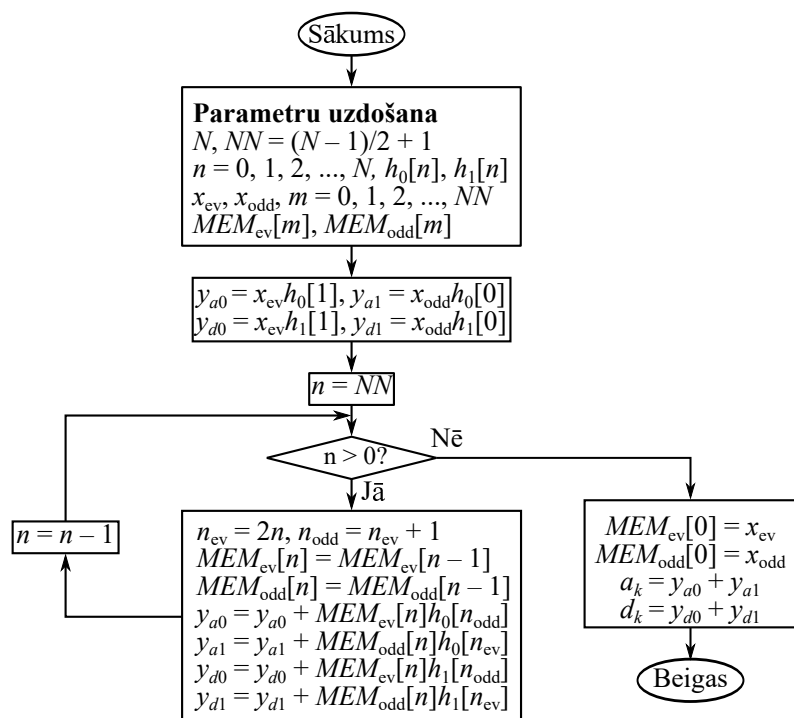
Polifāzes filtru bankā signālu sadala pāra un nepāra numura nolasēs un katru signālu filtrē ar polifāzes filtru banku. Kopējais filtrācijas aprēķinu skaits uz vienu nolasi nemainās, taču tādu nolašu skaits būs divreiz mazāks, jo pirms filtrācijas tiek veikta decimācija $\downarrow 2$ un ieejas datu apjoms samazinās divreiz.

Saskaņā ar 2.3. att. parādīto filtru bankas struktūru tika izveidots augsta līmeņa programēšanas valodas algoritms reāllaika diskrētās veivletu transformācijas veikšanai ar polifāzes filtru banku. Šis algoritms ir parādīts 2.4. att. shēmā, pieņemot, ka pēc decimācijas operācijas paliek signāla nolases ar nepāra numuriem.



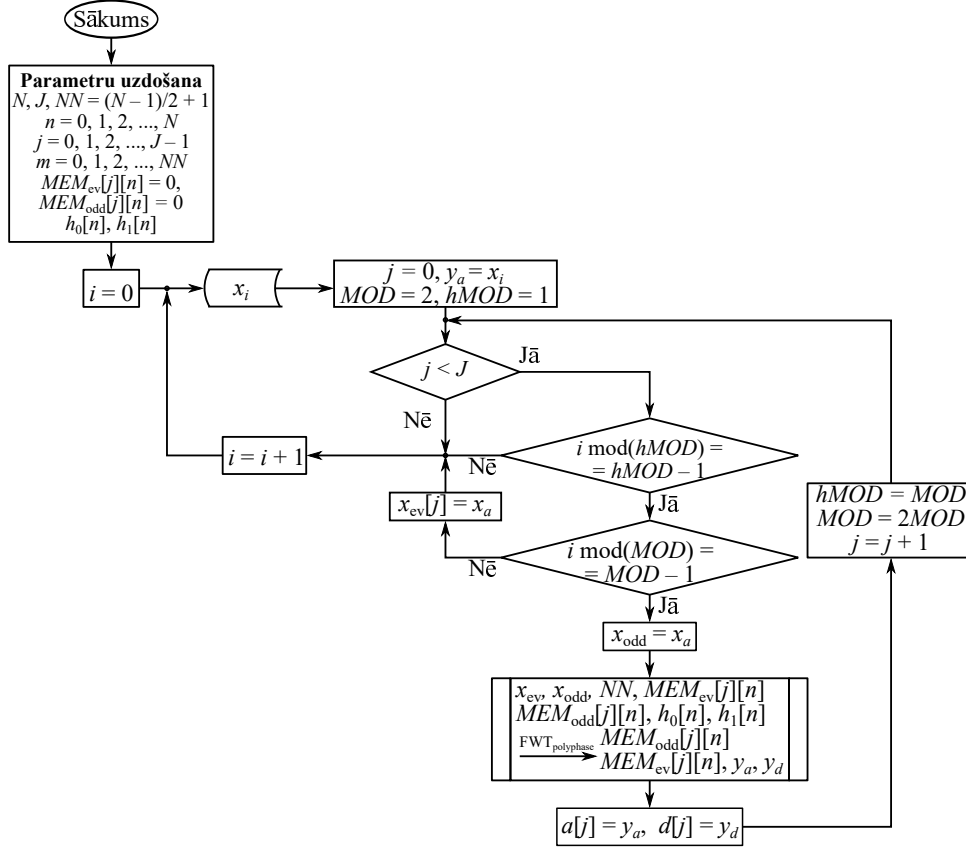
2.3. att. Filtru bankas polifāzes realizācija, kur pēc decimācijas paliek nolases ar nepārskaitļa nolašu numuriem.

2.4. att. ir parādīts algoritms viena mēroga diskrētajai veivletu transformācijai. Lai veiktu transformāciju vairākos mērogos, ir jāpadod iepriekšējā mēroga aproksimācijas koeficienti $a_{j-1}[k]$ tādas pašas filtru bankas ieejā un tās izejās tiks formēti nākamā mēroga aproksimācijas koeficienti $a_j[k]$ un detalizācijas koeficienti $d_j[k]$.



2.4. att. Polifāzes filtru bankas realizēšana nepāra numura nolasēm.

Rezultātā tika izveidots un realizēts algoritms J mērogu diskrētai veivletu transformācijai ar polifāzes filtru bankām, kurš ir parādīts 2.5. att. Šāda polifāzes struktūras realizācija strādā divreiz ātrāk nekā tiešā filtru bankas realizācija saskaņā ar 2.2. att. parādīto aproksimācijas un detalizācijas filtru pāri. Polifāzes filtru bankas realizācija tika uzlabota, pielietojot kāpnveida filtrus ar vēl augstāku veiktspēju.



2.5. att. J mērogu reāllaika ātrās diskrētās veivletu transformācijas algoritms ar polifāzes filtru banku nepārskaitļa nolasēm.

2.3. Trafika sevīdzīguma parametra novērtējums, tā kļūda un realizācija ar filtru bankām

Ļoti bieži diskrēto veivletu transformāciju veic vairākkārtīgi. Tādā gadījumā nākamās veivletu transformācijas mērogā $WT^{(j)}$ ieejas signāls ir iepriekšējās veivletu transformācijas mēroga $WT^{(j-1)}$ aproksimācijas koeficientu kopa $\{a_{j-1,k}\}$ un šo procesu var rekursīvi atkārtot vai nu līdz pieņemamam rezultātam vai arī tikmēr, kamēr aproksimācijas koeficientu kopa $\{a_{j,k}\}$ nav pārāk īsa turpmākajai dekompozīcijai. Tādā veidā pēc J mērogu diskrētās veivletu transformācijas aprēķina kopējo rezultātu veido:

- vislielākā mēroga J aproksimācijas koeficientu kopa $\{a_{J,k}\}$;
- visu mērogu detalizācijas koeficientu kopas: $\{d_{J,k}\}, \{d_{J-1,k}\}, \dots, \{d_{1,k}\}$.

