

Rīgas Tehniskā Universitāte

Elektronikas un Telekomunikāciju Fakultāte

Transporta Elektronikas un Telemātikas katedra

Romans Jerjomins

PhD Program "Transporta Datorvadības, Informācijas un
Elektroniskās Sistēmas"

Bezvadu lokālo tīklu pētīšana nestacionārā režīmā

Doktora tēžu kopsavilkums

Supervisor

Dr. hab. ing. sc., profesors

Ernests Pētersons

RTU izdevniecība
Rīga 2012

UDK 004.732(043.2)

Je 707 b

Jerjomins R. Bezvadu lokālo tīklu pētīšana nestacionārā režīmā. -R.:RTU izdevniecība, Rīga, 2012.- 48 lpp.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā "Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai"

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes "RTU P-08" 2012.gada 28.jūnija lēmumu, protokols Nr.11

ISBN 978-9934-10-370-4

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski
aizstāvēts 2012.g. 8.novembrī, plkst. 16:30, 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 Bārzdīņš
Latvijas Universitāte, Datorikas Fakultāte

Profesors, Dr. habil. Manfreds Šneps-Šnepe
Ventspils augstskola

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.

Romans Jejomins(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs sastāv no ievada, trijām sadaļām, nobeiguma, sešiem
pielikumiem un avotu saraksta pavisam 148 lappusēs, 108 attēlos, 17 tabulās
un 141 informācijas avotos.

Anotācija

Dažādu trafika veidu izpēte pierāda, ka trafiks tīklos ir sevlīdzīgs. Tāpēc, tādiem pētījumiem tiek veltīti daudzi jaunākie darbi un fundamentālās monogrāfijas. Sevlīdzīgā trafika ietekme uz komunikāciju ierīcēm, tādām kā tīkla komutatori, koncentratori un serveri, noved pie izteiktā to funkcionēšanas kvalitātes samazinājuma, salīdzinot ar operēšanu tradicionālo pieprasījumu un pakešu plūsmu apstākļiem. Tas izpaužas caurlaides spējas samazināšana tīkla mezglos, buferatmiņas pietrūkumā un, rezultātā, paaugstinātajā apstrādes atteikuma varbūtībā. Parasti sevlīdzīgā trafika ietekmes pētījumi tiek veikti komutēšanas ierīču stacionārajā darba režīmā.

Šī darba autors novērtēja rādītājus sevlīdzīgajam trafikam gadījumā, kad tīklā pievienojās jaunās ierīces, kas noved pie noslodzes lēciena un nepieciešams noteiktais laiks – relaksācijas laiks – pirms ierīcē iestāsies jauns stacionārais režīms. Tāpēc šajā darbā uzmanība tiek veltīta relaksācijas laikam.

Pārejas procesu ilguma pētījumu rezultātā, tika novērtēta buferatmiņas apjoma izmantošanas atkarība no servera noslodzes koeficienta.

Vispārīgais apraksts

Darba atbilstība

Interneta savienojumu metožu globālā tendence ir tāda, ka arvien vairāk lietotāju sāk izmantot bezvadu piekļuvi. Ne tikai smartfoni palika pieejamāki un izplatītāki, bet arī automobiļu ražotāji mēģina izmantot Interneta savienojuma iespējas ar mērķi nodrošināt papildus pakalpojumus automobiļa servisa apkalpošanā - tādus kā monitorings un diagnostika, pakalpojumi vadītājam - piemēram, maršruta navigācija, laika apstākļu kartes un automātiskā nodokļu apmaksāšana, kā arī pasažieru izklaidēšana, kurā var iekļaut dažādu veidu Interneta lietojumprogrammas. Lielākā mūsdienu Internetam pieslēgto automobiļu daļa joprojām paļaujas uz sistēmām ar šaurjoslas pieslēgumu (piem., GSM vai satelītu kanāli), kas neatbilst jauno lietojumprogrammu ieviešanas prasībām. Var gaidīt, ka šī situācija drīzumā mainīsies. Daži automobiļu ražotāji piedāvā Interneta pieslēgumu vairākiem modeļiem ar 3G tīkla starpniecību, savukārt ir arī tādi ražotāji, kas apskata iespēju piedāvāt automobiļu lietojumprogrammas ar Interneta savienojumu vai smartfona lietojumprogrammu pielietošanu automobilī. Pašreizējā tendence liecina, ka desmit miljoni automobiļu tiks pieslēgti pie Interneta tuvākajos gados. Tas ieviesīs inovatīvās Interneta lietojumprogrammas arī automobiļos, kas varētu ievērojami ietekmēt gan ražotāju, gan pasažieru pieredzi.

Vairākos pēdējos gados mēs varējām novērot Internetam pieslēgto automobiļu skaita pieaugumu. Viss norāda uz to, ka tāda tendence turpināsies un automašīnu īpašnieki drīzumā paliks par pirmās klases Interneta iedzīvotājiem (drive-through).

Problēmas, ar kurām mēs saskaramies parastajos vadu tīklos "drive-through" tīklos paliks arvien ievērojamākās, jo visi tā klienti pārvietosies un pastāvīgi pārslēgsies no viena piekļuves punkta uz otru. Konkrēti, runa iet par pakešu pārblīves problēmu, kad vairāki klienti mēģina piekļūt pie Interneta vienlaicīgi, kas noved pie trafika plūsmas lēcienveidīgās palielināšanas un buferizācijas problēmām.

Darba mērķis

Galvenais dotā darba mērķis ir izpētīt pārejas režīmu bezvadu tīklos. Mērķa sasniegšana var uzstādīt šādus uzdevumus:

- Bezvadu lokālo tīkla trafika sevlīdzības pakāpes analīze
- Izskatīt un izvēlieties sevlīdzīga procesa pārejas režīma izpētes metodi
- Trafika parametru ietekmes izpēte uz sistēmas relaksācijas laiku
- Noteikt iespējamību prognozēt sistēmas relaksācijas laiku pēc reālajā laika novērtējamiem trafika parametriem

Pētījumu metodoloģija

Tika izmantotas un salīdzinātas savā starpā gan eksperimentālās, gan analītiskās metodes. Tika izanalizēti eksperimentāli noņemtie bezvadu reālā trafika dati un izveidoti vairāki simulācijas modeļi gala rezultātu iegūšanai. Tika izmantotas analītiskās metodes un aproksimācija ideālās klasiskās situācijas modelēšanai un simulēto sistēmu datu analīzei. Tika izveidots simulācijas līdzeklis pētījumu veikšanai.

Rezultāti un zinātniskā novitāte

Šajā darbā autors veica eksperimentu ar bezvadu tīklu, kura gaitā tika uzkrāts un izanalizēts trafiks. Tika pierādīts, ka trafikam piemīt sevlīdzīguma īpašības. Darbā izanalizētas vairākas pārejas procesu izpētes metodes un tika parādīts, ka simulācija ir vienīgā pielietojamā metode pārejas procesu pētīšanai sistēmās ar sevlīdzīgo ienākošo trafiku. Pētījumu laikā tika izveidots simulācijas līdzeklis lielā skaita simulāciju automatizēšanai. Darbā tiek analizēts sistēmas relaksācijas laiks un vidējais pieprasījumu skaits sistēmā ar eksponenciālo pieprasījumu intervālu sadalījumu un sevlīdzīgajiem pieprasījumiem. Izmantojot simulācijas datus, tika konstatēts, ka relaksācijas laiku sistēmām ar sevlīdzīgo trafiku var labi aproksimēt ar Verhulsta funkciju. Tika piedāvātā jaunā sevlīdzīgā trafika ģenerēšanas metode.

Rezultātu praktiskā pielietojamība

- Sistēmas rindas garuma prognozēšana atkarībā no trafika sevlīdzīguma pakāpes un sistēmas noslodzes koeficienta

- Sistēmas pārejas režīma ilguma prognozēšana atkarībā no trafika parametriem un sistēmas noslodzes koeficienta
- Tīkla ierīces projektēšana - noslodzes plānošana, ierīces veiktspējas parametru plānošana, atmiņas apjoms un rindas garums
- Tīkla plānošana
- Sevlīdzīgā tīkla trafika simulācija

Tēzes

- Tika uzkrāts un izanalizēts bezvadu tīklu trafiks. Parādīts, ka tādām trafikam ir sevlīdzīguma īpašības un augsts Hersta koeficients
- Ja rindošanas sistēmā laiks starp pieprasījumiem un apstrādes laiks ir sadalīts eksponenciāli, tās relaksācijas laiks palielinās ar sistēmas noslodzes pieaugumu
- H.Kobayashi modeli, pat ar autora modifikācijām, nevar pielietot sevlīdzīgā trafika sistēmas modelēšanai
- Sistēmā ar sevlīdzīgo ienākošo trafiku relaksācijas laiks un vidējais pieprasījumu skaits palielinās līdz ar sevlīdzīguma pakāpes un noslodzes koeficienta pieaugumu
- Sistēmā ar sevlīdzīgo ienākošo trafiku relaksācijas laiku var aproksimēt ar Verhulsta funkciju
- Var ģenerēt sevlīdzīgo laika secību, izmantojot Verhulsta vienādojumu

Rezultātu aprobācija

Pētījumu laikā rezultāti tika prezentēti un apspriesti sekojošās konferencēs:

1. Mathematical methods of optimisation of telecommunication networks, Belarussia, Minsk, February 22-24, 2005
2. Electronics and Electrical Engineering, Lithuania, Kaunas, May 16-18, 2005
3. Electronics and Electrical Engineering, Lithuania, Kaunas, May 23-25, 2006
4. Mathematical methods of optimisation of telecommunication networks, Belarussia, Grodno, January 29 - February 1, 2007

5. RTU 48th International Conference, Latvia, Riga, October 11-13, 2007
6. Baltic Congress on Future Internet Communications, Latvia, Riga, February 18-20, 2011

Publikācijas

Pētījumu rezultāti tika apkopoti sekojošās publikācijās:

1. S. Ilnickis, E. Petersons, and R. Jerjomins. Server non-stationary behaviour research at near to self-similar query stream influence. *Electronics And Electrical Engineering*, 59(3):46–51, 2005
2. R. Jerjomins and E. Petersons. Client-server model non-stationary behaviour research at near self-similar query stream influence under the condition of overloaded terminal system. *Electronics And Electrical Engineering*, 71(7):35–38, 2006
3. R. Yeryomin and E. Petersons. Self-similar traffic in wireless networks. In *Proc. of International Conference Mathematical Methods of Optimization of Telecommunication Networks.–Minsk: Belarusian State University Press*, volume 18, page 49–55, 2005
4. R. Yeryomin and E. Petersons. Server relaxation time at near to self-similar query stream influence. In *Proc. of International Conference Mathematical Methods of Optimization of Telecommunication Networks.–Minsk: Belarusian State University Press*, volume 19, page 87–91, 2007
5. R. Jerjomins and E. Petersons. Server non-stationary behaviour research in a wireless network under the condition of self-similar traffic. In *Riga Technical University 48th International Scientific Conference, Electronics and Telecommunications*, page 9–15. Riga Technical University, 2007
6. Р. Еремин и Э. Петерсонс. Исследование времени релаксации переходного процесса при обслуживании самоподобного входного трафика в беспроводных сетях. *Автоматика и вычислительная техника*, 43(3):36–46, 2009
7. R. Yeryomin and E. Petersons. Transient process relaxation time research under the condition of self-similar traffic input in wireless networks. *Automatic Control and Computer Sciences*, 43(3):138–147, 2009

8. R. Yeryomin and E. Petersons. Analytical estimation of self-similar wireless traffic relaxation time and hurst coefficient dependence. *Electronics And Electrical Engineering*, 108(2):31–34, 2011
9. R. Yeryomin and E. Petersons. Generating self-similar traffic for wireless network simulation. In *Internet Communications (BCFIC Riga), 2011 Baltic Congress on Future*, page 218–220. IEEE, 2011

Darba apjoms un struktūra

Tēzes sastāv no ievada, trijām sadaļām, nobeiguma, sešiem pielikumiem un avotu saraksta pavisam 148 lappusēs, 108 attēlos, 17 tabulās un 141 informācijas avotos.

1

Ievads

1.1 Bezvadu tīkli

1.1.1 IEEE 802.11 a/b/g/n standartu tīkli

Interneta savienojumu metožu globālā tendence ir tāda, ka arvien vairāk lietotāju sāk izmantot bezvadu piekļuvi. Un tas attiecas ne tikai uz personāldatoriem un portatīvajiem datoriem - lielākā plaukstdatoru un mobilo telefonu daļa mūsdienās tiek ražota ar Wi-Fi atbalstu. Pat lielākajai elektronisko grāmatu lasītāju daļai [2] ir iebūvēti Wi-Fi čipi, nepieminot arī to, ka planšetu tirgus arvien paplašinās.

Galvenās Wi-Fi priekšrocības, salīdzinot ar GPRS, 3G un 4G gala lietotājam ir:

- Savienojuma ātrums var sasniegt 600 Mbps standartā 802.11n
- Ilgākā autonomā darbība - 3G/4G ierīces parasti patērē daudz enerģijas, salīdzinot ar Wi-Fi ierīcēm
- Zema cena - bezvadu maršrutētāju var iegādāties pat par 15 eiro, nerunājot pat par ražošanas izmaksām un vairumtirdzniecības cenām

Pēdējā priekšrocība attiecas arī uz Interneta pakalpojumu sniedzējiem, ievērojot faktu, ka 802.11 standarta ierīces var bez īpašajām grūtībām integrēt pašreiz visizplatītākajā Ethernet infrastruktūrā. Visbūtiskākais trūkums

uz doto brīdi ir mazākie attālumi un sarežģītāka autorizācija, salīdzinot ar GSM/3G. Lietotājiem jāievada lietotājvārds un parole, kā arī atsevišķos gadījumos manuāli jāuzstāda drošību. Bet, ja runāt par publiskajiem tīkliem, tas ir apgrūtinājums. Tomēr, pašlaik tiek veidota IEEE iniciatīva 802.11u [4], kas ir paredzēta šo grūtību atrisināšanai.

Apvienojot kopā 802.11n standarta augsto caurlaides spēju ar 802.11u standarta vienkāršoto autorizāciju, 802.11s standarta režģtīklu, 802.11r standarta ātro bāzes staciju pārslēgšanu un 802.21 standarta vienkāršo pārtveri (handover), var izveidot ļoti konkurētspējīgo tehnoloģiju ar zemākām izmaksām.

1.1.2 Mobilie klienti

Pateicoties straujai bezvadu tehnoloģiju attīstībai, Internets paliek arvien mobilāks. Ne tikai smartfoni palika pieejamāki un izplatītāki, bet arī automobiļu ražotāji mēģina izmantot Interneta savienojuma iespējas ar mērķi nodrošināt papildus pakalpojumus automobiļa servisa apkalpošanā - tādus kā monitoring un diagnostika, pakalpojumi vadītājam - piemēram, maršruta navigācija, laika apstākļu kartes un automātiskā nodokļu apmaksāšana, kā arī pasažieru izklaidēšana, kurā var iekļaut dažādu veidu Interneta lietojumprogrammas. Lielākā mūsdienu Internetam pieslēgto automobiļu daļa joprojām paļaujas uz sistēmām ar šaurjoslas pieslēgumu (piem., GSM vai satelītu kanāli), kas neatbilst jauno lietojumprogrammu ieviešanas prasībām. Var gaidīt, ka šī situācija drīzumā mainīsies. Daži automobiļu ražotāji piedāvā Interneta pieslēgumu vairākiem modeļiem ar 3G tīkla starpniecību, savukārt ir arī tādi ražotāji, kas apskata iespēju piedāvāt automobiļu lietojumprogrammas ar Interneta savienojumu vai smartfona lietojumprogrammu pielietošanu automobiļī. Pašreizējā tendence liecina, ka desmit miljoni automobiļu tiks pieslēgti pie Interneta tuvākajos gados. Tas ieviesīs inovatīvās Interneta lietojumprogrammas arī automobiļos, kas varētu ievērojami ietekmēt gan ražotāju, gan pasažieru pieredzi.