Tādā veidā, diskrētās veivletu transformācijas mērogā J kopējais punktu skaits joprojām paliek vienāds ar K . Tieši tāda vairākkārtīga diskrētā veivletu transformācija ir trafika sevīdzīguma parametra H novērtēšanas pamatā: kārtējā mērogā analizējamās frekvences tiek samazinātas divas reizes. Ja analizējamais process ir sevīdzīgs, t.i., uzvedās līdzīgi dažādos laika mērogos, tad detalizācijas koeficientiem to ir jāatspoguļo.

Šis sevīdzīgums tiek atspoguļots detalizācijas koeficientu jaudā D_j , kur j ir mēroga numurs, t.i., tiešās diskrētās veivletu transformācijas līmeņa numurs. Šī jauda tiek aprēķināta saskaņā ar (3.1) un eksponenciāli pieaug katrā mērogā, pie tam pieauguma ātrums ir konstants.

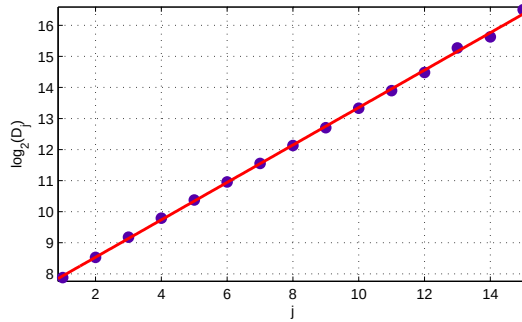
$$D_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} d_{j,k}^2, \quad (3.1)$$

kur j ir mēroga numurs, kurā tiek aprēķināta jauda D_j , $d_{j,k}$ – attiecīgā mēroga detalizācijas koeficienti d_k un n_j – tādu koeficientu skaits mērogā j .

3.1. att. ir parādīta $\log_2(D_j)$ atkarība no mēroga ar atsevišķiem punktiem, katrs no tiem atbilst detalizācijas koeficientu jaudas logaritmam mērogā j . Veicot šīs atkarības lineāro aproksimāciju, var noteikt tās slīpumu a , pēc kura, ņemot vērā, ka:

$$a = 2H - 1, \quad (3.2)$$

var izteikt sevlīdzīguma parametru H . 3.1. att. ir parādīta detalizācijas koeficientu jaudas logaritma $\log_2(D_j)$ atkarība no mēroga Pareto gadījumrakstura procesam ar sevlīdzīguma parametru $H = 0,8$. Šīs atkarības punktu lineāras aproksimācijās rezultātā tika iegūta izteiksme: $\log_2(D_j) = 0,6024j + 7,329$, pēc kuras, izmantojot slīpuma parametru $a = 0,6024$, saskaņā ar (3.2) var noteikt sevlīdzīguma parametru $\hat{H} = (a + 1)/2 = 0,8012$. Šī vērtība ir ļoti tuva uzstādītajai vērtībai $H = 0,8$.



3.1. att. Detalizācijas koeficientu jaudas logaritma $\log_2(D_j)$ atkarība no mēroga j .

Atkarības slīpuma parametra a novērtēšanai ir labi piemērota minimālo kvadrātu metode (3.3):

$$a = \frac{\sum_{j=1}^J j^2 \sum_{j=1}^J \log_2(D_j) - \sum_{j=1}^J j \sum_{j=1}^J j \log_2(D_j)}{J \sum_{j=1}^J j^2 - \left(\sum_{j=1}^J j \right)^2}, \quad (3.3)$$

kur j ir mēroga numurs, kurā tiek aprēķināta jauda D_j , bet J – tādu mērogu skaits.

Pēc aprakstītā sevlīdzīguma parametra H novērtēšanas algoritma tika izveidotas *Matlab* funkcijas, kuras veic veivletu transformāciju ar Dobeši-3 veivletiem, izmantojot filtru bankas (2.1a. att.) pieeju, kā arī funkcija Hersta parametra H novērtēšanai. Ar šo funkciju var novērtēt sevlīdzīguma parametra $\hat{H}$ vidējo vērtību, turklāt ir iespējams norādīt kopējo mērogu skaitu J , un šis parametrs tiks novērtēts visos mērogos līdz norādītajam³.

Veivletu transformācijas mērogu skaita, transformācijas loga garuma un šo parametru atkarības izpētei no trafika novērtējamās sevlīdzīguma H pakāpes *Matlab* vidē tika izveidota trafika apstrādes programma. Šī programma novērtē sevlīdzīguma parametru $\hat{H}$ un tā absolūto kļūdu $\Delta H = |\hat{H} - H|$ dažādos transformācijas loga garumos un ievērojot dažādu mērogu skaitu. Mērķis – noskaidrot, kādā mērā šie parametri ietekmē novērtēšanas precizitāti un kā šī precizitāte ir atkarīga no tiem, ja mainās iestādītā novērtējamā parametra H vērtība.

Sevlīdzīgais trafiks tika veidots kā pieprasījumu skaits laika intervālos Δt , savukārt intervāli starp pieprasījumiem tiek ģenerēti ar Pareto sadalījumu. Ja kārtējais pieprasījums pārsniegs mērījumu intervālu Δt , tas tiks uzskaitīts nākamajā mērījumu periodā. Tāds trafiks tika saglabāts

³Šeit, protams, būtu jāatzīmē, ka minimālais mērogu skaits tādai novērtēšanai ir 2, t.i., jāreķina vismaz 2 mērogu veivletu transformāciju. Tas ir pamatojams ar to, ka vienu punktu nevar aproksimēt ar lineāro funkciju.

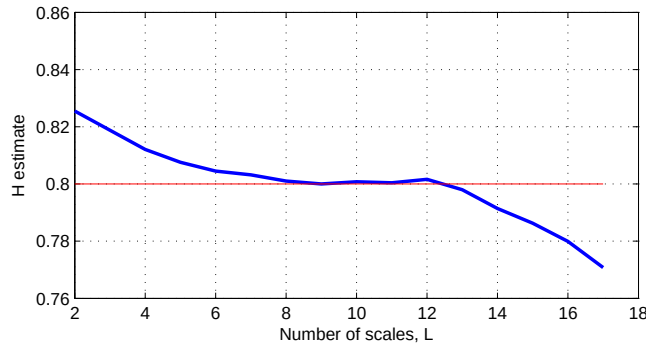
failos turpmākajai pēcapstrādei. Visās simulācijās tika izmantots trafiks ar mērījumu intervālu $\Delta t = 1$ un intensitāti $\lambda = 50$, bet trafika kopējais ilgums sastādīja $T = 2^{24} \Delta t$ vienības. Tika veikta divu eksperimentu sērija:

- trafika analīze sevlīdzīguma parametra vērtībām $0,5 < H < 0,99$ ar pieauguma soli $0,1$;
- trafika analīze sevlīdzīguma parametra vērtībām $0,8 < H < 0,99$ ar pieauguma soli $0,05$.

Trafiks tika apstrādāts segmentos, kuru garumi ir robežās no $M_{\min} = 2^{10} = 1\,024$ līdz $M_{\max} = 2^{24} = 16\,777\,216$, turklāt pēc katras segmenta garuma palielināšanas divas reizes pieaug par vienu arī maksimālais mērogu skaits.

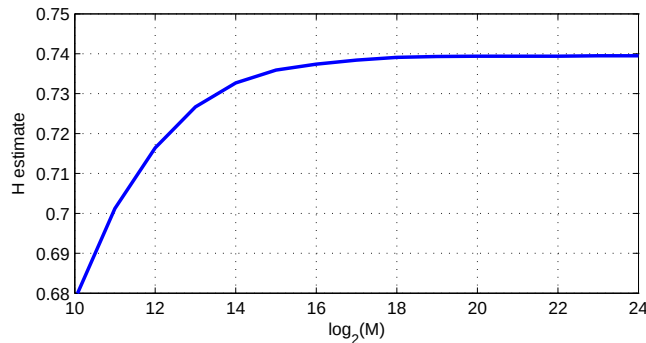
Aprakstīto eksperimentu rezultāti ir apkopoti promocijas darba pielikumos. Pēc tiem var konstruēt grafikus, kuros ir parādītas sevlīdzīguma parametra novērtējuma vidējās vērtības $\hat{H}$ un vidējā absolūtā kļūda ΔH atkarībā no mērogu skaita J pie dažādām segmenta garuma vērtībām (segmenta garums palielinās no kreisās puses uz labo, ejot no augšas uz leju).

Rezultātu analīze parādīja, ka ir sarežģīti precīzi novērtēt sevlīdzīguma parametru zemās (piem., $H = 0,5$) un augstās vērtības ($H > 0,9$), savukārt vērtības $H = 0,8$ (3.2. att.) robežās var panākt ļoti augstu precizitāti.



3.2. att. $\hat{H}$ novērtējums pie $H = 0,8$ un segmenta garuma $M = 2^{21}$.

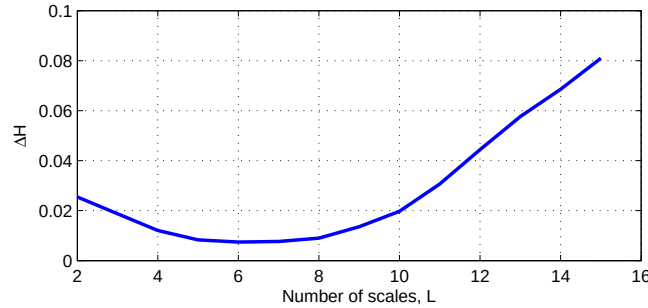
Interesanti, ka vērtībām $0,7 < H < 0,8$ novērojamas optimālās mērogu vērtības, turklāt $H = 0,8$ gadījumā šo optimālo vērtību intervāls ir plašāks (skat. 3.2. att.). Tas liecina par to, ka izmantot maksimālo mērogu skaitu, t.i., aprēķināt diskrēto veivletu transformāciju tādā mērogu skaitā, nav vienmēr vislabākais risinājums. Tomēr, no otras puses, segmenta garuma palielināšanās gadījumā ir jāizmanto lielākais mērogu skaits precizitātes uzlabošanai.



3.3. att. Sevlīdzīguma parametra novērtējums $\hat{H}$ atkarībā no segmenta garuma logaritma pie $H = 0,7$ un mērogu skaita $J = 7$.

Tālāk tiek apskatīts gadījums, kad mērogu skaits J paliek konstants dažādos segmenta garumos. Tas nozīmē, ka, palielinot segmenta garumu M , jaunie mērogi tiek ignorēti un iepriekšējais mērogu skaits tiek atstāts. Ļoti interesanti, ka tādā gadījumā neatkarībā no iestādītā H

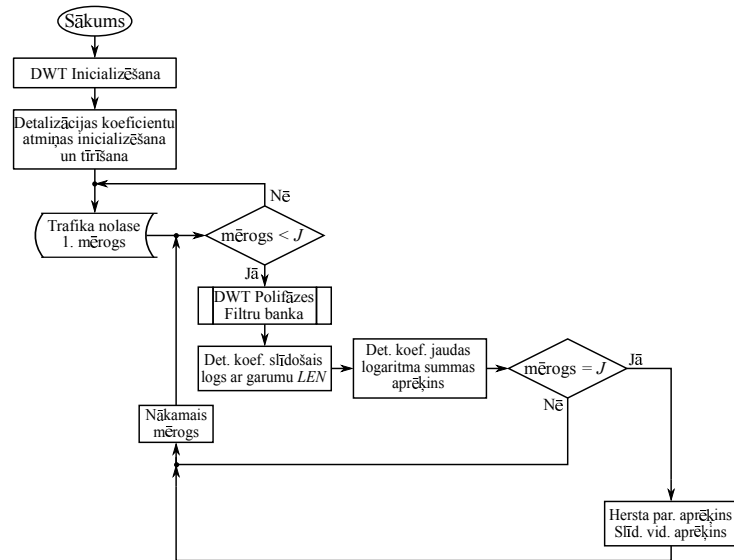
parametra un segmenta garuma, t.i., visos gadījumos bez izņēmumiem, rezultējošās atkarības raksturs ir tāds, kā parādīts 3.3. att. Tas nozīmē, ka katrā mērogā pastāv precizitātes ierobežojums un, lai palielinātu precizitāti, nepietiek tikai ar segmenta pagarināšanu, bet jāievēro lielāks mērogu skaits.



3.4. att. Vidējā absolūtā kļūda ΔH pie $H = 0,8$ un segmenta garuma $M = 2^{15}$.

Analizējot sevlīdzīguma parametra $\hat{H}$ novērtējuma vidējo kļūdu ΔH , var secināt, ka, sākot ar noteikto segmenta garumu M_0 , vērtības $H = 0,8$ kļūdas atkarībai no mērogu skaita J ir minimums⁴ (skat. 3.4. att.), turklāt šāds atkarības raksturs saglabājas visām segmenta garuma vērtībām $M > M_0$. Vērtībām $H < 0,8$ kļūdas atkarībai ir kopumā dilstošs raksturs, turpretī vērtībām $H > 0,8$ kļūdas atkarības raksturs pārsvarā ir augošs.

Vienkāršotā Hersta parametra novērtēšanas algoritma shēma ir parādīta 3.5. att. Par pamatu tiek paņemts diskrētās daudzmērogu veivletu transformācijas algoritms no 2.5. att. Šajā realizācijā tika izmantota polifāzes filtru banka, taču nepieciešamības gadījumā to var viegli pārveidot arī par kāpņveida filtru banku.



3.5. att. Hersta parametra novērtēšanas algoritma ar polifāzes filtru banku vienkāršotā shēma.

Parādītais 3.5. att. algoritms reāllaikā uz katru trafika nolasi (piemēram, tas varētu būt pakešu skaits laika vienībā) veic diskrēto veivletu transformāciju un saglabā katrā mērogā j detalizācijas koeficientu vidējās jaudas logaritmu. Vidējā vērtība tiek aprēķināta pēc noteiktā detalizācijas koeficientu skaita LEN vienā mērogā. Kā tika iepriekš parādīts, mērogu skaitam J ir liela ietekme uz Hersta parametra novērtēšanas precizitāti un šis lielums algoritmā var būt uzdots un pat mainīts izpildes gaitā, lai pieskaņotos trafika Hersta parametram. Ja tika noteikts

⁴Trafiks ar $H = 0,8$ tika ģenerēts divas reizes, un abās reizēs rezultāti bija analogiski, pat minimālais segmenta garums M_0 šajos eksperimentos neatšķiras.

detalizācijas koeficientu vidējās jaudas logaritms, t.i., algoritms apstrādāja pēdējo analizējamo mērogu $j = J$, tad tiek aprēķināta Hersta parametra vērtība. Lai to izdarītu, kā tika iepriekš minēts šajā nodaļā, var pielietot minimālo kvadrātu metodi saskaņā ar (3.3), lai novērtētu slīpumu vidējās jaudas logaritma atkarībai no mēroga numura.

Bez Hersta parametra momentānās vērtības tiek novērtēta arī vidējā vērtība ar slidošo logu, kura garums sastāda AVG_LEN , saskaņā ar izteiksmi

$$E[\hat{H}] = \frac{AVG\_LEN \cdot E[\hat{H}] + \hat{H}[k] - \hat{H}[k-1]}{AVG\_LEN}, \quad (3.4)$$

kur $\hat{H}$ ir Hersta parametra novērtējums, bet $E[\hat{H}]$ – šī parametra novērtējuma vidējā vērtība. Šāda Hersta parametra momentānās un vidējās vērtības aprēķināšana tiek atkārtota katrai trafika nolasei un šie divi lielumi arī ir gala mērķis izveidotajam novērtēšanas elementam.