Vairākos pēdējos gados mēs varējām novērot Internetam pieslēgto automobiļu skaita pieaugumu. Viss norāda uz to, ka tāda tendence turpināsies un automašīnu īpašnieki drīzumā paliks par pirmās klases Interneta iedzīvotājiem (drive-through).

Pēdējie pētījumi [10] norāda uz 802.11n standarta tīklu izmantošanas iespējamību "drive-through" Interneta pakalpojumu sniegšanai pie mobilo klientu ātrumiem līdz 100 km/st.

Problēmas, ar kurām mēs saskaramies parastajos vadu tīklos "drive-through" tīklos paliks arvien ievērojamākās, jo visi tā klienti pārvietosies un

pastāvīgi pārslēgsies no viena piekļuves punkta uz otru. Konkrēti, runa iet par pakešu pārblīves problēmu, kad vairāki klienti mēģina piekļūt pie Interneta vienlaicīgi, kas noved pie trafika plūsmas lēcienveidīgās palielināšanas un buferizācijas problēmām [9].

1.2 Sevlīdzīgums un Hersta Parametrs

Sevlīdzīguma fenomens izpaužas ar to, ka process izskatās vienādi, vai arī tā īpašības ir vienādas, attiecībā uz absolūtā lieluma pakāpi dažādos laika mērogos. Mērogu var mainīt gan telpā (garums, platums), gan laikā.

1.2.1 Sevlīdzīgie procesi

Sevlīdzīgajai laika rindai ir īpašība: kad šo rindu agregē, t.i. veidota jauno īsāko rindu, kurai katru punktu var izteikt ar sākotnējās rindas vairāku punktu summu, tad jaunajai rindai būs tāda pati autokorelācijas funkcija, kāda bija sākotnējai rindai.

Definēsim sevlīdzīgo (fraktālo) procesu. Pieņemsim, ka $X = (X_t, t = 0, 1, 2, \dots, N)$ ir kovariance stacionārajam (dažreiz saka - stacionārajam plašajā nozīmē) stohastiskajam procesam ar diskrēto argumentu - laiku. Tās kura vidējā vērtība ir M_X , dispersija ir $D_x = \sum_t X_t - M_X$ un autokorelācijas funkcija $r(k) = \sum_t (X_t - M_X) \cdot (X_{t+k} - M_X)$, kas atkarīga tikai no k lieluma. Konkrētāk, mēs pieņemam ka X ir šāda veida autokorelācijas funkcija:

$$r(k) \sim k^{-\beta} L_1(k) \quad , \text{as } k \rightarrow \infty \quad (1.1)$$

kur $\beta \in (0, 1)$ un L_1 lēni mainās līdz bezgalībai. Vienkāršībai, pieņemsim ka L_1 ir asimptotiskā konstante. Katrai $m = 1, 2, 3, \dots$ vērtībai (laika mērogs) ar $X^{(m)}$ apzīmēsim attiecīgo agregētu secību ar agregēšanas pakāpi m , kur katru agregētu secību iegūst sadalot sākotnējo rindu X blokos bez pārklāšanās ar garumu m un turpmāko vidējā noteikšanu katrā blokā, t.i. jebkuram m var uzdot $X^{(m)}$ šādi:

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m} (X_{(k-1)m} + \dots + X_{km-1}) \quad , k \geq 1 \quad (1.2)$$

Definīcija: X procesu sauc par (tieši) 2. kārtas sevlīdzīgo procesu ar sevlīdzīguma parametru $H = 1 - \beta/2$, $H \in (0.5, 1)$ ja attiecīgajiem agregētiem procesiem $X_{(m)}$ ir tāda pati korelācijas pakāpe, kāda bija X , t.i.

$$r^{(m)}(k) = r(k) \quad , \forall m \quad (1.3)$$

kur ar $r^{(m)}$ apzīmē autokorelācijas funkciju no $X_{(m)}$. Citiem vārdiem, X ir tieši 2. kārtas sevlīdzīgais process, ja agregētie procesi $X_{(m)}$ nevar būt atšķirti no X vismaz attiecībā uz to 2. kārtas īpašībām.

Definīcija: X procesu sauc par (asimptotiski) 2. kārtas sevlīdzīgo procesu ar sevlīdzīguma parametru $H = 1 - \beta/2$, $H \in (0.5, 1)$, ja jebkurām pietiekami lielām vērtībām k

$$r^{(m)}(k) \rightarrow r(k) \quad , \text{as } m \rightarrow \infty \quad (1.4)$$

Citiem vārdiem, X ir asimptotiski 2. kārtas sevlīdzīgais process, ja attiecīgi agregētie procesi $X_{(m)}$ ir tādi paši kā X , vai arī nav atšķirami no X , vismaz attiecībā uz to autokorelācijas funkcijām.

1.2.2 Hersta parametrs

Hersta parametrs ir ērtā stohastisko procesu sevlīdzīguma pakāpes mērvienība. Šo parametru nosauca par godu H.E.Herstam (H.E.Hurst), kas veltīja savu dzīvi Nīlas un citu upju pētīšanai un ūdens glabāšanas problēmai.

Hersts nodarbojās ar ideālā rezervuāra veidošanas problēmu Nīla upes straumes regulēšanai, pamatojoties uz pieejamiem upes līmeņa novērošanas pierakstiem. Ideālajam rezervuāram ir jānodrošina nemainīgo straumi, kas nekad nepārpludinātu un nekad neizsīktu. Šādas problēmas atrisināšanai ir jāiegūst dati par straumes izmaiņām. Pieņemot, ka ūdens līmeni mēra reizi gadā, mēs varam definēt šādus lielumus:

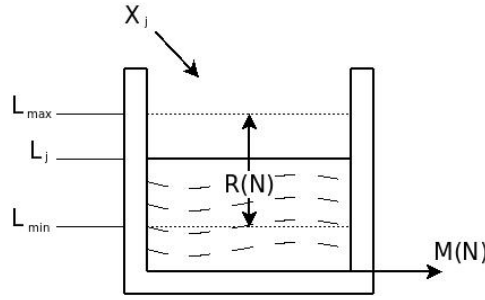
X_j - ienākošā plūsma vienā gadā j , ($1 \leq j \leq N$); pētāmās laika rindas;

$M(N)$ - pastāvīgā līmeņa straume, kas aprēķināta pēc N novērošanas gadiem;

L_j - ūdens līmenis rezervuārā j gada beigās, ($1 \leq j \leq N$);

N - novērošanas gadu skaits.

Tādi izmēri ir parādīti 1.1.att. Pamatojoties uz N gadu ierakstiem, mēs gribētu iegūt vērtības minimālajam un maksimālajam ūdens līmenim rezervuārā $L_{min}(N)$, $L_{max}(N)$, kā arī diapazonu $R(N) = L_{max}(N) - L_{min}(N)$.



Attēls 1.1: Hersta analīzes parametru ilustrācija

Ievērojot datus par ienākošo plūsmu laika periodā, nepieciešamos parametrus var viegli aprēķināt:

$$M(N) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j \quad (1.5)$$

$$L_j = \sum_{j=1}^N X_j - jM(N) \quad (1.6)$$

$$R(N) = \max_{1 \leq j \leq N} L_j - \min_{1 \leq j \leq N} L_j \quad (1.7)$$

Tādā veidā, $M(N)$ ir vidējā ienākošā plūsma N gados, L_j ir starpība starp kopējo ienākošo plūsmu pirmajos j gados un kopējo izejas plūsmu šajos pašos gados, $R(N)$ ir starpība starp maksimālo un minimālo L_j vērtībām šajos gados. Acīmredzami, ka diapazons ir atkarīgs no laika intervāla N un tā nav funkcija, kas samazinās no N . Ievērosim, ka parametrs R nebūs vienāds ar laika rindas X_j diapazonu, kuru var noteikt šādi:

$$\text{Range}(X, N) = \max_{1 \leq j \leq N} X_j - \min_{1 \leq j \leq N} X_j \quad (1.8)$$

Tā vietā, mēs varam apskatīt L_j kā uzkrāto lielumu, no kura laika rindas vidējā vērtība atšķiras momentā j . Tādā veidā, R būs vienāds ar lielumu, kas noteiktajā veidā labāk raksturo X lieluma izmaiņas.

Hersts izpētīja vairākus fenomenus un izveidoja normalizēto bezdimensiju lielumu R/S , kas apraksta izmaiņas, kur S ir selektīvais vidējais lielums:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [X_k - M(N)]^2} \quad (1.9)$$

Savā ziņā, gan R , gan S lielumi mēra datu izmaiņas. Lielums R ir lineāri atkarīgs no datiem, savukārt lielums S ievēro uzdoto vērtību kvadrātus. Hersts nosauca šādu uzvedību par mainīgo mērogu diapazonu. Viņš noteica, ka

daudziem dabiskajiem fenomeniem, tajā skaitā arī ūdens līmeņa pieaugumam upēs un koku gada gredzeniem, R/S funkcijas raksturs atkarībā no N ir labi aprakstāms ar sekojošo empīrisko formulu lielajām N vērtībām:

$$R/S \sim (N/2)^H, \text{ when } H > 0.5 \quad (1.10)$$

Var viegli pārlicināties par to arī grafiski, ja izveidot R/S atkarības grafiku no N logaritmiskajā mērogā. Hersts noteica, ka daudzi datu punkti atrodas taisnē, bet šīs taisnes slīpums nosaka parametru H augstāk dotajā formulā.

Var parādīt, ka jebkuram īstermiņa procesam attiecība R/S paliek asimptotiski proporcionāla $N/2$ lielumam, ja $H = 0.5$. Bet Hersts noteica fenomenus, kuriem H vērtība mainījās robežās no 0.7 līdz 0.9. Tādas augstas H vērtības paredz augsto datu daudzveidību.

Hersta parametrs tiks izmantots kā galvenais parametrs laika rindas vai procesa sevlīdzīguma noteikšanai šajā darbā.

1.3 Problēmas izklāsts

Ievērojot augstāk pateikto, var apskatīt šādas problēmas bezvadu mobilajās sistēmās:

- Sistēmas pārslodze, kas noved pie:
- Augstām aizturēm un
- Pakešu zudumiem
- Neefektīvā resursa vadība (procesors, atmiņa, kanāla caurlaides spēja)

Problēmu atrisināšanai jāizpēta, kā apstrādes mezgli (piekļuves punkti) apstrādā pieprasījumus - kā uzvedas rinda, cik liels ir relaksācijas laiks sistēmai. Zinot to, ka mūsu rīcībā ir ierobežoti resursi un buferatmiņas apjoms arī ir ierobežots, kā arī zinot pašreizējā trafika parametrus un momentu, kad mēs varam pieņemt pieprasījumu no jaunā lietotāja, varētu izveidot MBAC mehānismu apstrādes mezgla resursu vadībai.

Pašreizējais pētījums apskata sistēmas vidējā pieprasījumu skaita noteikšanas problēmu un sistēmas relaksācijas laika novērtēšanu dažādiem reāliem trafika parametriem. Bet, pirms uzsākt pārejas režīma izpēti, no sākuma ir jāizpēta bezvadu trafika parametrus un to dabu. Nākamā sadaļa ir veltīta bezvadu trafika izpētei.

2

Bezvadu tīkla trafiks

2.1 Eksperiments

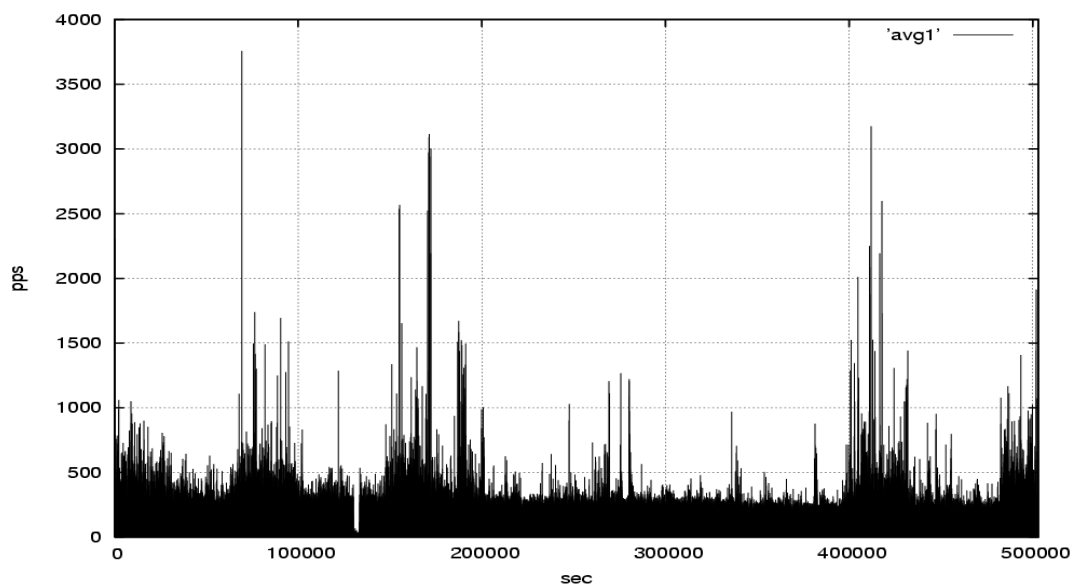
Atšķirībā no daudziem iepriekš veiktajiem pētījumiem par trafika analīzi vada tīklos (pārsvarā Ethernet tīklos), šajā darbā tika uzkrāts un analizēts kompānijas intraneta bezvadu tīkla trafiks.

Tiek parādīts, ka trafiks bezvadu datortīklos ir arī sevlīdzīgs un tam piemīt ilgtermiņa korelācija. Tāpēc aparatūras ražošanas, programmatūras izstrādes kompānijām un Interneta pakalpojumu sniedzējiem būtu jāievēro tas un neizmantot klasiskus trafika modeļus.

Apskatot visas iespējamās metodes tīkla trafika statistikas uzkrāšanai, tika pieņemts lēmums izveidot savu SNMP klientu uzstādīto maršrutētāju monitoringam. Ar pilno aprakstu un šī klienta izejas kodu var iepazīties pilnajā tēžu tekstā.

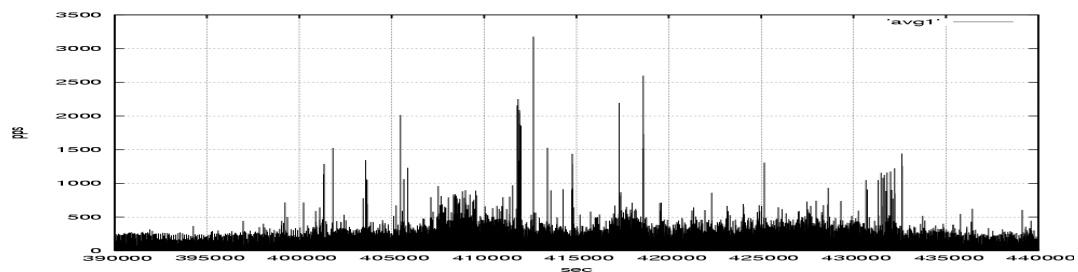
2.2 Eksperimentālie dati

2.1.att. ir parādīts ienākošais trafiks (paketes sekundē), kas tika uzkrāts no bezvadu maršrutētāja sešu dienu laikā.

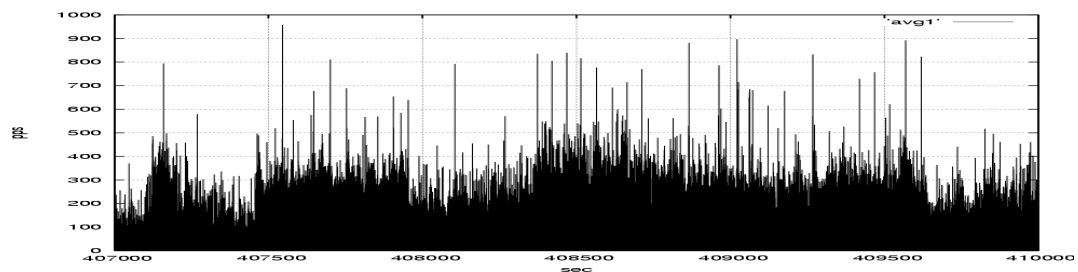


Attēls 2.1: Bezvadu tīkla trafiks, sešu dienu periods

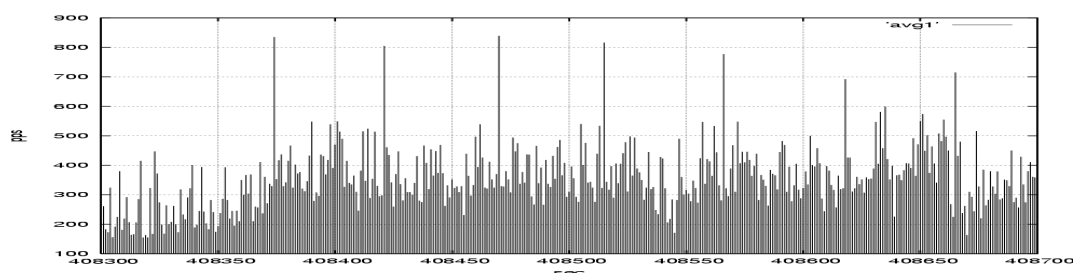
Trafika uzliesmojumi ir skaidri redzami 2.1.att., kas ļauj veikt pieņēmumu, ka trafiks varētu būt sevlīdzīgs. Var redzēt arī to, ka piektdien, agri no rīta nebija datu no maršrutētāja noteiktajā laika posmā barošanas pārtraukumu dēļ. 2.2.-2.5.att. ir parādīts trafiks dažādos x mērogos.



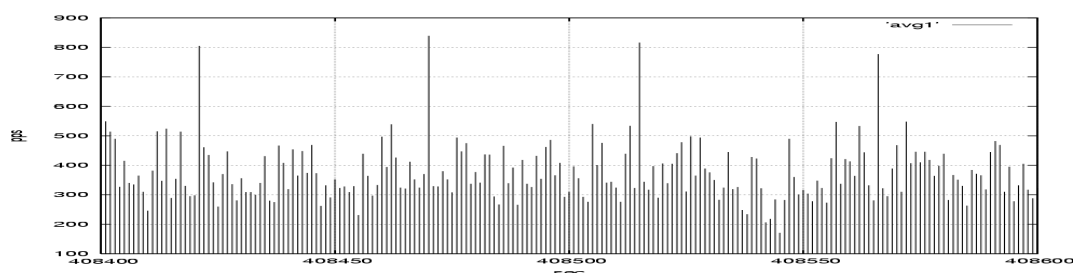
Attēls 2.2: Bezvadu tīkla trafiks, vienas dienas periods



Attēls 2.3: Bezvadu tīkla trafiks, vienas stundas periods



Attēls 2.4: Bezvadu tīkla trafiks, 7 minūšu periods



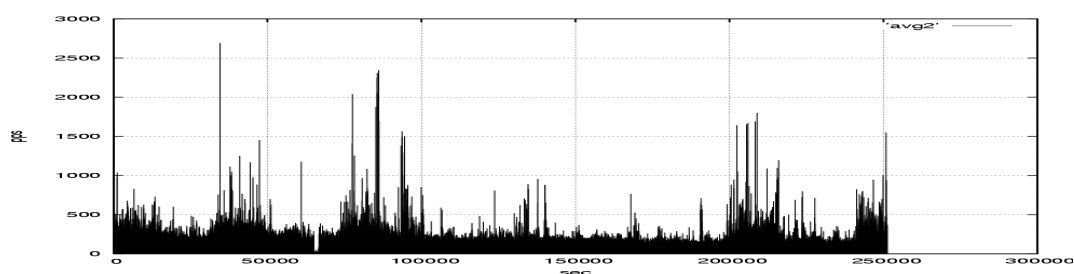
Attēls 2.5: Bezvadu tīkla trafiks, 3 minūšu periods

Attēli augstāk parāda, ka vizuāli trafiks ir sevlīdzīgs pie dažādiem mērogiem. Bet lai mēs to varētu droši apgalvot, jāveic statistiskie aprēķini visiem uzkrātiem datiem. Ar tādas statistiskās analīzes metodēm un līdzekļiem var iepazīties pilnajā tēžu tekstā.

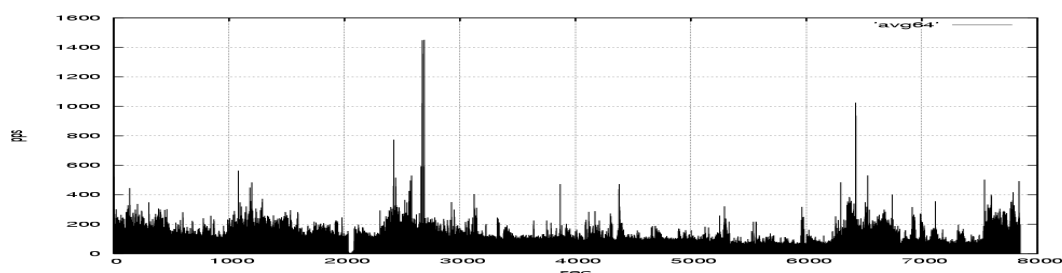
2.3 Trafika analīzes rezultāti

Šajā nodaļā mēs apskatīsim analīzes rezultātus tam pašam datu kopumam, kas tika apskatīts 2.2.nodaļā.

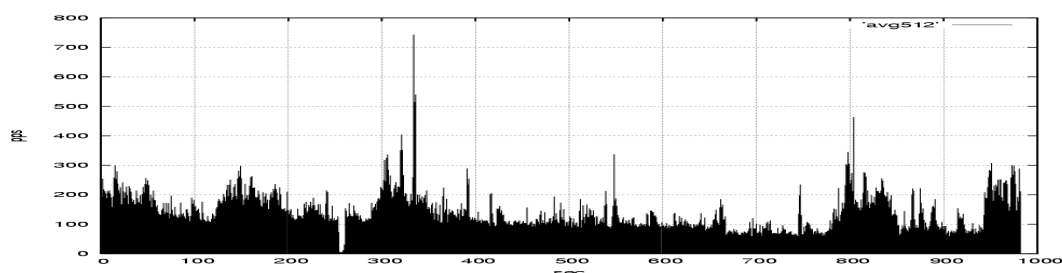
Vispirms apskatīsim agregētus procesus. 2.6.-2.8.att. ir parādīts agregētais trafiks, kuru veidoja 2.2.nodaļā aprakstītā programma. Katrā attēlā mērogs palielinās divreiz, t.i. pirmajā attēlā trafiku agregē ar 2 vērtībām, otrajā - ar 4 vērtībām, u.t.t.



Attēls 2.6: Bezvadu tīkla trafiks, agregēšanas pakāpe 2



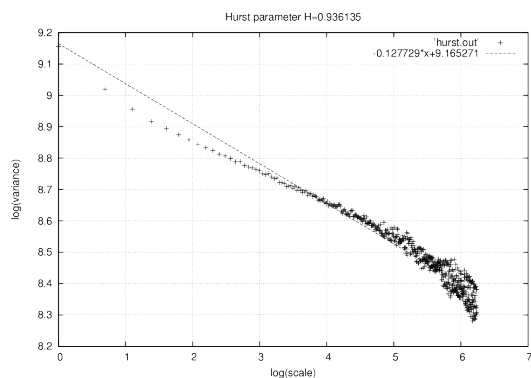
Attēls 2.7: Bezvadu tīkla trafiks, agregēšanas pakāpe 64



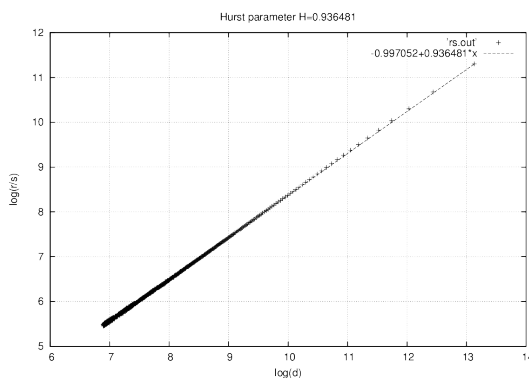
Attēls 2.8: Bezvadu tīkla trafiks, agregēšanas pakāpe 512

Grafiki augstāk parāda, ka trafikam nepazūd uzliesmojumu raksturs un tas vizuāli saglabājās nemainīgs pat pie augstām agregēšanas pakāpēm, salīdzinājumā ar procesiem, kas nav sevlīdzīgie [21].

Tagad novērtēsim Hersta parametru 2.9.att.



(a) Dispersijas-laika atkarības grafiks

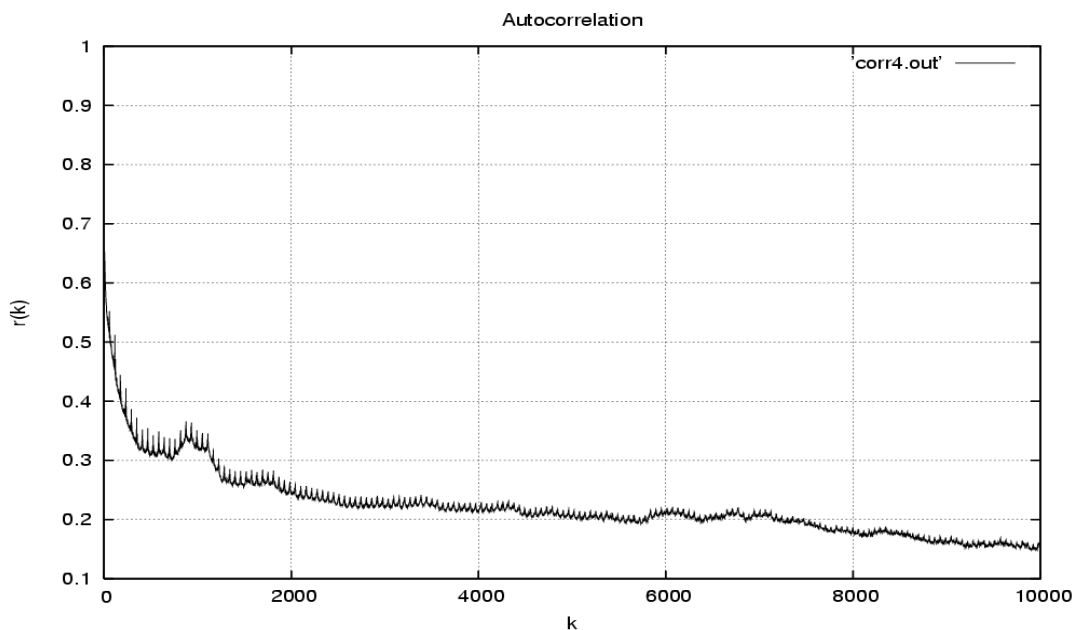


(b) R/S statistikas grafiks

Attēls 2.9: H novērtēšana bezvadu tīkla trafikam

Abas metodes dod ļoti līdzīgus rezultātus - novērtētais Hersta parametrs $H = 0.936$ norāda uz to, ka trafiks, kas tika analizēts, ir ļoti sevlīdzīgs.

Un pēdējais, pirmās 10000 autokorelācijas funkcijas vērtības ir parādītas 2.10.att.



Attēls 2.10: Bezvadu tīkla trafika autokorelācija, pirmās 10000 vērtības

Grafikā ir skaidri redzams, ka autokorelācijas funkcija nesamazinās līdz nullei vismaz divu dienu laika posmā. Tas nozīmē, ka procesam piemīt ilgtermiņa korelācija un paketes, kas tiek padoti secības sākumā un, piemēram, vienu dienu vēlāk ir joprojām statistiski korelēti.

2.4 Analīzes rezultāti

Vairāki pētījumi (piem., [6, 18, 20]) parāda ka trafiks vadu tīklos ir sevlīdzīgs. Šajā sadaļā mēs analizējam lielu datu apjomu, kas tika uzkrāts bezvadu tīklā no maršrutētāja. Rezultāti parāda, ka trafiks bezvadu tīklā arī ir sevlīdzīgs un tam piemīt ilgtermiņa korelācija. Šis pētījums noved pie secinājuma: trafika modeļi, kas paredz, ka ienākošo pakešu plūsma ir Puasona process, nevar būt piemērojami bezvadu tīklu praktiskajā modelēšanā. Tādu modeļu vietā jāizmanto sevlīdzīgā trafika modeļus, kas labāk atspoguļos realitāti.

3

Pārejas procesu izpētes metodes

Diemžēl pastāv tikai dažas trafika pārejas režīmu pētīšanas metodes - lielākoties, rindošanas teorijā tiek paredzēts stacionārais režīms. Vienīgo tīri analītisko metodi izstrādāja A.Kaufmans un R.Kruons [27], kas ļauj analizēt vidējo pieprasījumu skaitu sistēmā jebkurā laika momentā, ja intervāli starp pieprasījumiem ir sadalīti pēc eksponenciālā likuma. Citu metodi, kuras pamatā ir difūzijas aproksimācija, piedāvāja H.Kobayashi [15, 16]. Bez vidējā rindas garuma, tā ļauj modelēt situāciju ar vairākiem klientiem sistēmā. H.Kobayashi metode tika modificēta, lai varētu veikt sevlīdzīgas plūsmas simulāciju. Bet, kā autors zemāk parādīs, vienīgā droša metode pārejas procesu pētīšanai ir simulācija, it īpaši kad runa iet par sevlīdzīgo trafiku, kuram nevar pielietot pašlaik pastāvošas tīri analītiskās metodes.