3.1. tabula. Sevlīdzīguma parametra novērtējums dažādiem mērogiem j , $J_{\max} = 8$.

Mērogs, j	Izpildes laiks	DWT izpildes laiks
2	0,021 s	0,0197 s
3	0,020 s	0,0198 s
4	0,020 s	0,0195 s
5	0,020 s	0,0203 s
6	0,021 s	0,0198 s
7	0,021 s	0,0200 s
8	0,021 s	0,0204 s

3.1. tabulas dati tika iegūti personālajam datoram ar *Core i5-4690* procesoru, kura takts frekvence ir 3.2 GHz. Kā var redzēt no rezultātiem, salīdzinājumā ar vienkāršo diskrētās veivletu transformācijas aprēķinu izpildes laiks palielinās neievērojami.

Tomēr šeit ir jāreķinās ar to ka trafika vērtības tika nolasītas no cietā diska nesēja, kura veikspēja ir daudz zemāka par procesora veikspēju (dators bija aprīkots ar ātrdarbīgo *SSD* disku). Lai novērtētu paša algoritma veikspēju un laika zudumus, kuri patērēti ar diska nolasīšanas operācijām, tika veikta diskrētu veivletu transformācija no nolases numura i (mainīgais reģistru atmiņā) un novērtēts tāda “trafika” sevlīdzīguma koeficients. Rezultāti ir šādi:

- Diskrētās veivletu transformācijas izpildes laiks sastāda 0,000239273 s;
- Hersta parametra novērtēšanas izpildes laiks⁵ sastāda 0,000564183 s.

Rezultāti parāda, ka kopumā Hersta parametra novērtēšanai ir nepieciešams gandrīz tāds pats laiks, kāds nepieciešams diskrētās veivletu transformācijas veikšanai ar polifāzes filtru banku.

2.4. Pakešu zudumu varbūtības analīze ģenerētajam sevlīdzīgajam trafikam $P/M/1/K$ un $G/M/1/K$ simulācijas modeļiem

Šajā nodaļā aprakstīti vairāki eksperimenti, kuros tika veiktas simulācijas ar trafiku pie dažādām noslodzes koeficientu ρ un Hersta parametra H vērtībām. Galvenais eksperimentu sērijas mērķis ir noskaidrot $G/M/1$ un $P/M/1$ modeļa vidējo $E[R]$ un maksimālo $\max(R)$ rindas garumu, salīdzināt šos divus lielumus un izpētīt to atkarību no Hersta parametra H vērtības. Turpmāk

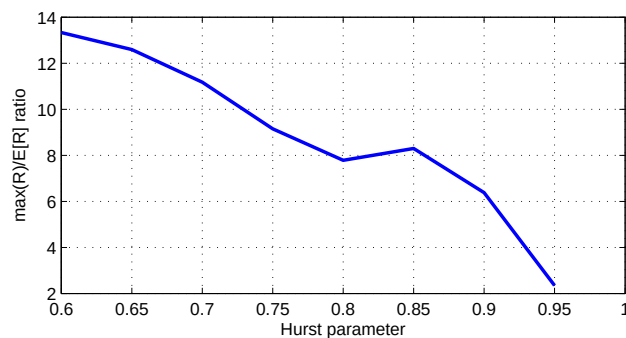
⁵Kurš, acīmredzami, iekļauj sevī arī diskrētās veivletu transformācijas izpildes laiku kā sastāvdaļu.

šīs iegūtās vidējā rindas garuma vērtības $E[R]$ tiks izmantotas $G/M/1/K$ un $P/M/1/K$ modeļos ar ierobežotu buferatmiņu. Buferatmiņas apjomu ierobežo vidējais rindas garums $E[R]$ vai tā kārtnie skaitļi, piemēram, trīskārtējais rindas vidējais garums $3E[R]$ utt. Simulācijas procesā tiek novērtēta pakešu zudumu varbūtība P_{loss} un pēc eksperimentiem tiek analizēta tās atkarība no Hersta parametra H .

Izmantojot *Matlab Simulink* simulācijas rīku, tika izveidots $P/M/1$ modelis ar neierobežotu sistēmas buferatmiņas apjomu. Izveidotā modeļa parametri ir šādi:

- Trafika intensitāte $\lambda = 100$ paketes/s jeb vidējais laika intervāls starp pieprasījumiem ir $T_a = 1/120$ s. Intervāli sadalīti pēc Pareto likuma.
- Trafika sevlīdzīguma (Hersta) parametrs H tiek uzstādīts robežās no 0,6 līdz 0,95, mainot to katrā simulācijā ar soli 0,05.
- Kopējais pieprasījumu skaits simulācijā sastāda 1000 000.
- Apstrādes mezgla veikspēja $\mu = 125$ paketes/s jeb vidējais apstrādes laiks sastāda $T_s = 1/125$ s. Apstrādes intervāli sadalīti pēc eksponenciālā likuma.

Tādā veidā apskatāmais modelis tika pētīts pie noslodzes koeficienta $\rho = \lambda/\mu = 0,8$ vērtības. Šāda vērtība tika izvēlēta tāpēc, ka tā atbilst reālo sistēmu noslodzes koeficientu intervāla viduspunktam. Noslodzes koeficientam reālās sistēmās, lai tās strādātu efektīvi, ir jābūt $0,7 \leq \rho \leq 0,9$ robežās. Rezultātā pie katras Hersta parametra H vērtības tika nomērīts vidējais rindas garums $E[R]$ un maksimālais rindas garums $\max(R)$. Lai uzzinātu, cik vienā vai otrā Hersta parametra vērtībā vidējais rindas garums $E[R]$ pārsniedz maksimālo $\max(H)$ un noskaidrotu, vai šī attiecība ir atkarīga no Hersta parametra, tika konstruēts tādas attiecības grafiks atkarībā no Hersta parametra, kurš ir parādīts 4.1. att.



4.1. att. *GPSS P/M/1* modeļa maksimālā rindas garuma $\max(R)$ attiecība pret vidējo rindas garumu $E[R]$.

4.1. att. parādītā attiecība atkarībā no Hersta parametra samazinās pie augstākām Hersta parametra vērtībām. No tā var secināt, ka jo augstāka ir trafika sevlīdzīguma pakāpe, jo tuvāks ir rindas vidējais garums maksimālajam. Tomēr šī atkarība nav monotona, kā var redzēt $H = 0,8$ parametra apgabalā, līknes raksturs mainās un attiecība sāk atkal pieaugt.

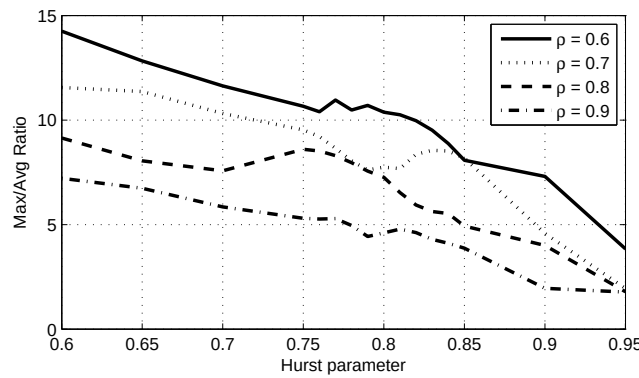
Līdzīgie rezultāti tika iegūti trīs trafika ģenerācijas modeļiem:

1. $P/M/1$ modelis ar Pareto sadalījumu intervāliem starp pieprasījumiem;
2. $P/M/1$ ar *ON/OFF* trafiku un Pareto sadalījumu intervāliem starp pieprasījumiem;
3. $G/M/1$ modelis ar Veibula sadalījumu intervāliem starp pieprasījumiem.