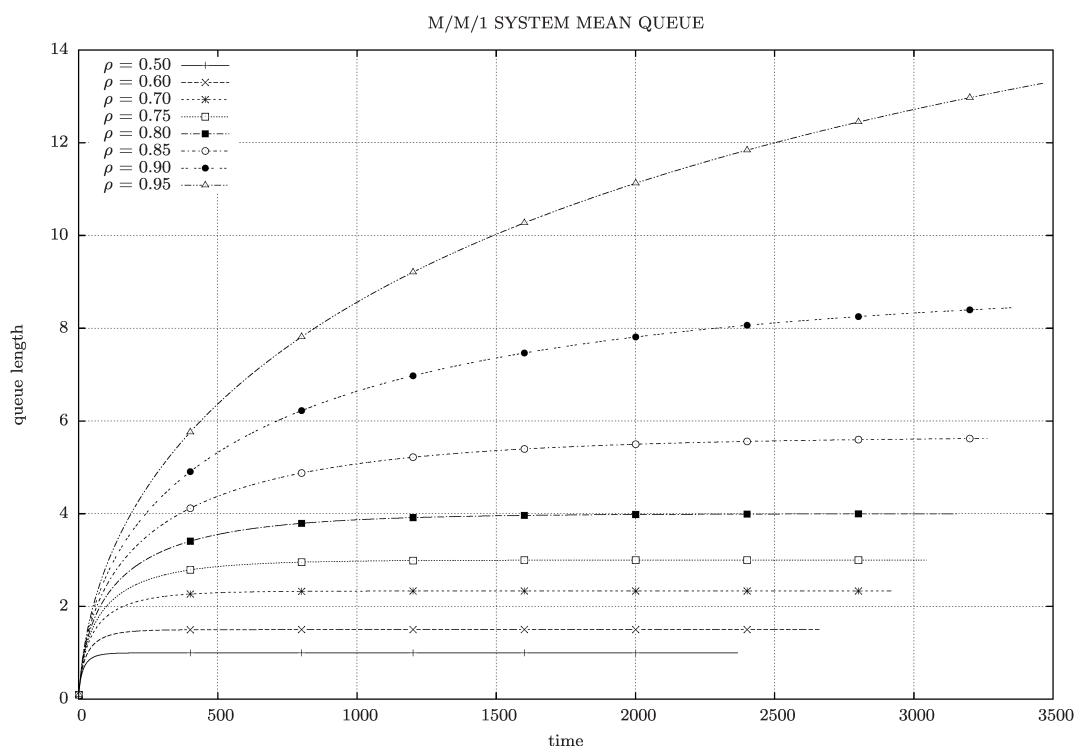
3.1 Analītiskā metode

Ar analītisko metodi mēs saprotam vienādojumu vai vienādojumu sistēmu, ar kuru ir iespējams noteikt sistēmas vidējo rindas garumu jebkurā laika momentā. Tomēr, pat vienkāršākajām $M/M/1$ sistēmās matemātiskais aparāts ir pārāk sarežģīts, nerunājot par sistēmām ar pieprasījumiem, kuru sadalījums atšķiras no Puasona sadalījuma. Kā mums ir zināms, nepastāv analītiskās metodes trafikam ar intervāliem pēc atšķirīgā no Puasona sadalījuma,

savukārt vienīgā metode Puasona sadalījumam ir izstrādāta [27]. Tās būtībā ir vienādojums 3.1.

$$\bar{n}(t) = (\lambda - \mu)t + \mu \int_0^t e^{-(\lambda+\mu)\tau} \cdot \left[I_0(2\tau\sqrt{\lambda\mu}) + \frac{1}{\sqrt{\Psi}} I_1(2\tau\sqrt{\lambda\mu}) + (1 - \Psi) \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\Psi^k}} I_k(2\tau\sqrt{\lambda\mu}) \right] d\tau \quad (3.1)$$

kur λ ir ieejas plūsmas intensitāte, μ ir apkalpošanas intensitāte, $\Psi = \lambda/\mu$ ir noslodzes koeficients un I_x ir pirmā veida x kārtas modificēta Besela funkcija. Vienādojums 3.1 no [27] dod iespēju noteikt vidējo rindas garumu sistēmā jebkurā laika momentā. Taču pielietot to var tikai $M/M/1$ sistēmām, kur ienākošo pieprasījumu plūsma pakļaujas Puasona likumam. Tomēr, pamēģināsim izpētīt, kā mainās relaksācijas laiks pie dažādām noslodzes koeficienta vērtībām. 3.1.att. parādītas $M/M/1$ sistēmas vidējā rindas garuma $\bar{n}(t)$ izmaiņas laikā t .



Attēls 3.1: $M/M/1$ sistēmas vidējās rindas sistēmas izmaiņas

3.1.att. skaidri redzams - sistēmas relaksācijas laiks, t.i. laiks, kas nepieciešams sistēmai lai iestātos stacionārais režīms, palielinās līdz ar noslodzes ρ pieaugumu. Kad sistēmā iestājas stacionārais režīms (t.i. $t \rightarrow \infty$) vidējais

rindas garums $\bar{n}(t)$ pakļaujas 3.2 pēc [13, 14]

$$\bar{n} = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (3.2)$$

Šie rezultāti dod mums informāciju par to, kā relaksācijas laiks mainās $M/M/1$ rindošanas sistēmā. Tomēr mūs vairāk interesē sistēma ar sevlīdzīgo pieprasījumu plūsmu, t.i. $P/M/1$ sistēma ar Pareto sadalīto vidējo laiku starp pieprasījumiem. Kā varēja redzēt 2.nodaļā, tas vairāk atbilstu patiesībai. Tāpēc pāriesim pie nākamās nodaļas.

3.2 Difūzijas aproksimācija

Sistēmas analīzei pārejas nestacionārajā operešanas režīmā autors nolēma pamēģināt izmantot difūzijas aproksimācijas metodi. Šajā gadījumā, pērtamais modelis ir cikliskais noslēgtais modelis, kuru veido terminālu sistēma un tīkla serveris, kura vispārīgo atrisinājumu ieguva H.Kobayashi [15, 16]. Modelis tika modificēts ar mērķi izveidot tādu pieprasījumu plūsmu apkalpošanas mezglam, kas būtu tuva sevlīdzīgai.

3.2.1 Matemātiskais modelis

Komunikāciju sistēmas modeli veido serveris, kura vidējais apstrādes laiks ir μ_1 . Terminālu apakšsistēma padod pieprasījumus servera ieejā. Pieprasījumi, kas tiek apstrādāti ar serveri, atgriežas terminālu sistēmai, kas apstrādā tos ar vidējo apstrādes laiku μ_2 . Kopējais pieprasījumu skaits, kas cirkulē sistēmā ir vienāds ar N . Tādējādi, mums ir noslēgtās cilpas sistēma. Šo modeli var uzskatīt par ekvivalentu servera modelim ar ierobežotu pieprasījumu buferatmiņas apjomu N , kura ieejā tiek padota pieprasījumu plūsma.

Pieprasījumu plūsma var būt patvaļīga un pieprasījumu intervālu raksturojumus nosaka tikai pirmais moments μ_1 un dispersija σ_2^2 .

Ir zināms, ka viens no sevlīdzīgā trafika modeļiem ir pieprasījumu plūsma, kurai pieprasījumu intervālus var aprakstīt ar garās astes sadalījumu. Viens no svarīgākajiem raksturojumiem tādiem sadalījumiem ir tas, ka dispersija tiecās uz bezgalību, bet viens no izplatītākajiem likumiem tādu intervālu aprakstīšanai ir Pareto sadalījuma likums. Varbūtību blīvums gadījumlielumam X ar tādu sadalījuma likumu var būt pierakstīts šādi:

$$f(x) = \frac{\alpha}{k} \left(\frac{k}{x} \right)^{\alpha+1} \quad (3.3)$$

Šeit $x > k$ un $k > 0$. Ja $\alpha \leq 2$, tad $\sigma^2 \rightarrow \infty$, savukārt ja $\alpha \leq 1$, tad gan vidējā vērtība, gan dispersija tiecās uz bezgalību.

Šajā darbā nav iespējams stingri atkārtot Pareto likumu pieprasījumu intervālu sadalījuma aprakstīšanai. Tomēr, pētījuma autors piedāvā palielināt dispersiju un, tāpat, arī variācijas koeficientu

$$C = \frac{\sigma^2}{\mu^2} \quad (3.4)$$

kur μ ir vidējais intervāla ilgums starp pieprasījumiem. Pētījumā tikā pieņemts, ka vidējās vērtības lielums ir ierobežots, bet dispersija palielinās līdz lielajam skaitlim, kā tas notiek sevlīdzīgajā trafikā.

Darba apskatāmajā modelī tiek uzskatīts, ka terminālu sistēmai $\sigma_2^2 \rightarrow \infty$ un $\mu_2 = \text{const}$. Tāda mezgla izejas plūsma, un, tāpat servera ieejas plūsma, būs tuva sevlīdzīgajai. Tādas sistēmas ieejā ir Puasona plūsma ar vidējo apstrādes laiku μ_1 un vidējo sistēmas noslodzes koeficientu ψ .

Iedomāsimies ciklisko sistēmu, kur apstrādes laiks terminālā i pakļaujas sadalījuma likumam ar vidējo vērtību μ_i un variācijas koeficientu C_i , $i = 1, 2$. Sistēmai ir noslēgta cilpa, tāpat N ir kopējais pieprasījumu skaits sistēmā, $N = \text{const}$. Definēsim difūzijas procesu, kas aproksimē vidējo pieprasījumu skaitu sistēmā $n_1(t)$ pēc $x(t)$. Tādā gadījumā, attiecīgais difūzijas vienādojums izskatīsies šādi:

$$(\partial/\partial t) p(x_0, x; t) = \frac{1}{2} \alpha (\partial^2/\partial x^2) p(x_0, x; t) - \beta (\partial/\partial x) p(x_0, x; t) \quad (3.5)$$

kur $\alpha = C_1/\mu_1 + C_2/\mu_2$ un $\beta = 1/\mu_2 - 1/\mu_1$. Aprēķinot vienādojumu ar ierobežojuma nosacījumiem $0 \leq x(t) \leq N + 1$ visiem $t \geq 0$ un mērogu transformāciju

$$\begin{aligned} y &= \frac{x}{|\alpha/\beta|} = \frac{x}{|(C_1 + C_2\rho)/(1 - \rho)|} \\ \tau &= \frac{t}{|\alpha/\beta^2|} = \frac{t}{|\mu_1(C_1 + C_2\rho)/(1 - \rho)^2|} \end{aligned} \quad (3.6)$$

kur $\rho = \mu_1/\mu_2$. Rezultātā atbrīvojamies no koordinātēm difūzijas vienādojumā:

$$(\partial/\partial \tau) p(y_0, y; \tau) = \frac{1}{2} (\partial^2/\partial y^2) p(y_0, y; \tau) - \delta (\partial/\partial y) p(y_0, y; \tau) \quad (3.7)$$

Ievērojot divus ierobežojumus $y = 0$ un $y = b$:

$$\frac{1}{2} (\partial/\partial y) p(y_0, y; \tau) - \delta p(y_0, y; \tau) = 0 \quad \text{at } y = 0 \text{ and } y = b \quad (3.8)$$

kur

$$\delta = \begin{cases} 1, & \rho < 1 \\ 0, & \rho = 1 \\ -1, & \rho > 1 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$b = \frac{N+1}{|(C_1 + C_2\rho)/(1-\rho)|}$$

Pielietojot ‘īpašfunkciju sadalīšanas’ metodi, iegūsim šādu 3.7 atrisinājumu:

$$p(y_0, y; \tau) = \begin{cases} 2\delta e^{2\delta y} / (e^{2\delta b} - 1) + \exp[\delta(y - y_0 - \delta\tau/2)] \cdot \\ \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(y) \phi_n(y_0) \exp(-\lambda_n^2 \tau/2), & \text{when } 0 \leq y \leq b \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3.10)$$

kure $\phi_n(y)$ un $\phi_n(y_0)$ ir īpašfunkcijas ar attiecīgajām īpašvērtībām λ_n :

$$\phi_n(y) = [2\lambda_n^2 / b(\lambda_n^2 + 1)]^{\frac{1}{2}} \{ \cos \lambda_n y + (\delta/\lambda_n) \sin \lambda_n y \} \quad (3.11)$$

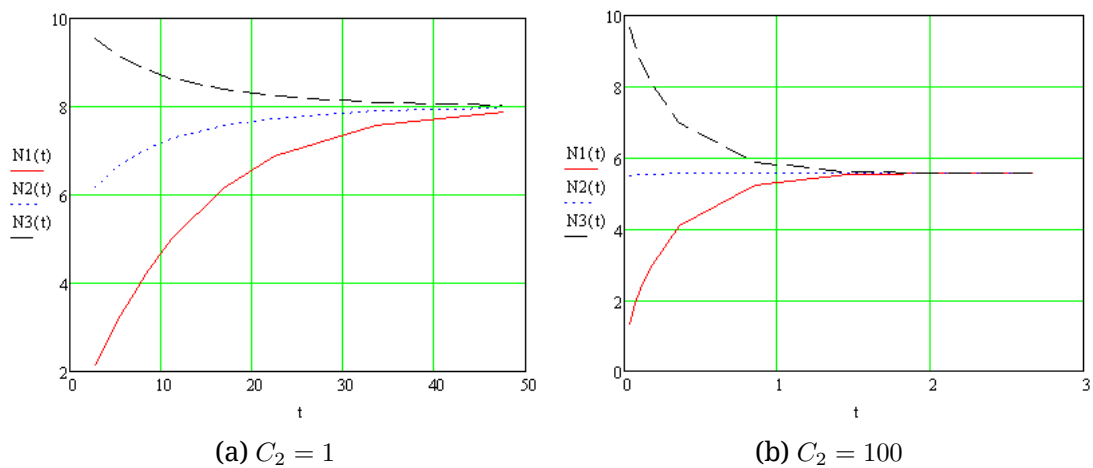
Pirmais 3.10 saskaitāmais ir stacionārā režīma varbūtība, bet otrais - pārejas režīma sastāvdaļa, kss tiek izteikta ar īpašfunkciju sadalīšanu. Jāatzīmē, ka 3.10 apmierina sākuma nosacījumu $y = y_0$, t.i. $p(y_0, y; \tau) = \delta(y - y_0)$, jo delta funkciju izsaka sadalot to īpašfunkcijās.. Otrais 3.10 saskaitāmais ir bezgalīgā rinda, bet to var labi aproksimēt ar galīgo rindu, jo koeficients $\exp(-\frac{1}{2}\lambda_n^2 \tau)$ tuvojas nullei, palielinoties n .

3.2.2 Modelēšanas rezultāti

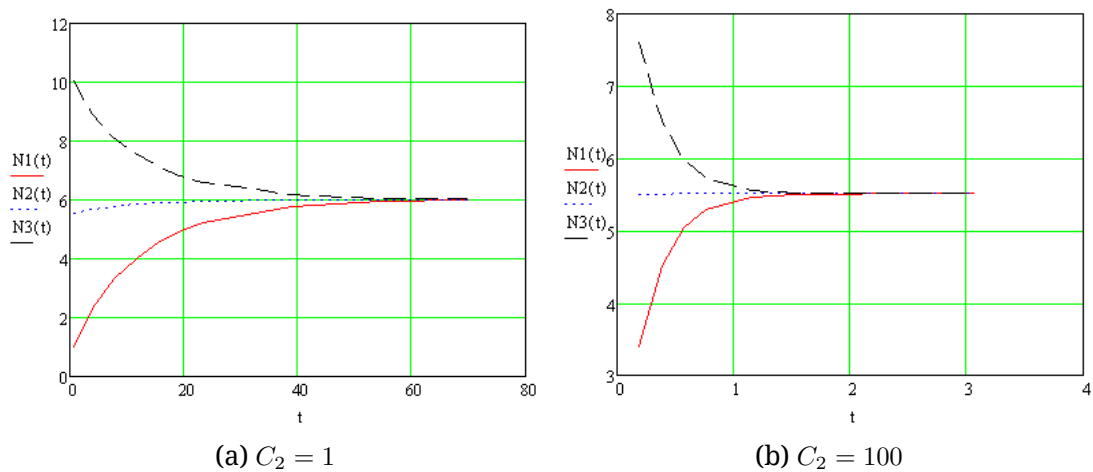
Palielinot C_2 no vieninieka līdz simtam, mēs mēģinām simulēt sevlīdzīgo trafika plūsmu. Vienlaicīgi, mēs mainām arī servera noslodzes koeficientu $\rho = 0.75, 0.95$, lai redzētu kā sistēma uzvedīsies pie dažādām noslodzēm. Pieprasījumu skaits sistēmā N tika uzstādīts vienāds ar 10 un palika nemainīgs.

Šeit mēs parādīsim tikai dažus galvenus grafikus, kas parāda ierīces uzvedību. Pilnais grafiku kopums ir pieejams pilnajā tēzu tekstā.

3.2.,3.3.att. ir parādīti H.Kobayashi modificētā modeļa pielietošanas rezultāti pie dažādiem sākuma nosacījumiem: sākuma pieprasījumu skaits n ir nulle, 5 un 10, kas atbilst attiecīgi līknēm $N1(t)$, $N2(t)$ un $N3(t)$..



Attēls 3.2: Sistēmas pieprasījumu skaits, $\rho = 0.75$



Attēls 3.3: Sistēmas pieprasījumu skaits, $\rho = 0.95$

3.1., 3.2., 3.3. tabulās ir apkopoti veiktās aproksimācijas rezultāti. Vidējais rindas garums sistēmā n ir sniegts stacionārajam režīmam, kad pārejas režīms ir beidzies.

C_2	1	5	50	100
$n, \rho = 0.95$	6.013	5.675	5.521	5.511
$n, \rho = 0.75$	7.969	6.533	5.631	5.566

Tabula 3.1: Sistēmas pieprasījumu skaits n

C_2	1	5	50	100
$P_{rej}, \rho = 0.95$	0.116	0.099	0.092	0.091
$P_{rej}, \rho = 0.75$	0.258	0.145	0.097	0.094

Tabula 3.2: Apkalpošanas atteikuma varbūtība P_{rej}

C_2	1	5	50	100
$T_{relax}, \rho = 0.95$	39.0	18.4	2.328	1.152
$T_{relax}, \rho = 0.75$	47.6	18.24	2.464	1.459

Tabula 3.3: Relaksācijas laiks T_{relax}

Kā var redzēt no tabulām un grafikiem, adaptētais Kobayashi modelis dod ļoti apšaubāmus rezultātus. No vienas puses, mēs nezinām tieši kā apstrādes ierīces vidējais pieprasījumu skaits uzvedās sevlīdzīgā trafika gadījumā un tam, ka n samazinās līdz ar variācijas C_2 pieaugumu, nevajadzētu rast aizdomas. Bet no otras puses, mēs zinām - gan pieprasījumu skaits, gan pieprasījumu zudumu varbūtībai ir jāpalielinās pieaugot noslodzes koeficientam ρ . Modelēšanas rezultāti, savukārt, liecina par pretējo. Šis fakts lika autoram apšaubīt tāda modeļa pielietojamību sevlīdzīgā trafika sistēmu modelēšanā. Tika paredzēts arī tas, ka relaksācijas laiks pieaugs līdz ar C_2 palielinājumu. Kā ir parādīts tālākajā pētījumā, kas pieejams tēzu pilnajā tekstā, šis aizdomas bija pamatotas un H.Kobayashi modeli, pat ar veiktajām modifikācijām, nevar pielietot sistēmas modelēšanai sevlīdzīgā trafika gadījumos.

3.3 Simulācija

Kā varēja redzēt iepriekšējā nodaļā, difūzijas aproksimācijas rezultāti nav pārāk pārliecinoši. Pēdējais mēģinājums pārejas procesu izpētē ir simulācija. Šajā gadījumā, simulācija iekļauj sevī $M/M/1/K$ un $P/M/1/K$ rindošanas modeļu realizāciju, sevlīdzīgā trafika ģenerēšanu $P/M/1/K$ gadījumā un vairāku klientu piekļuves metožu simulācija.

Veikto pētījumu rezultāti tika pilnīgi apstiprināti ar simulācijas rezultātiem. Tapēc šai metodei tēzu pilnajā tekstā tiek veltīta vesela sadaļa.

4

Pārejas procesu simulācija

No sākuma veiksīm $M/M/1/K$ sistēmas simulāciju un salīdzināsim rezultātus ar analītisko modeli - tiem ir jābūt līdzīgiem. Ja $M/M/1/K$ simulācija strādās, mēs varēsim veikt $P/M/1/K$ simulāciju, uzskatot ka arī tā dos ticamus rezultātus tādai rindošanas sistēmai.

Pirms autors izveidoja savu simulācijas līdzekli, viņš apskatīja arī citus. Tajā skaitā bija Omnet++, NS3 un citas simulāciju paketes. Visas ir pietiekami labas un uzticamas, tās plaši pielieto universitātēs un citās pētnieciskajās iestādēs. Bet tajā pašā laikā visām nepieciešamas prasmes, un, tāpat arī laiks to apgūšanai, lai varētu nokonfigurēt simulātoru nepieciešamo rezultātu iegūšanai.

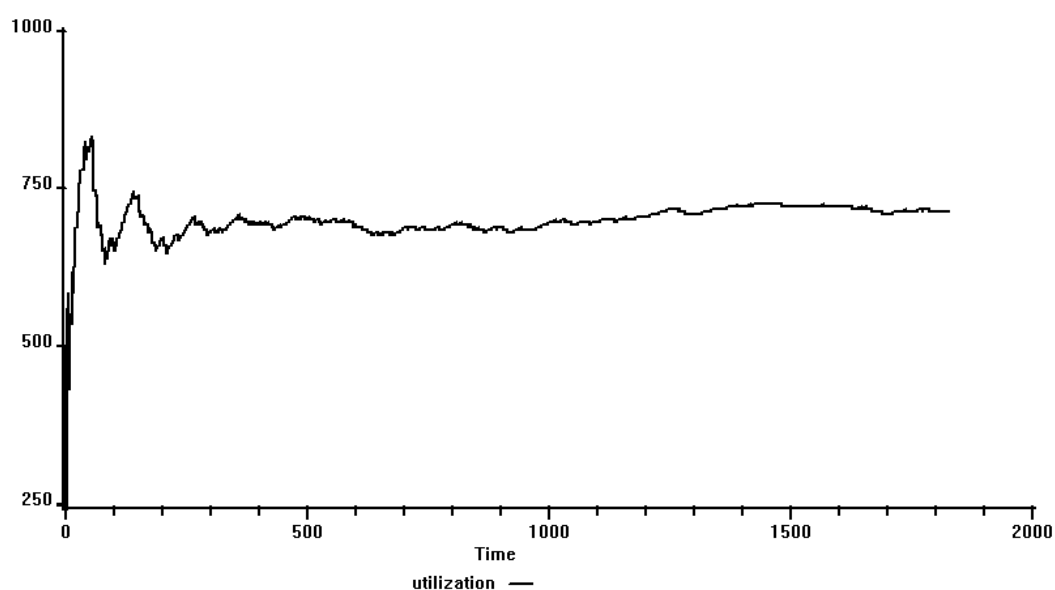
Vienlaicīgi, viens pietiekami vecs un ļoti labs līdzeklis, nodrošina samērā vienkāršo skriptu valodu simulācijas nolūkiem. Tāpēc tika nolemts izmēģināt tieši to kā galveno variantu.

4.1 GPSS

GPSS (General Purpose Simulation System) bija viena no pirmajām simulācijas sistēmām. Tā tika izveidota diskrešu notikumu modelēšanai 1960. gadā un bija ļoti populāra. Viens no GPSS popularitātes iemesliem ir tā komandas. Īsa, vienkārši saprotamais GPSS modelis prasīt daudz vairāk koda rindu

citās programmēšanas valodās līdzīgā mērķa sasniegšanai. GPSS lietotājam ir iespēja koncentrēties uz svarīgajām veidotā modeļa īpatnībām, par cik valoda pati uzkrāj statistiku un veido atskaiti tabulas veidā, kā arī izpilda citus uzdevumus, ar kuriem lietotājs labprāt nenodarbotos. Pat mūsdienās GPSS izmanto studenti koledžās un universitātēs simulācijas pasaules pamatu apgūšanai. Autors paņēma vienu no GPSS realizācijām [3] kas paredz bezmaksas izmantošanu studentiem un to ierobežojumos var veidot gan $M/M/1/K$, gan $P/M/1/K$ rindošanas sistēmu modeļus.

No sākuma pārbaudīsim GPSS piemērotību abiem modeļiem: gan $M/M/1$, gan $P/M/1$. 4.1.,4.2.att. parādītas noslodzes koeficienta izmaiņas laikā.



Attēls 4.1: $M/M/1$ sistēmas noslodze, $\lambda = 0.7$, $\mu = 1$

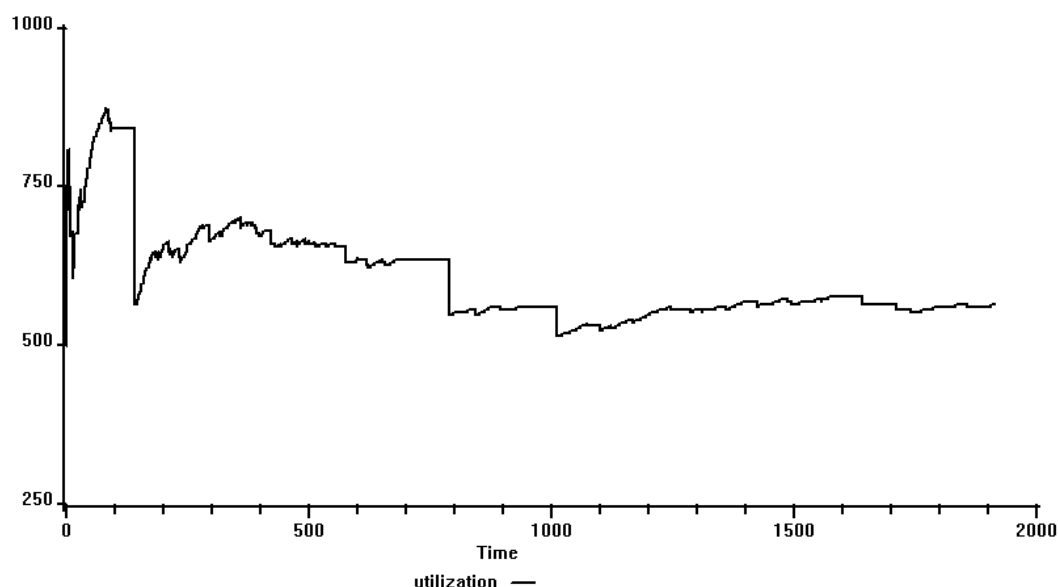
Kā var redzēt no 4.1.att. GPSS nodrošina pareizo stacionārā režīma noslodzes koeficienta novērtēšanu $\rho \approx 0.7$, kas ļauj mums uzskatīt, ka ar šo līdzekli var veikt arī $P/M/1$ simulāciju. Veiksim detalizētāko simulācijas rezultātu un analītisko vērtību salīdzinājumu 4.1.tabulā, kur $\rho = \lambda/\mu$.

λ	2	1.82	1.58	1.43	1.33	1.17	1.01
ρ , GPSS	0.503	0.554	0.64	0.707	0.757	0.86	0.993
ρ , theory	0.5	0.549	0.633	0.699	0.752	0.855	0.99
error, %	0.6	0.91	1.11	1.14	0.66	0.58	0.30

Tabula 4.1: GPSS simulācijas salīdzinājums ar analītiskajiem aprēķiniem

Kā var redzēt no tabulas, GPSS simulācija dod ļoti tuvus rezultātus tiem,

kurus var aprēķināt pēc rindošanas teorijas. Taču kā var redzēt no attēliem, simulācijai ir viena būtiska priekšrocība - tā ļauj redzēt kā sistēma strādā laikā, parādot visus lēcienus un anomālijas. Tagad pārbaudīsim $P/M/1$ modeli, veidojot attiecīgo simulāciju.



Attēls 4.2: $P/M/1$ sistēmas noslodze, $\lambda = 0.5$, $\mu = 1$

4.2.att. parādīts, ka pat pie zemākām pieprasījumu intensitātēm $P/M/1$ sistēmas noslodzes raksturs ir ievērojami sarežģītāks, kā to arī varēja sagaidīt. Tas, savukārt, ļauj veikt pretējo secinājumu tam, kas tika iegūts pēc difūzijas aproksimācijas - relaksācijas laikam ir jāpieaug.

Kaut arī GPSS simulācija parāda iespaidīgus rezultātus attiecībā uz ļoti zemu kļūdu salīdzinājumā ar rindošanas teoriju un iespēju veikt simulācijas arī sevlīdzīgajam trafikam, autoram rādījās sekojošās grūtības:

- Ļoti vājas grafiku veidošanas iespējas
- Nav iespējams saglabāt izveidotā procesa datus turpmākajai analīzei
- Ar visu cieņu izstrādātājiem, mums nav zināšanu par iekšējo GPSS uzbūvi, tādā veidā padarot simulācijas atklūdošanu par neiespējamu.

Taču neskatoties uz augstāk aprakstītajām grūtībām, varēja redzēt, ka GPSS simulācija deva pareizus rezultātus vismaz $M/M/1$ sistēmai, atšķirībā no difūzijas aproksimācijas rezultātiem, kas tika iegūti iepriekšējā sadaļā. GPSS problēmas un labi simulācijas rezultāti iedvesmoja autoru izveidot savu simulācijas programmu, kas tiks aprakstīta nākamajā nodaļā.

4.2 Pārejas procesu simulācija

4.2.1 Modelis

Kā tika minēts, mēs veidojam divu rindošanas sistēmu simulācijas ar vienīgo apstrādes ierīci, vai serveri. Pirmajai no tām pieprasījumu plūsmai piemīt eksponenciāli sadalītais vidējais laiks T_a starp pieprasījumiem un eksponenciāli sadalītais vidējais apkalpošanas laiks T_s . Rindošanas teorijā tādas sistēmas sauc par $M/M/1$. Otrajai sistēmai pieprasījumu plūsma ir sevlīdzīga. Šo sevlīdzīgumu panāk ar Pareto sadalījuma izmantošanu, t.i. vidējais laiks starp pieprasījumiem ir sadalīts pēc Pareto likuma. Vidējais apkalpošanas laiks otrajā sistēmā arī ir eksponenciāli sadalīts un vienāds ar pirmās sistēmas vidējo apkalpošanas laiku - T_s . Autors sauc tādas sistēmas par $P/M/1$.

Lai varētu korekti salīdzināt $M/M/1$ un $P/M/1$ simulāciju rezultātus, nepieciešams novērtēt matemātiskās cerības laikam starp pieprasījumiem, tādējādi iegūstot 4.1.

$$T_a = \frac{kx_m}{k-1} \quad (4.1)$$

Kur k un x_m ir Pareto sadalījuma parametri - formas un nobīdes parametri, attiecīgi, kurus var aprēķināt pēc uzdotā Hersta koeficienta H un pieprasījumu intensitāti $\lambda = 1/T_a$ $M/M/1$ sistēmā. No labi zināmās Hersta parametra formulas [21] var viegli novērtēt k :

$$k = 3 - 2H \quad (4.2)$$

Tālāk, izmantojot 4.1 un 4.2, iegūsim x_m izteiksmē 4.3, tādējādi aprēķinot visus nepieciešamus sadalījuma parametrus pieprasījumu plūsmas simulācijai pie uzdotās Hersta parametra H vērtības.