Visiem modeļiem tika novērtēts rindas vidējais un maksimālais garums dažādām noslodzes koeficienta vērtībām, kuras tika mainītas ar trafika intensitātes parametra λ izmaiņām:

1. $\lambda = 75$ paketes/s, bet noslodzes koeficients $\rho = 0,6$;
2. $\lambda = 87,5$ paketes/s, bet noslodzes koeficients $\rho = 0,7$;
3. $\lambda = 100$ paketes/s, bet noslodzes koeficients $\rho = 0,8$;
4. $\lambda = 112,5$ paketes/s, bet noslodzes koeficients $\rho = 0,9$.

Visas simulācijas tika veiktas $P/M/1$, $P/M/1$ ar ON/OFF trafiku un $G/M/1$ modeļiem, izmantojot *Matlab* sastādīto programmu. Šajā programmā tika mainītas parametru vērtības, tika veiktas visu modeļu simulācijas un saglabāti rezultāti failā, lai veiktu turpmāko analīzi. Pēc šiem rezultātiem tika konstruēti grafiki, kuru piemērs $P/M/1$ modeļa gadījumā ir parādīts 4.2. att. Modeļiem ar citu trafika ģenerēšanas modeli sanāca līdzīgi rezultāti.



4.2. att. *Simulink* modeļa maksimālā rindas garuma $\max(R)$ attiecība pret vidējo rindas garumu $E[R]$ atkarībā no Hersta parametra H dažādiem noslodzes koeficientiem ρ .

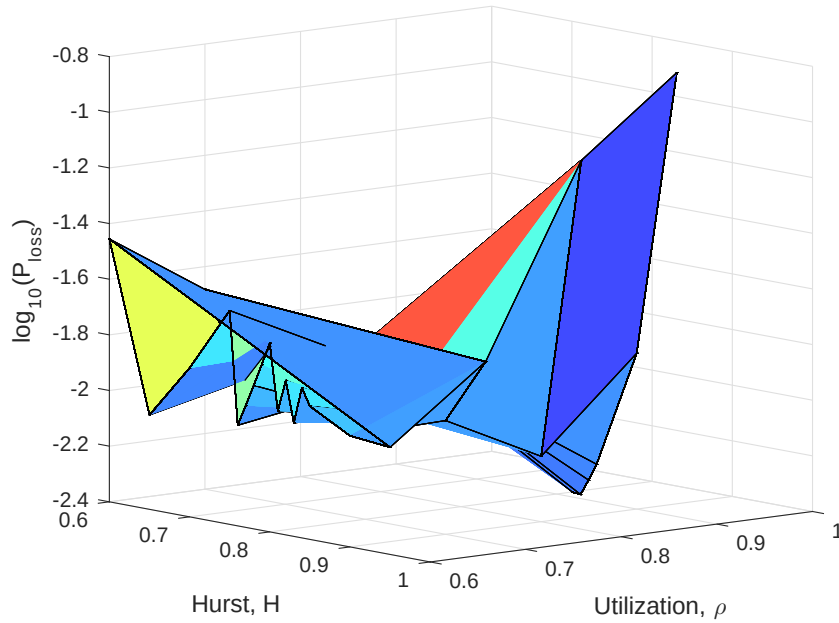
Lai varētu novērtēt pakešu zudumu varbūtību P_{loss} , modeļi ir jāierobežo buferatmiņas apjoms. Šo apjomu ir jāiestāda simulācijā kā konkrētu skaitli. Veiktie pētījumi norāda uz to, ka buferatmiņas apjoms ir atkarīgs gan no Hersta parametra H , gan no noslodzes koeficienta ρ . [35] piedāvā formulu buferatmiņas apjoma novērtēšanai, taču kā parāda iepriekšējo eksperimentu rezultāti, tā nav pielietojama. Darbā [15] ir sniegtas rekomendācijas attiecībā uz buferatmiņas apjoma izvēli, taču šajā eksperimentu sērijā buferatmiņas apjoms tiks izvēlēts vienāds ar vidējo rindas garumu $E[R]$, kas tiek sareizināts ar konstantu reizinātāju k saskaņā ar (4.1), dotajā promocijas darbā k pieņem veselo skaitļu vērtības no 1 līdz 10:

$$K = k \cdot E[R], \text{ kur } k = 1, 2, 3, \dots \quad (4.1)$$

Pēc eksperimentu sērijas veikšanas un rezultātu analīzes var secināt, ka buferatmiņas apjoma izmaiņas noved pie pakešu zudumu varbūtības P_{loss} vērtības izmaiņām. Taču šajā gadījumā, salīdzinot iegūtās vērtības vienādā Hersta parametra intervālā $0,6 \leq H \leq 0,95$ pie vienādiem noslodzes koeficientiem, var pamanīt, ka:

- mainās P_{loss} vērtības (precīzāk – logaritmiskās vērtības $\lg P_{\text{loss}}$);
- kopējais līknes raksturs saglabājās.

Tātad eksperimentu rezultāti norāda uz to, ka buferatmiņas apjoma izvēle ietekmē pašas vērtības P_{loss} vairāk, nekā to izmaiņu dinamiku atkarībā no Hersta parametra H . Noslodzes koeficientam ρ arī ir liela ietekme uz šādu izmaiņu raksturu, tomēr vienādiem noslodzes koeficientiem pie dažāda buferatmiņas apjoma līknes forma sanāk ļoti līdzīga. Šādi rezultāti ir spēka visiem 3 apskatītajiem modeļiem: $P/M/1/K$, $P/M/1/K$ ar ON/OFF trafiku un $G/M/1/K$ ar Veibula sadalījuma likumu.



4.3. att. *Simulink* $P/M/1/K$ modeļa pakešu zudumu varbūtības logaritma $\lg P_{\text{loss}}$ atkarība no Hersta parametra H un noslodzes koeficienta ρ vērtībām.

Uzskatāmības nolūkos šos rezultātus var attēlot kā trīsdimensiju grafiku – virsmu, kas parāda pakešu zudumu varbūtības logaritma $\lg P_{\text{loss}}$ atkarību no Hersta parametra H un noslodzes koeficienta ρ . Tas dod iespēju vizuāli konstatēt to, ka šādai atkarībai ir novērojama minimālā vērtība pie noteiktām Hersta parametra H un noslodzes koeficienta ρ vērtībām. Tādas trīsdimensiju virsmas piemērs $P/M/1/K$ modelim ar $K = 3E[Q]$ ir parādīts 4.3. att.

Arī pārējiem trafika modeļiem tāds ekstrēms pastāv un parametri, pie kuriem tas ir novērojams, nav atkarīgi no buferatmiņas apjoma K reizinātāja lieluma k . Katram konkrētajam no modeļiem šis ekstrēms (minimums) ir atšķirīgs, tomēr visos gadījumos parametru vērtības ir tuvākas 1 nekā 0,5. Tā, piemēram, $P/M/1/K$ modelim tādas parametru vērtības ir $H \approx 0,9$ un $\rho \approx 0,8$.

Lai noteiktu tādus parametrus, t.i., veiktu optimizācijas uzdevuma risināšanu, var pielietot R. Belmana algoritmu [4], ar kura palīdzību var izveidot lēmuma pieņemšanas secību par to, kādus sistēmas parametrus K un ρ ir jāizvēlas pie noteiktās H parametra vērtības, lai nodrošinātu nepieciešamo pakešu zudumu varbūtību P_{loss} un, tajā skaitā, lai risinājums būtu optimāls pēc izmaksām. Pašam dinamiskās programmēšanas principam nav nekā kopīga ar programmas koda rakstīšanu, t.i., programmēšanas plašo jēdzienu. Tajā vietā runa ir par optimizācijas procedūru, kad ar katru tuvinājumu tiek atrasts arvien labāks risinājums, kamēr prasības pēc viena no parametriem netiek pārsniegtas.