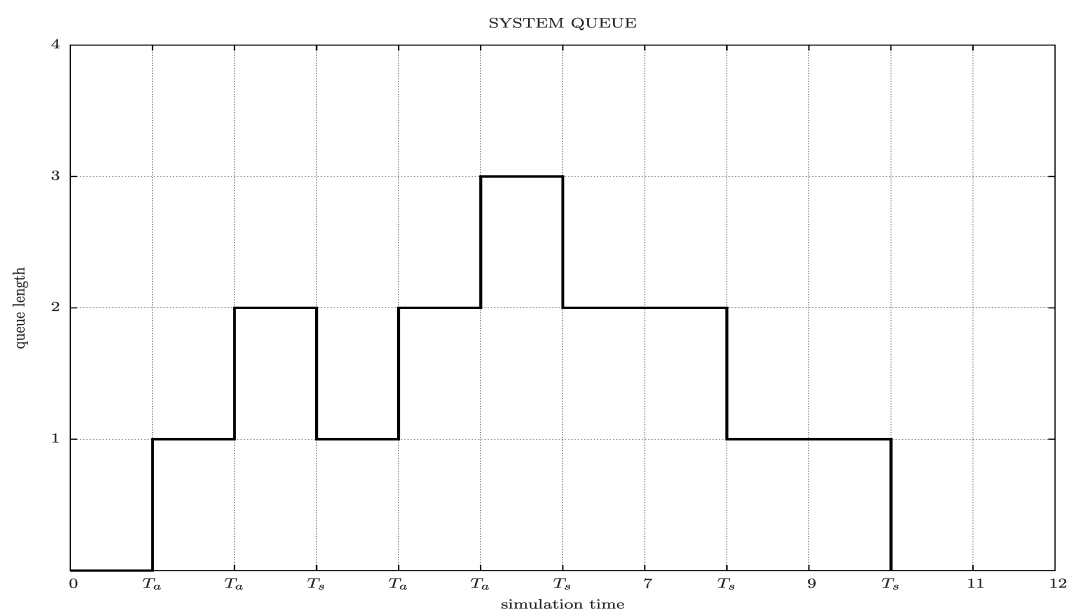
$$x_m = \frac{kT_a - T_a}{k} = T_a - \frac{T_a}{k} = T_a - \frac{T_a}{3 - 2H} \quad (4.3)$$

Pasvītroyam, ka pieprasījumu intensitātei simulācijā jābūt tādai pašai, lai varētu veikt rezultātu salīdzinājumu. Atzīmēsim arī to, ka 4.3 ir spēkā tikai ja $k > 1$, tātad $0 \leq H < 1$. Savukārt mūs interesē tādas H koeficienta vērtības, pie kurām ienākošais trafiks būtu sevlīdzīgs, t.i. $0.5 < H < 1$. [21].

Zemāk tiks parādīts, ka $M/M/1$ sistēmas simulācijas rezultāti un to analītiskās vērtības ir ļoti tuvas, kas dod mums iespēju paļauties arī uz $P/M/1$ sistēmas simulāciju. Apskatīsim simulācijas līdzekli sīkāk.

4.2.2 Simulācijas līdzeklis

Pētījumu laikā tika izveidotas vairākas programmas C, Perl un Bash valodās. Galvenā ideja ir apmēram tāda pati kā programmā GPSS World - simulācijas laiku palielina ar soli, tiek ģenerēts laik starp pieprasījumiem T_a un apstrādes T_s . Atkarībā no simulācijas laika pieprasījums var būt pievienots rindai vai arī izņemts no tās. Tādā veidā mums ir informācija par katrām izmaiņām simulētajā sistēmā. 4.3.att. ir parādīts laika diagrammas piemērs. Par cik simulācijas pulkstenis nav sinhronizēts, veidojās problēma ar vidējo pieprasījumu skaita noteikšanu sistēmā, kuru var atrisināt ar laukuma aprēķināšanu zem rindas “līknes” un tās dalīšanu ar pagājušo laiku katrā solī. Buferatmiņa ierobežo maksimālo rindas garumu - ja rindas garums ir lielāks par uzdoto buferatmiņas apjomu, tad šis pieprasījums netiek pieņemts (tiek atmests).



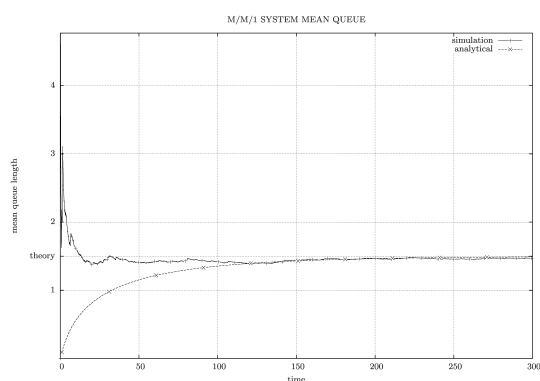
Attēls 4.3: Simulētās sistēmas laika diagrammas piemērs

Pilnajam izveidotā rīka aprakstam, lūdzu apskatiet pilno tēžu tekstu.

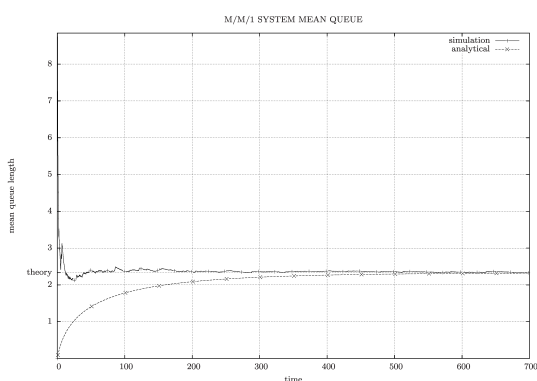
4.3 Simulācijas rezultāti

4.3.1 Simulācijas un analītisko rezultātu salīdzinājums

Lai pārliecinātos, ka mūsu simulācijas līdzeklis strādā pareizi, salīdzināsim rezultātus ar analītiskās metodes vērtībām un novērtēsim, cik precīzais ir vidējais pieprasījumu skaits sistēmā stacionārajā režīmā $\bar{n} = \rho / (1 - \rho)$. Simulācijas rezultāti ir atainoti 4.4.att. un 4.5.att.

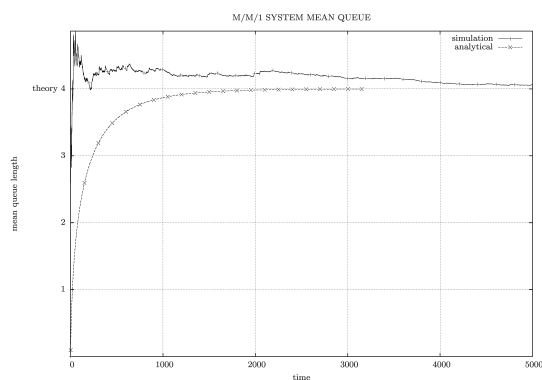


(a) $M/M/1$ simulācija, $\rho = 0.6$

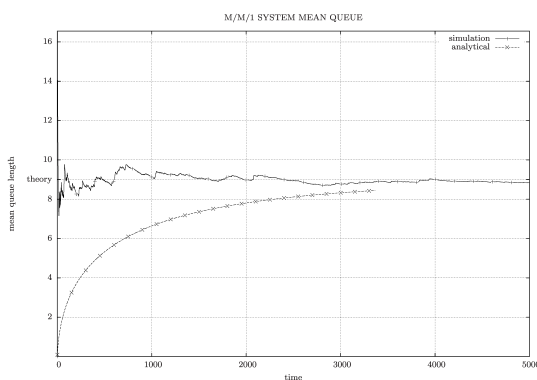


(b) $M/M/1$ simulācija, $\rho = 0.7$

Attēls 4.4: $M/M/1$ simulācijas salīdzinājums ar analītisko modeli



(a) $M/M/1$ simulācija, $\rho = 0.8$



(b) $M/M/1$ simulācija, $\rho = 0.9$

Attēls 4.5: $M/M/1$ simulācijas salīdzinājums ar analītisko modeli

Var redzēt, ka simulācijas rezultātā iegūtā vidējā pieprasījumu skaits ir ļoti tuvs teorētiskajai vērtībai, kā arī relaksācijas laiki arī ir tuvi analītisko metožu vērtībām. Tagad salīdzināsim skaitļus. 4.2.tabulā ir apkopoti rezultāti no atēliem augstāk.

ρ	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
$\bar{n}$, Teorētiskā	1.5	2.333	3	4	5.667	9	19
$\bar{n}$, Analītiskā	1.5	2.333	2.999	3.998	5.623	8.447	13.282
$\bar{n}$, Simulācijas	1.487	2.340	2.962	4.061	5.585	8.898	18.921

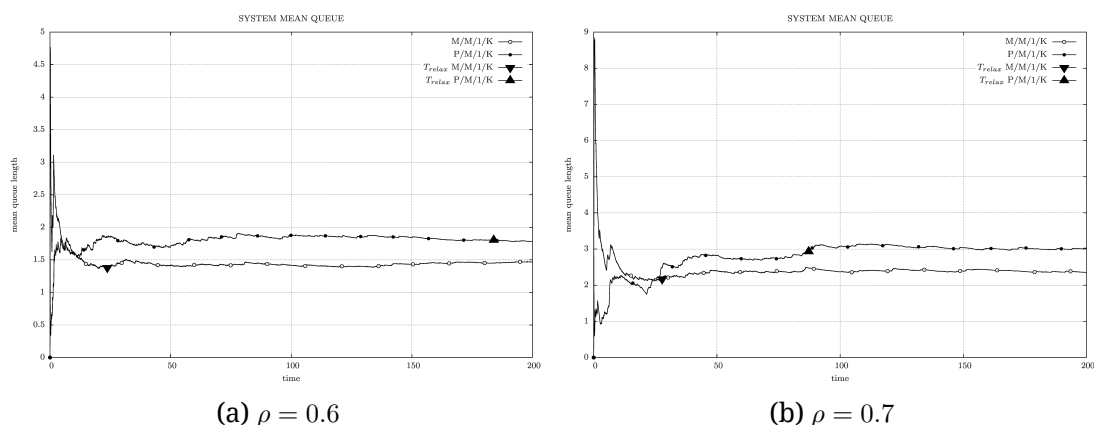
Tabula 4.2: Simulācijas salīdzinājums ar rindošanas teoriju

Kaut arī analītiskie rezultāti ir precīzi tādi paši, kādus varēja sagaidīt teorētiski pie zemākām noslodzes koeficienta vērtībām, tās pietiekami atšķiras pēdējās divās kolonnās. Tas notiek aprēķinu kļūdas rezultātā - Octave funkci-

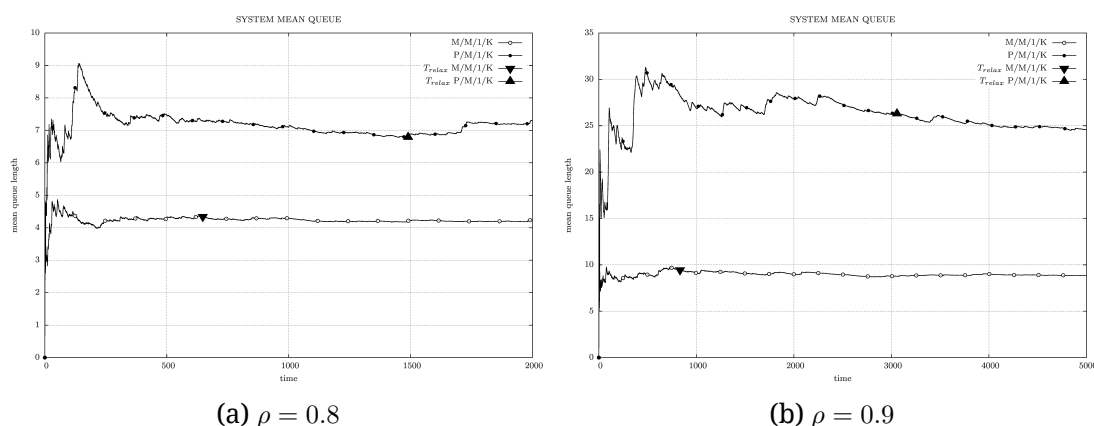
jas nevarēja veikt turpmāko aprēķinu un atgriez kļūdu, tāpēc dati tika izgriezti. No citas puses, var redzēt ka simulācijas līdzeklis izveda precīzās vērtības attiecībā uz teorētiskajām vērtībām. Tagad, kad ir pārliecība par simulācijas līdzekļa pareizo darbību, mēs atstāsim teorētiski sagaidāmās vērtības un pāriesim pie $M/M/1/K$ un $P/M/1/K$ simulāciju salīdzinājuma.

4.3.2 $M/M/1/K$ un $P/M/1/K$ salīdzinājums

Tagad mēs esam daudz tuvāki mūsu galvenajai interesei - pārejas procesiem rindošanas sistēmās, it īpaši sistēmās ar sevlīdzīgo ienākošo pieprasījumu plūsmu (mūsu gadījumā tā ir $P/M/1/K$). 4.6.att. un 4.7.att. ir parādīti $M/M/1/K$ un $P/M/1/K$ simulāciju salīdzinājuma rezultāti.



Attēls 4.6: $M/M/1/K$ un $P/M/1/K$ salīdzinājums, $H = 0.7$



Attēls 4.7: $M/M/1/K$ un $P/M/1/K$ salīdzinājums, $H = 0.7$

Attēlos augstāk ir parādīts, ka $M/M/1/K$ un $P/M/1/K$ sistēmu rindas raksturs atšķiras pie dažādiem noslodzes koeficientiem ρ . Kaut arī mēs izvēlē-

jamies pietiekami zemo sevlīdzīguma pakāpi $H = 0.7$, atšķirības ir ievērojamā. 4.3., 4.4. tabulās ir apkopoti salīdzinājuma rezultāti.

ρ	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
$\bar{n}, M/M/1/K$	1.487	2.340	2.962	4.061	5.585	8.898	18.921
$\bar{n}, P/M/1/K$	1.685	3.151	4.508	7.299	11.672	24.567	77.703

Tabula 4.3: $M/M/1/K$ un $P/M/1/K$ salīdzinājums, vidējais rindas garums

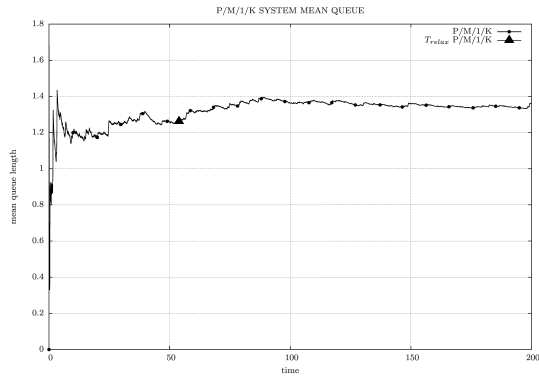
ρ	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
$T_{relax}, M/M/1/K$	23.75	27.79	134.27	647.64	265.85	832.06	2928.59
$T_{relax}, P/M/1/K$	183.92	87.26	519.55	1489.79	1471.84	3056.63	4286.55

Tabula 4.4: $M/M/1/K$ un $P/M/1/K$ salīdzinājums, relaksācijas laiks

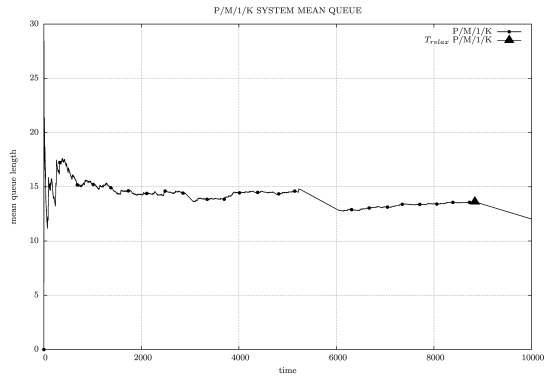
No tabulām un attēliem var redzēt, ka vidējais rindas garumam un simulācijas laikam ir ievērojami lielākas vērtības $P/M/1/K$ gadījumā, nekā $M/M/1/K$. Jāatzīmē, ka noslodzes koeficients ρ pieprasījumu plūsmai ar Pareto sadalījumu nav pilnīgi korekts - tas ievērojami atšķiras no $M/M/1/K$ aprēķiniem, īpaši kad sevlīdzīguma parametrs H ir liels. Mēs apskatīsim šo apsvērumu nākamajā nodaļā. Kā jau bija zināms, un mēs to pierādījām ar šīs simulācijas rezultātiem, $M/M/1/K$ sistēma atšķiras ļoti stipri no sistēmas ar sevlīdzīgo ienākošo trafiku, t.i. no reālajām pasaules rindošanas sistēmām. Tāpēc turpmāk veltīsim visu uzmanību tikai $P/M/1/K$ sistēmas simulācijai.

4.3.3 $P/M/1/K$

Šajā simulāciju virknē mēs mainīsim ρ no 0.6 līdz 0.95 un novērosim izmaiņas, kas notiks pēc H parametra palielināšanas no 0.6 līdz 0.9 katrai ρ vērtībai. Šeit un turpmāk mēs apskatīsim ρ kā vidējā apkalpošanas laika T_s attiecību pret vidējo laiku starp pieprasījumiem T_a , t.i. T_s/T_a vai λ/μ , kā tas būtu $M/M/1$ sistēmā. Savukārt reālo noslodzes koeficientu $P/M/1$ sistēmai, kas tiek aprēķināts simulācijas gaitā, mēs apzīmēsim ar U_p . 4.8.-4.11.att. ir parādīti šīs simulāciju sērijas rezultāti.

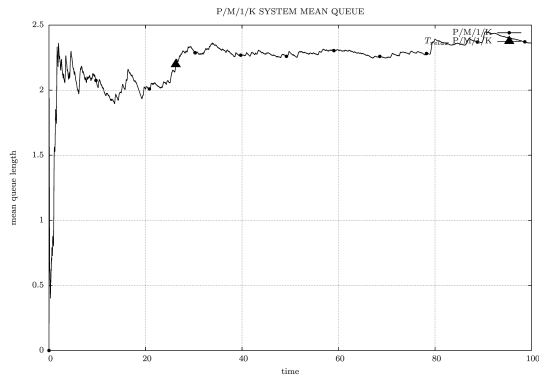


(a) $H = 0.6$

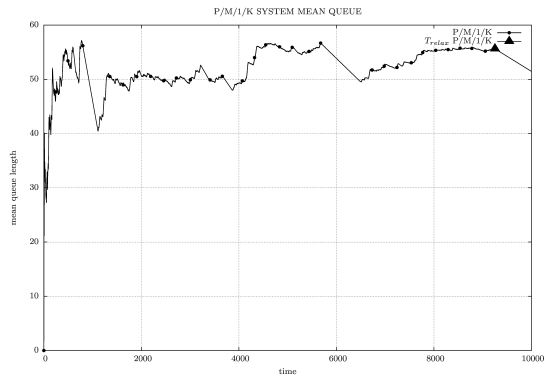


(b) $H = 0.9$

Attēls 4.8: $P/M/1/K$ simulācija, $\rho = 0.6$

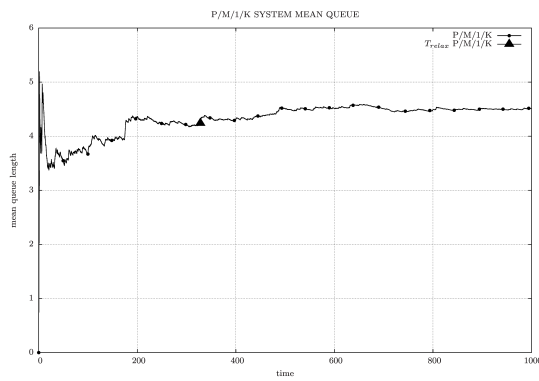


(a) $H = 0.6$

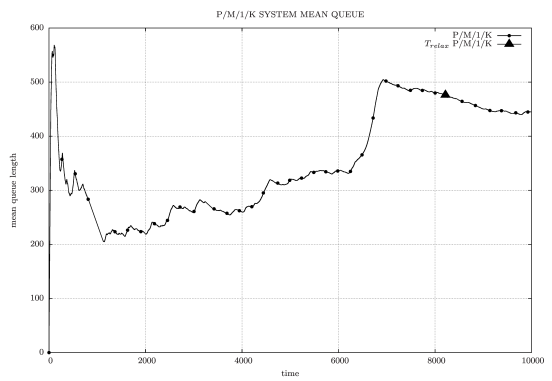


(b) $H = 0.9$

Attēls 4.9: $P/M/1/K$ simulācija, $\rho = 0.7$

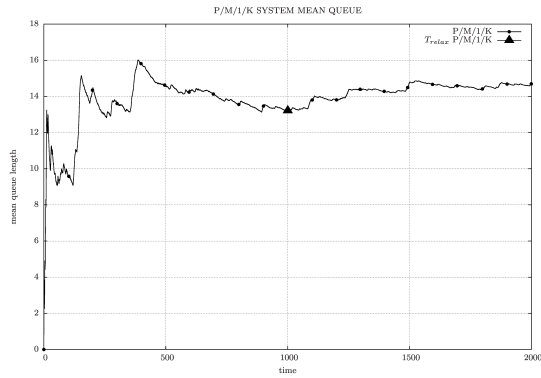


(a) $H = 0.6$

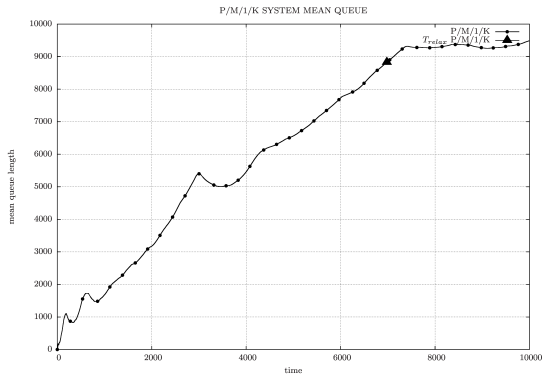


(b) $H = 0.9$

Attēls 4.10: $P/M/1/K$ simulācija, $\rho = 0.8$



(a) $H = 0.6$



(b) $H = 0.9$

Attēls 4.11: $P/M/1/K$ simulācija, $\rho = 0.9$

Savukārt 4.5., 4.6., 4.7. tabulās zemāk ir apkopoti šo simulāciju rezultāti.

ρ	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
$H = 0.6$	1.358	2.372	3.194	4.558	7.376	14.203
$H = 0.7$	1.682	3.109	4.526	7.086	11.825	24.598
$H = 0.8$	2.694	5.896	9.493	17.162	33.462	95.155
$H = 0.9$	12.030	51.453	137.776	444.868	1276.517	9489.977

Tabula 4.5: $P/M/1/K$ vidējais rindas garums $\bar{n}$ dažādiem parametriem

ρ	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
$H = 0.6$	0.598	0.702	0.750	0.796	0.848	0.901
$H = 0.7$	0.602	0.696	0.754	0.801	0.845	0.885
$H = 0.8$	0.611	0.692	0.742	0.779	0.821	0.868
$H = 0.9$	0.653	0.701	0.694	0.872	0.848	0.992

Tabula 4.6: $P/M/1/K$ noslodzes koeficients U_p dažādiem parametriem

ρ	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
$H = 0.6$	53.888	26.272	354.372	327.967	87.822	1000.364
$H = 0.7$	184.353	85.493	436.840	236.371	1480.721	3051.891
$H = 0.8$	113.705	1144.486	1361.760	5586.714	6872.655	8921.949
$H = 0.9$	8838.261	9249.404	8300.975	8215.723	8150.110	6978.514

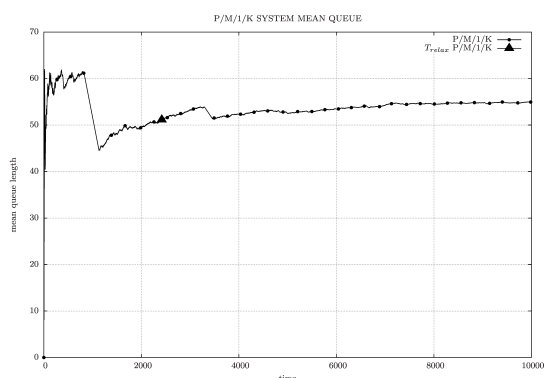
Tabula 4.7: $P/M/1/K$ sistēmas relaksācijas laiks T_{relax} dažādiem parametriem

Kā var redzēt, pēdējās rindās un kolonnās nav adekvātās vērtības. Spriežot pēc attiecīgajiem attēliem var secināt, kas sistēma ir nestabila visā simulācijas laikā - tā uzkrāj arvien vairāk un vairāk paketes buferatmiņā, bet nepaspēj apstrādāt tos visus. Tā ir tipiskā situācija, un tieši tāpēc arī ierobežo buferatmiņas apjomu visā tīklu aparatūrā. Pamēģināsim ieviest ierobežota apjoma buferatmiņu mūsu simulācijā. Kā piemēru, paņemsim Linux operētājsistēmas kodola [5] bufera apjomu. Pakešu rinda buferī mainās atšķirīgajiem draiveriem, bet vidēji tā sastāda 100 paketes. Šajā simulācijā mēs izmantosim tikai vērtības $H = 0.8$ un $H = 0.9$, visu kolonnu, pie kurām efekts novērojams visstiprāk.

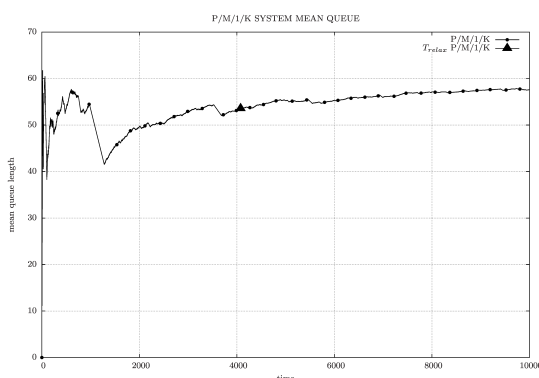
Rezultāti ir apvienoti 4.8.-4.11.tabulās un 4.12.att. ir parādītas visstiprāk ietekmētās sistēmas (citām sistēmām, lūdzu, skatāties pilno darba tekstu).

ρ	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
$H = 0.8$	2.694	5.944	9.411	16.375	27.296	42.345
$H = 0.9$	12.573	28.601	36.518	49.335	54.963	57.590

Tabula 4.8: $P/M/1/K$ vidējais rindas garums $\bar{n}$, $K = 100$



(a) $\rho = 0.85$



(b) $\rho = 0.9$

Attēls 4.12: $P/M/1/K$ simulācija, $H = 0.9$, $K = 100$

ρ	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
$H = 0.8$	0.611	0.692	0.742	0.779	0.823	0.878
$H = 0.9$	0.576	0.624	0.794	0.782	0.806	0.796

Tabula 4.9: $P/M/1/K$ sistēmas noslodzes koeficients U_p , $K = 100$

ρ	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
$H = 0.8$	113.705	1183.656	1319.189	1949.432	3484.568	1343.704
$H = 0.9$	7920.085	8470.755	8560.601	4176.040	2417.903	4075.193

Tabula 4.10: $P/M/1/K$ sistēmas relaksācijas laiks T_{relax} , $K = 100$

ρ	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
$H = 0.8$	0	0	0	0.001	0.006	0.024
$H = 0.9$	0.002	0.028	0.063	0.098	0.135	0.176

Tabula 4.11: $P/M/1/K$ pakešu zudumu varbūtība P_{loss} , $K = 100$

Attēli un tabulas augstāk parāda ievērojamās uzlabošanas sistēmas relaksācijas laikā un vidējā pieprasījumu skaitā (piem., salīdzinot 4.7., 4.10. tabulas), tomēr par to arī bija jāsamaksā - ar 17% pakešu zudumu varbūtību šajās sistēmās. Acīmredzami, ka pakešu buferatmiņas apjoma palielināšana palīdzēs samazināt pakešu zudumu varbūtību, bet šeit vienmēr ir kompromiss starp atmiņas apjomu un pakešu zudumu varbūtību, kas ir īpaši spēcīgā resursu ierobežotajās un iebūvētajās sistēmās, kur operatīvās atmiņas apjoms ir ļoti ierobežots.

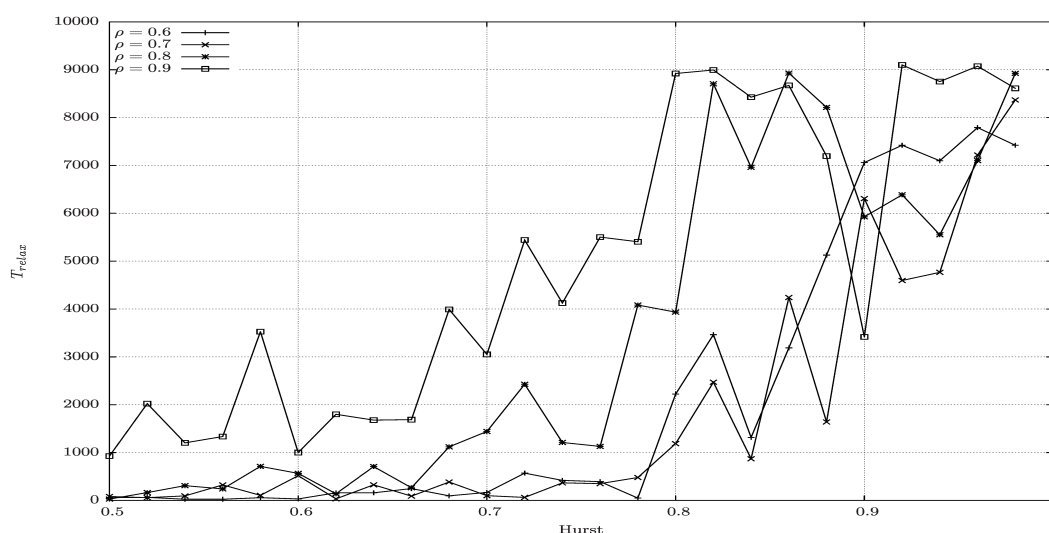
Jāatzīmē arī tas, ka buferatmiņas apjoma palielināšana ne vienmēr ir labākais risinājums. Pavisam nesen J. Gettys atklāja problēmu, kuru sauc "bufferbloat" [8]. Problēma ir ekstensīvā buferizācijā kanālos ar zemu caurlaides spēju un augsto aizturi, tādus, kā piemēram DSL. Tas pilnīgi apiet TCP pārblīves vadību, ja maršrutētājs vai komutators atmet kā nederīgu lielu datu apjomu no buferatmiņas. Rezultātā jāveic atkārtotā pārraide, kas noved pie zemākā pārraides ātruma un augstākās aiztures. Tā ir vēl viena problēma, kuras risinājumam varētu pielietot tādu pašu tehniku, kāda ir MBCAC sistēmās [17]. Sīkāk par "bufferbloat" problēmu ir izklāstīts [1].