Lai lietotu dinamiskās programmēšanas Belmana algoritmu, ir jāsastāda tabula vienai konkrētai H parametra vērtībai, kurai tiks veikts optimizācijas uzdevums. Šīs vērtības tika iegūtas no eksperimentu rezultātiem, kas iekļauj sevī pakešu zudumu varbūtību vērtības P_{loss} dažādām Hersta parametra H , noslodzes koeficienta ρ un buferatmiņas apjoma K vērtībām. Lai pēdējais lielums mainītos nepārtraukti, tika veiktas papildus simulācijas ar buferatmiņas apjomiem $2E[R]$ un $4E[R]$, kā arī papildus ar $6E[R]$, $7E[R]$, $8E[R]$, $9E[R]$ un $10E[R]$.

Katrai H parametra vērtībai tiek sastādīta atsevišķa tabula, kas parāda pakešu zudumu P_{loss} atkarību no noslodzes koeficienta ρ un buferatmiņas apjoma (vai tā reizinātāja). Tādas tabulas piemērs $P/M/1/K$ modelim ir parādīts 4.4. att. Katrā tabulas ailītē bez pakešu zudumiem P_{loss} tiek ievadītas izmaksas – gan pēc noslodzes koeficienta ρ , gan pēc buferatmiņas apjoma K .

	$\rho = 0,6$	$\rho = 0,7$	$\rho = 0,8$	$\rho = 0,9$
$K = 1E[R]$	1 6 0.10748	1 7 0.075375	1 8 0.057081	1 9 0.029627
$K = 2E[R]$	2 6 0,042893	2 7 0,026055	2 8 0,020595	2 9 0,011168
$K = 3E[R]$	3 6 0,018967	3 7 0,010185	3 8 0,0085718	3 9 0,0048284
$K = 4E[R]$	4 6 0,0084389	4 7 0,0039853	4 8 0,0038761	4 9 0,0023069
$K = 5E[R]$	5 6 0,0038934	5 7 0,0016982	5 8 0,0015656	5 9 0,00099385
$K = 6E[R]$	6 6 0,0018009	6 7 0,00066002	6 8 0,00068674	6 9 0,00045967
$K = 7E[R]$	7 6 0,00080708	7 7 0,00031331	7 8 0,00036305	7 9 0,00021448
$K = 8E[R]$	8 6 0,0004042	8 7 0,00013092	8 8 0,00018028	8 9 0,00011016
$K = 9E[R]$	9 6 0,00019813	9 7 $3,9377 \cdot 10^{-5}$	9 8 $7,5242 \cdot 10^{-5}$	9 9 $5,1062 \cdot 10^{-5}$
$K = 10E[R]$	10 6 $8,9547 \cdot 10^{-5}$	10 7 $1,3647 \cdot 10^{-5}$	10 8 $1,6265 \cdot 10^{-5}$	10 9 $3,0703 \cdot 10^{-5}$

4.4. att. Dominējošās secības formēšana ar Belmana algoritmu $P/M/1/K$ modelim ar Hersta parametru $H = 0,8$.

Izmaksas tika novērtētas šādā veidā:

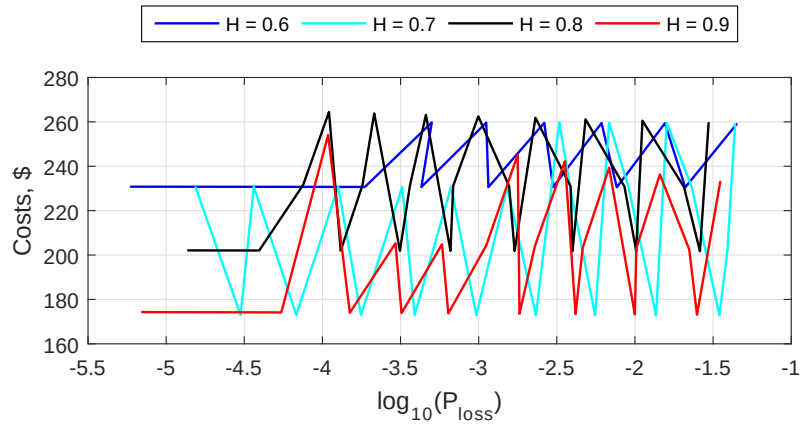
1. Buferatmiņas apjoma izmaksas C_1 , pieņemot, ka vienas paketes garums ir 1500 B saskaņā ar TCP protokolu un pieņemot tādu pakešu maksimālo skaitu vienādu ar vidējo rindas garumu kopā ar reizinātāju k , var noteikt 1 MB izmaksas gadā, pieņemot, ka atmiņa ir paredzēta izmantošanai uz 5 gadiem pirms aparātūras novecošanas;
2. Kanāla pārraides ātruma izmaksas C_2 tika noteiktas kā procents no tā caurlaides spējas, izmantojot trafika intensitātes lielumu λ un zinot vienas paketes apjomu, var noteikt nepieciešamo caurlaides spēju C_{kan} un pārraides ātrumu $R_{kan} = \rho C_{kan}$, kā arī aprēķināt tā izmaksas mēnesī un gadā, lai varētu salīdzināt ar buferatmiņas apjoma izmaksām.

	$\rho = 0,6$	$\rho = 0,7$	$\rho = 0,8$	$\rho = 0,9$
$K = 1E[R]$	172,8 \$ un 0,02 \$ 0,10748 172,82 \$	201,6 \$ un 0,05 \$ 0,075375 201,65 \$	230,4 \$ un 0,13 \$ 0,057081 230,53 \$	259,2 \$ un 0,66 \$ 0,029627 259,86 \$
$K = 2E[R]$	172,8 \$ un 0,04 \$ 0,042893 172,84 \$	201,6 \$ un 0,1 \$ 0,026055 201,7 \$	230,4 \$ un 0,26 \$ 0,020595 230,66 \$	259,2 \$ un 1,32 \$ 0,011168 260,52 \$
$K = 3E[R]$	172,8 \$ un 0,06 \$ 0,018967 172,86 \$	201,6 \$ un 0,15 \$ 0,010185 201,75 \$	230,4 \$ un 0,39 \$ 0,0085718 230,79 \$	259,2 \$ un 1,98 \$ 0,0048284 261,18 \$
$K = 4E[R]$	172,8 \$ un 0,08 \$ 0,0084389 172,88 \$	201,6 \$ un 0,2 \$ 0,0039853 201,8 \$	230,4 \$ un 0,52 \$ 0,0038761 230,92 \$	259,2 \$ un 2,64 \$ 0,0023069 261,84 \$
$K = 5E[R]$	172,8 \$ un 0,1 \$ 0,0038934 172,9 \$	201,6 \$ un 0,25 \$ 0,0016982 201,85 \$	230,4 \$ un 0,65 \$ 0,0015656 231,05 \$	259,2 \$ un 3,3 \$ 0,00099385 262,5 \$
$K = 6E[R]$	172,8 \$ un 0,12 \$ 0,0018009 172,92 \$	201,6 \$ un 0,3 \$ 0,00066002 201,9 \$	230,4 \$ un 0,78 \$ 0,00068674 231,18 \$	259,2 \$ un 3,96 \$ 0,00045967 263,16 \$
$K = 7E[R]$	172,8 \$ un 0,14 \$ 0,00080708 172,94 \$	201,6 \$ un 0,35 \$ 0,00031331 201,95 \$	230,4 \$ un 0,91 \$ 0,00036305 231,31 \$	259,2 \$ un 4,62 \$ 0,00021448 263,82 \$
$K = 8E[R]$	172,8 \$ un 0,16 \$ 0,0004042 172,96 \$	201,6 \$ un 0,4 \$ 0,00013092 202 \$	230,4 \$ un 1,04 \$ 0,00018028 231,44 \$	259,2 \$ un 5,28 \$ 0,00011016 264,48 \$
$K = 9E[R]$	172,8 \$ un 0,18 \$ 0,00019813 172,98 \$	201,6 \$ un 0,45 \$ $3,9377 \cdot 10^{-5}$ 202,05 \$	230,4 \$ un 1,17 \$ $7,5242 \cdot 10^{-5}$ 231,57 \$	259,2 \$ un 5,94 \$ $5,1062 \cdot 10^{-5}$ 265,14 \$
$K = 10E[R]$	172,8 \$ un 0,2 \$ $8,9547 \cdot 10^{-5}$ 173 \$	201,6 \$ un 0,5 \$ $1,3647 \cdot 10^{-5}$ 202,1 \$	230,4 \$ un 1,3 \$ $1,6265 \cdot 10^{-5}$ 231,7 \$	259,2 \$ un 6,6 \$ $3,0703 \cdot 10^{-5}$ 265,8 \$

4.5. att. Dominējošās secības formēšana ar Belmana algoritmu $P/M/1/K$ modelim ar Hersta parametru $H = 0,8$ pie uzdotajām parametru izmaksām.

Pēc izmaksu aprēķina parādītais 4.4. att. algoritms var atkal būt izmantots, tikai šajā reizē tiks ievērotas cenas izmaksas nevis abstraktie lielumi, kā tas bija darīts pirmajā reizē. Promocijas darba pielikumā ir tabulas ar izveidotajām dominējošām secībām visiem šajā nodaļā apskatītajiem trafika modeļiem: $P/M/1/K$, $P/M/1/K$ ar ON/OFF un $G/M/1/K$ ar Veibula sadalījumu. Hersta parametrs mainās robežās $0,6 \leq H \leq 0,95$ ar soli 0,05. Līdzīgi 4.4. att. parādītajai dominējošajai secībai, tika sastādīta dominējošā secība Hersta parametra vērtībai $H = 0,8$, ievērojot izmaksas. Ja eksperimenta laikā visas paketes tika apstrādātas, t.i., P_{loss} novērtējums ir 0, tāds rezultāts tiek atmests. Izveidotā secība ir parādīta 4.5. att.

Katrā 4.5. att. ailītē ir ierakstītas atsevišķās izmaksas: kanāla pārraides ātruma izmaksas C_2 un buferatmiņas izmaksas C_1 , pakešu zudumu varbūtība P_{loss} un kopējās izmaksas $C_2 + C_1$. Dominējošā secība tika veidota saskaņā ar Belmana dinamiskās programmēšanas algoritmu, un, salīdzinot 4.4. att. ar 4.5. att., var secināt, ka precīzāka izmaksu pievienošana nemainīja dominējošo secību, jo abos gadījumos kanāla pārraides ātruma izmaksas ievērojami pārsniedz buferatmiņas apjoma izmaksas. Pēc datiem no tabulām var konstruēt līknes, kas parāda izmaksu $C_2 + C_1$ atkarību no pakešu zudumu varbūtības logaritma $\lg P_{\text{loss}}$ dažādām Hersta parametra H vērtībām. Tādu grafiku piemērs ir parādīts 4.6. att.



4.6. att. Kopējās $P/M/1/K$ modeļa izmaksas atkarībā no pakešu zudumu varbūtības dažādām Hersta parametra vērtībām.

Pēc grafikiem 4.6. att. var redzēt, ka pastāv minimālās izmaksas, turklāt vērtības atšķiras dažādiem Hersta parametriem H . Šiem minimumiem atbilst noteikti sistēmas parametri, kuriem tika novērtētas izmaksas. Tādas minimālās izmaksas var apkopot tabulā un izmantot maršrutētāja parametru konfigurēšanā.

Galvenie secinājumi

Šī promocijas darba mērķi tika veiksmīgi sasniegti un atrisināti visi uzdevumi. Darba rezultātus var apkopot un veikt šādus secinājumus:

- Eksistējošās buferatmiņas apjoma novērtēšanas metodes sevlīdzīgajam trafikam nedod adekvātus apjoma novērtējumus un ir adaptīvi jāmaina sistēmas parametri, tajā skaitā, arī buferatmiņas apjomu, veicot trafika mērījumus;
- Dažādām Hersta (sevlīdzīguma) parametra vērtībām atbilst dažāds buferatmiņas apjoms, un buferatmiņas apjoma palielināšanās tendence ir novērojama gan atkarībā no Hersta parametra vērtības, gan no noslodzes koeficienta vērtības;
- Reāllaika diskrētās veivletu transformācijas aprēķināšanai var izmantot filtru bankas pieeju (arī gadījumos kad runa nav par *FPGA* vai *DSP* sistēmām) un veikt uzlabojumus, izvēloties sarežģītākas filtru struktūras, kā polifāzes filtru vai kāpņveida filtru bankas realizācija;
- Diskrētās veivletu transformācijas algoritms *C++* valodā strādā pietiekami ātri, lai varētu to izmantot sevlīdzīgā trafika parametru novērtēšanai reāllaikā;
- Apskatot inverso diskrēto veivletu transformāciju, tika konstatēts, ka ātrākajai signāla rekonstruēšanai ir lietderīgi veikt signāla decimāciju analīzes filtru bankā tādā veidā, lai tā atstātu nepāra numura nolases – tas samazina aizturi katrā mērogā un šie lielumi uzkrājas vairākos mērogos;
- Var izveidot tādu Hersta parametra novērtēšanas mezglu, kurš atjaunotu Hersta parametra novērtējumu ar katru trafika nolasi reāllaikā, analizējot vairākus transformācijas mērogus, turklāt programmas izpildes laiks ir salīdzināms ar diskrētās veivletu transformācijas aprēķina laiku un tāds Hersta parametra novērtēšanas mezgls ir praktiski lietojams;
- Hersta parametra mērīšanas precizitātes uzlabošanai ir jāizvēlas piemērots analīzes mērogu skaits, kurš ir mazāks par diskrētās veivletu transformācijas maksimālo mērogu skaitu un ir atkarīgs no paša Hersta parametra lieluma. Izveidotajā programmā pastāv iespēja adaptīvi mainīt šo lielumu programmas izpildes gaitā;
- Novērtējot pakešu zudumu varbūtību sistēmā ar ierobežotu buferatmiņu, tika konstatēts, ka gadījumā, kad buferatmiņas apjoms tiek izvēlēts adaptīvi, Hersta parametra palielināšanās ne vienmēr noved pie pakešu zudumu varbūtības pieauguma. Piemēram, Hersta parametriem intervālā $0,8 \leq H \leq 0,9$ tika novērota pretēja aina;
- Sevlīdzīgajam trafikam ar Hersta parametru $H = 0,8$ vai tuvu pie tā ir novērojams anomāls raksturs vairākās likumsakarībās, piemēram, vidējais/maksimālais rindas garums atkarībā no Hersta parametra, vai arī Hersta parametra novērtēšanas kļūda atkarībā no Hersta parametra. Daudzajos darbos piemēri tiek doti tieši ar $H = 0,8$ vērtību, kura, pēc būtības, atbilst vidēji izteiktajai sevlīdzīguma pakāpei;
- Iegūtos Hersta parametra, buferatmiņas apjoma un pakešu zudumu varbūtības mērījumus var izmantot, lai veiktu daudzparametru optimizāciju ar dinamiskās programmēšanas

Belmana algoritmu pēc dažādiem kritērijiem: kopējo izmaksu, pakešu zudumu varbūtības minimuma utt.;

- Belmana algoritma lietošana sevlīdzīgajam trafikam, ievērojot reālās caurlaides spējas un buferatmiņas izmaksas 2013. gada beigās, parādīja, ka izmaksu minimizēšanai ir jāpaliek buferatmiņas apjoms un jāsamazina noslodzes koeficients;
- Veidojot dominējošo secību grafikus, kas parāda kopējo izmaksu atkarību no pakešu zudumu varbūtības, Hersta parametra vērtībai $H = 0,8$ līknes raksturs attiecībā uz pārējām Hersta parametra vērtībām arī atšķiras un uzrādīja pārāk augstas izmaksas.

Galvenie promocijas darba rezultāti tika aprakstīti publikācijās un paziņoti starptautiskajās konferencēs.

LITERATŪRA

- [1] P. Abry, D. Veitch. Wavelet-Analysis of Long-Range-Dependent Traffic // IEEE Transactions on Information Theory. - IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 1998 – vol. 44, no. 1 - pp. 2–15. DOI: 10.1109/18.650984
- [2] Amin, F.; Mizanian, K. Buffer management for self-similar network traffic. // Telecommunications (IST), 2012 Sixth International Symposium, 6–8 Nov. 2012 – pp. 737–742
- [3] Amin, F.; Mizanain, K.; Mirjalily, G. Active queue management for self-similar network traffic // Electrical Engineering (ICEE), 2013 21st Iranian Conference on , vol., no., 14–16 May 2013 – pp. 1–5
- [4] Richard Bellman. Dynamic Programming. // Princeton University Press. – NY, USA, 1957 – 340 p.
- [5] Florian Bomers. Wavelets in real time digital audio processing: Analysis and sample implementations. Master's Thesis. // University of Mannheim, May 2000 – 119 p.
- [6] Bregni, S. Compared accuracy evaluation of estimators of traffic long-range dependence. // Communications (LATINCOM), 2014 IEEE Latin-America Conference on , vol., no., 5–7 Nov. 2014 – pp. 1–5
- [7] Gabriel M.de Brito, Pedro B.Velloso, Igor M.Moraes. Information Centric Networks: A New Paradigm for the Internet // Willey-ISTE. – April 2013 – 144 p.
- [8] Chaudhari, S.S.; Biradar, R.C. Resource prediction based routing using wavelet neural network in mobile ad-hoc networks. // Circuits, Communication, Control and Computing (I4C), 2014 International Conference on , vol., no., 21–22 Nov. 2014 – pp. 273–276
- [9] Yiou Chen; Jianhao Hu; Jianrong Wang. Self-similar traffic study of on-chip interconnection networks. // Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), 2013 International Conference on , vol. 1, no., 15–17 Nov. 2013 – pp. 381–385
- [10] X.Cheng, K.Xie, D.Wang. Network Traffic Anomaly Detection Based on Self-Similarity Using HHT and Wavelet Transform. // IAS '09. Proceedings of the Fifth International Conference on Information Assurance and Security. – IEEE Press Piscataway, 2009 – pp. 710–713. DOI: 10.1109/IAS.2009.219
- [11] Cisco Identity Services Engine User Guide, Release 1.2 // Cisco Systems, April 7, 2015 – 788 p.
- [12] I. Daubechies and W. Sweldens. Factoring Wavelet Transforms into Lifting Steps. // Fourier Analysis and Applications, 4(3), 1998 – pp. 247–269.
- [13] DeVirgilio, M.; Pan, W.D.; Joiner, L.L.; Dongsheng Wu. Internet delay statistics: Measuring Internet feel using a dichotomous Hurst parameter. // Southeastcon, 2012 Proceedings of IEEE , vol., no., 15–18 March 2012 – pp. 1–6

- [14] Geyong Min; Xiaolong Jin. Analytical Modelling and Optimization of Congestion Control for Prioritized Multi-Class Self-Similar Traffic. // Communications, IEEE Transactions on, vol. 61, no. 1, January 2013 – pp. 257–265
- [15] M.Kulikovs. Research and development of effective managing algorithms in admission control systems for telecommunication networks. Doctoral Diploma Thesis. // Riga: RTU, 2010 – 200 p.
- [16] W.Leland, M.Taqqu, W.Willinger, D.Wilson. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic // IEEE/ACM Transactions on Networking – IEEE Press Piscataway, vol. 2, no. 1, 1994 – pp. 203–213. DOI: 10.1109/90.282603
- [17] Li, Yongli; Guizhong Liu; Hongliang Li; Hou, Xingsong. Wavelet-based analysis of hurst parameter estimation for self-similar traffic. // Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2002 IEEE International Conference on , vol. 2, no., 13–17 May 2002 – pp. 2061–2064
- [18] Liji, P.I.; Dipin, A. Real time data traffic analysis using poisson process in next generation network. // Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), 2014 International Conference on , vol., no., 10–11 July 2014 – pp. 289–293
- [19] Mallat, Stéphane. A wavelet tour of signal processing. 2nd edition. // Academic press, 1999 – 668 p.
- [20] B.Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature. // Henry Holt and Company, 1982 – 480 p.
- [21] Mota, Hd.O.; Vasconcelos, F.H.; da Silva, R.M. Real-time wavelet transform algorithms for the processing of continuous streams of data. // Intelligent Signal Processing, 2005 IEEE International Workshop on , vol., no., 1–3 Sept. 2005 – pp. 346–351
- [22] Naornita, C.; Isar, A.; Nelson, J.D.B. Regularised, semi-local hurst estimation via generalised lasso and dual-tree complex wavelets. // Image Processing (ICIP), 2014 IEEE International Conference on , vol., no., 27–30 Oct. 2014 – pp. 2689–2693
- [23] Petiz, I.; Rocha, E.; Salvador, P.; Nogueira, A. Using multiscale traffic analysis to detect WPS attacks. // Communications Workshops (ICC), 2013 IEEE International Conference on , vol., no., 9–13 June 2013
- [24] Premaratne, U.; Premaratne, U.; Samarasinghe, K. Network traffic self similarity measurements using classifier based Hurst parameter estimation. // Information and Automation for Sustainability (ICIAFs), 2010 5th International Conference, 17–19 Dec. 2010 – pp. 64–69
- [25] Z.Prusa and P.Rajmic. Real-Time lifting wavelet transform algorithm // Elektrotechnika. – Brno: International Society for Science and Engineering, o.s., 2011 – vol. 2, no. 3 - pp. 53–59
- [26] David Rincon Rivera. Contributions to the Wavelet-based Characterization of Network Traffic. // PhD Thesis, Program on Telematics Engineering – Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona, July 2007 – 315 p.
- [27] Shu-Yan Chen; Wei Wang; Gao-Feng Qu. Combining wavelet transform and Markov model to forecast traffic volume. // Machine Learning and Cybernetics, 2004. Proceedings of 2004 International Conference on, vol. 5, no., 26–29 Aug. 2004 – pp. 2815–2818

- [28] G. Strang, T. Ngueyen. Wavelets and filter banks. // Wellesley: Wellesley-Cambridge Press, 1996 – 495 p.
- [29] Tereshchenko, T.; Yamnenko, Y.; Veretiuk, A.; Veretiuk, S. Wavelet transform at oriented basis for network traffic forecasting. // Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference, vol., no., 16–19 April 2013 – pp. 450–454
- [30] Ted Wobber, Thomas L. Rodeheffer and Douglas B. Terry. Policy-based Access Control for Weakly Consistent Replication // Microsoft Research Technical Report MSR-TR-2009-15, – Published February 2009, revised July 2009 – 17 p.
- [31] Yanpu Hu; Wenfu Yang; Yong Wang; Ying Dong. The study of a new Call Admission Control method based on self-similar traffic. // Intelligent Control and Automation (WCICA), 2012 10th World Congress on, vol., no., 6–8 July 2012 – pp. 15–19
- [32] Ye, X.; Xia, X.; Zhang, J.; Chen, Y. Effects of trends and seasonalities on robustness of the Hurst parameter estimators. // Signal Processing, IET , vol. 6, no. 9, Dec. 2012 – pp. 849–856
- [33] Ye Xiaolong; Julong Lan; Wanwei Huang. Network traffic anomaly detection based on self-similarity using FRFT // Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2013 4th IEEE International Conference on, vol., no., 23–25 May 2013 – pp. 837–840
- [34] E. Pētersons. Sevīdzīgs trafiks telekomunikāciju un datoru tīklos. // Rīga: RTU Izdevniecība, 2005 – 61 lpp.
- [35] В. Столлингс. Современные компьютерные сети. 2-е издание. // Санкт-Петербург: Питер, 2003 – 783 с.