4.4 Iegūto rezultātu analīze

Iepriekšējā nodaļā tika iegūti simulācijas rezultāti, taču ne visiem parametriem. Simulācijas parametru spektrs ir daudz plašāks un šajā nodaļā mēs pamēģināsim tos izanalizēt.

4.4.1 Relaksācijas laiks

Ka tika apgalvots augstāk, mūs interesē pārejas procesa relaksācijas laiks T_{relax} , kad galvenais zināmais parametrs ir sevlīdzīguma pakāpe H . Dati, kas tika uzkrāti apmēram 1200 simulāciju gaitā dod mums iespēju izveidot relaksācijas laika T_{relax} atkarību no sevlīdzīguma parametre H un attēlot to grafiski.



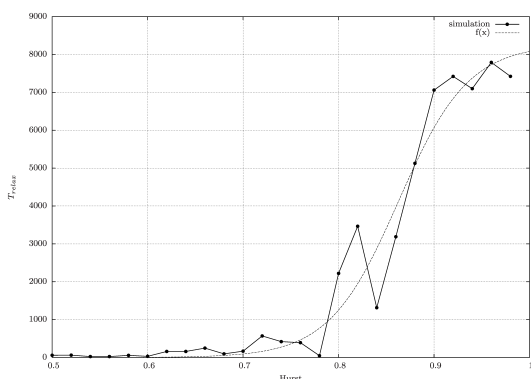
Attēls 4.13: T_{relax} atkarība no H , dažādiem ρ

4.13.att. ir redzams, ka relaksācijas laiks pieaug, palielinoties sevlīdzīguma parametra vērtībai. Kaut arī tas ir labi, ka mums ir reālie vai simulācijas dati, vienmēr būtu vēlams aproksimēt šos datus. Nosakot analītisko izteiksmi, var vienkāršot turpmāko rezultātu izmantošanu. Ar analītiski izteiksmi mēs šeit saprotam tādas funkcijas noteikšanu, kas vislabāk aprakstīs mūsu simulāciju rezultātu punktus. Tādu aproksimāciju var saukt par regresiju vai nelineāro aprakstīšanu. Tāda analīze tika veikta ar Gnuplot programmatūras līdzekļiem, kas dod iespēju noteikt jebkuru formulu eksperimentāli noņemtajiem datim. Par cik iespējamo formulu variantu skaits bija ļoti liels, tika pieņemts lēmums izvēlēties vairākas visvienkāršākās un izplatītākās, kas dotu iespēju ātri un viegli aprēķināt relaksācijas laiku. Tika izvēlēti lineārā, kā visvienkāršākā, eksponenciālā, logaritmiskā un Verhulsta izteiksmes. Pēdējā izteiksme tika izvēlēta tāpēc, ka pēc pirmsaprēķiniem un grafikiem izskatījās, ka tā varētu labi aprakstīt simulācijas datus. Aprakstīšanas labums tika noteikts pēc vismazākās hi-parametra kvadrāta vērtības, kas parasti tiek aprēķināta kā kvadrātu summa no formulas vērtību un datu punktu starpības, kas arī parāda, cik labi tāda formula aproksimē datus. Salīdzinošie hi-kvadrāta vērtību rezultāti tika apkopoti 4.12.tabulā.

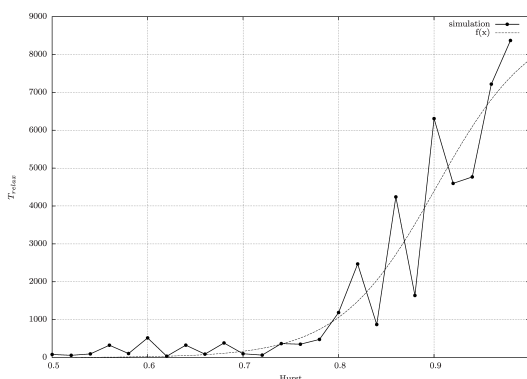
ρ	0.6	0.7	0.8	0.9
Lineārā, $f(x) = ax + b$	$1.2e + 08$	$8.0e + 07$	$2.3e + 07$	$5.3e + 07$
Eksponenciālā, $f(x) = a \cdot e^{-bx} + c$	$3.4e + 07$	$2.4e + 07$	$2.4e + 07$	$6.0e + 07$
Logaritmiskā, $f(x) = a + b \cdot \ln(x)$	$2.9e + 08$	$3.8e + 08$	$2.8e + 08$	$1.4e + 08$
Verhulsta, $f(x) = \frac{ab \cdot e^{cx}}{a + b(\exp(cx) - 1)}$	$8.7e + 06$	$4.7e + 06$	$1.9e + 07$	$3.3e + 07$

Tabula 4.12: $T_{relax}(H)$ regresijas kļūdas

No 4.12.tabulas var redzēt, ka tieši Verhulsta izteiksme dod vistuvāko aproksimāciju simulācijas datiem. a , b un c ir vienādojuma parametri, kuri tika novērtēti. Lielākajā gadījumu daļā, Verhulsta līkne ir ļoti tuva mūsu datiem, ko var redzēt 4.14., 4.15.att. zemāk.

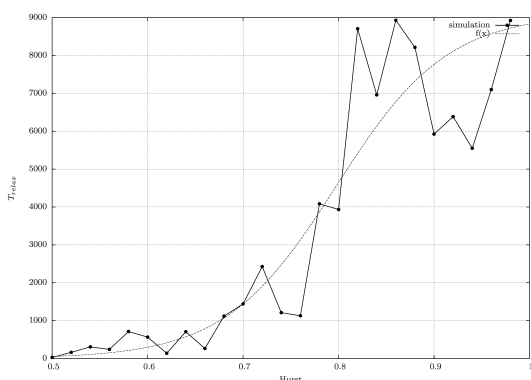


(a) $\rho = 0.6$

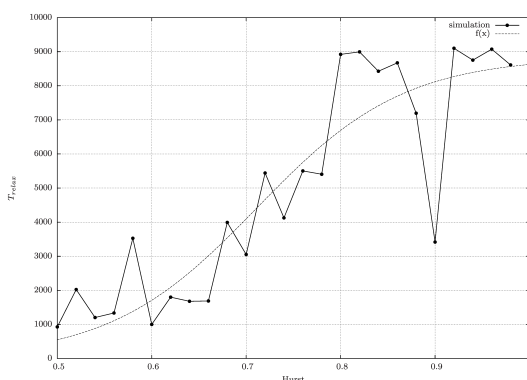


(b) $\rho = 0.7$

Attēls 4.14: $T_{relax}(H)$ Verhulsta regresija



(a) $\rho = 0.8$



(b) $\rho = 0.9$

Attēls 4.15: $T_{relax}(H)$ Verhulsta regresija

Augstāk dotajos attēlos tika izmantoti Verhulsta vienādojumi ar parametriem, kas apkopoti 4.13.tabulā:

ρ	0.6	0.7	0.8	0.9
a	8270.48 +/- 634.6	9015.42 +/- 2311	9105.39 +/- 1176	8838.93 +/- 998.8
b	4.53e-07 +/- 2.16e-06	0.00018 +/- 0.0009	0.0105 +/- 0.0419	0.96 +/- 2.46
c	27.38 +/- 5.65	19.66 +/- 6.19	17.14 +/- 5.229	12.83 +/- 3.80

Tabula 4.13: $T_{relax}(H)$ regresijas novērtētie parametri

Kaut arī 4.13.tabula dod mums novērtēto parametru vērtības formulai, tas nav vispārīgais atrisinājums. Vispārīgā atrisinājuma meklēšanai ir jāastāda sistēmu no trīs diferenciālvienādojumiem katrai ρ vērtībai no testiem un noteikt attiecības un korelācijas starp a , b un c katrai ρ vērtībai. Tāda uzdevuma atrisināšana, visticamāk novestu pie doktora tēzēm matemātikā un ir ārpus šī darba apskata. Tomēr, var izmantot arī tabulas ar aprēķinātām vērtībām praktiskajos nolūkos.

4.4.2 Sevlīdzīgā trafika ģenerēšana

Apskatītie analīzes rezultāti var būt pielietojami MBAC sistēmas veidošanā. Taču autors atklāja vēl vienu ļoti interesantu Verhulsta vienādojuma īpašību, kuru var izmantot trafika ģenerēšanai.

No sākuma atgriezīsimies nedaudz atpakaļ. Verhulsta vienādojum 4.6, kuru mēs izmantojām iepriekš (to sauc arī par loģistisko funkciju) ir vispārīgais atrisinājums diferenciālvienādojumam 4.4, kuru izmantoja pats P-F.Verhulsts populācijas pieauguma modelēšanai un, vēlāk, arī R.May un M.Feigenbaums.

$$\frac{dP}{dt} = rP \left(1 - \frac{P}{K} \right) \quad (4.4)$$

Kur P ir populācijas izmērs, r ir pieauguma ātrums, K ir apjoms un t ir laiks. Izdalot abas puses ar K un veicot substitūciju $x = P/K$, iegūsim diferenciālvienādojumu:

$$\frac{dx}{dt} = rx(1 - x) \quad (4.5)$$

Vispārīgais atrisinājums tādām vienādojumam, ja P_0 ir sākotnējā populācija, būs:

$$P(t) = \frac{K P_0 e^{rt}}{K + P_0 (e^{rt} - 1)} \quad (4.6)$$

Pastāv arī 4.5 diskrētā pieraksta forma, kuru sauc par loģistisko karti:

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n) \quad (4.7)$$

R.May [19] un, vēlāk, arī M.Feigenbaums [7] pētīja 4.7 savos darbos un atklāja tādu interesantu īpašību kā bifurkāciju. Uzzīmējot grafiski vairākas x vērtības attiecībā pret r , mēs iegūsim bifurkācijas diagrammu. To sauc arī par Feigenbauma fraktālu (vai koku), par cik katrs nākamais bifurkācijas punkts grafiski izskatās tāpat, tikai mazākajā mēroga un uzzīmētais atgādina koku.

Tātad, izskatās ka sistēmai, kas apstrādā sevlīdzīgo (vai arī var pateikt fraktālo) trafiku, relaksācijas laiku var labi aproksimēt ar loģistisko līkni no vienas puses, un šis pats diferenciālvienādojums dod rekurento attiecību, kas veido vienu no pazīstamākajiem fraktāliem - no otras puses. Tādējādi autors sagaidīja, ka daži noderīgi rezultāti var būt iegūti no 4.7 sevlīdzīgas laika secības ģenerēšanai, kuru var izmantot trafika ģenerēšanai turpmākajai izmantošanai bezvadu tīkla relaksācijas laika modelēšanai.

No sākuma pārbaudīsim, vai fraktālās orbītas var nodrošināt sevlīdzīgumu. Šeit ar orbītām autors saprot vismaz 100 tūkstoš x iterāciju vērtību ierakstīšanu pie nemainīgās r vērtības un uzdotā x_0 sākuma nosacījuma. [7, 19] ir apgalvots, ka x destabilizējās, sākot ar $r = 3.57$. Tātad, mēs paņemam $r = 3.50$ kā pirmo orbītu un secīgi palielinājam šo vērtību līdz $r = 3.99$ ar soli 0.01, veicot 50 testus. Diemžēl neviens tests nedeva sevlīdzīgo secību, neatkarībā no sākuma vērtības $0.1 < x_0 < 0.5$. Visaugstākā sasniegtā Hersta parametra vērtība bija aptuveni $H = 0.53$ pie $r = 3.96$, savukārt sevlīdzīgajām secībām tai jābūt diapazonā $0.5 < H < 1$ un, kā mēs jau redzējām 2.Sadaļā, reālajam bezvadu tīkla trafikam H pārsniedz 0.9.

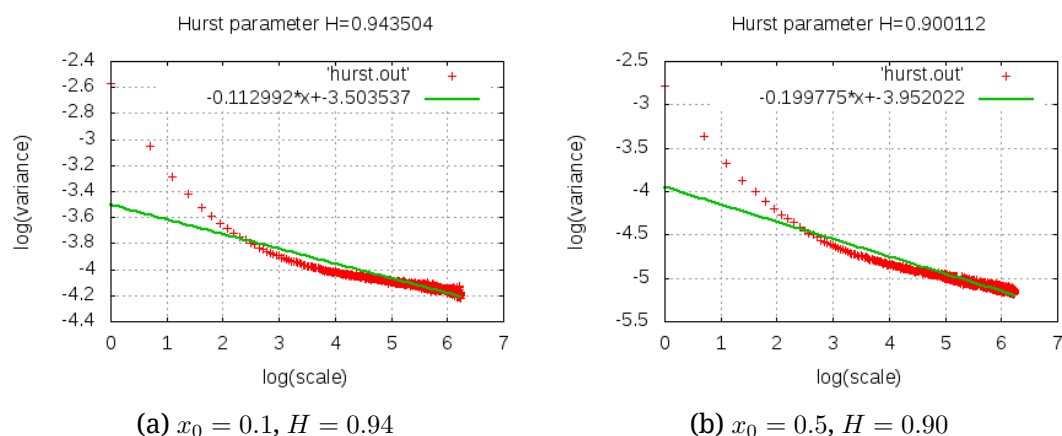
Tomēr, autors mēģināja izmantot 4.7 savādāk - izsekot uzdoto x iterāciju, mainot r vērtību. Tāda pieeja deva ļoti interesantus rezultātus. Autors veica 16575 testus pie r dinamiskā diapazona no $3.50 < r < 3.88$ un līdz $r = 4$. Tika izsekotas x iterācijas ar numuriem no 15 līdz 100, tādā veidā izpildot 3315 testus katrai uzdotajai vērtībai $0.1 < x_0 < 0.5$. Rezultātu pārskats ir pieejams 4.14.tabulā, kura apkopots iegūto sevlīdzīgo secību skaits ar attiecīgajiem Hersta parametra vērtībām, pie tam gan dispersijas-laika, gan R/S testa metodes deva līdzīgus rezultātus.

Hersta parametrs H	Sākuma x_0				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.5 - 0.59	0	2	1	1	0
0.6 - 0.69	134	106	179	142	21
0.7 - 0.79	433	374	743	427	316
0.8 - 0.89	1568	1099	1092	1340	586
0.9 - 0.99	904	1319	776	1090	2206

Tabula 4.14: Ģenerēšanas testu pārskats

No 4.14.tabulas var skaidri redzēt, ka vairāk par 70% no testiem veido secību ar augsto sevlīdzīgumu un vairāk nekā 50% no tiem Hersta koeficients $H > 0.9$. Gandrīz neviena no x iterāciju sekošanas metodēm nedeva Hersta parametru $H < 0.6$, ko autors uzskata par ļoti labu rezultātu.

4.16.att. ir parādīti dispersijas atkarības grafiki no laika novērtētajam Hersta parametram x 90. iterācija pie r sākuma vērtības 3.6, kā arī pie sākuma nosacījumiem $x_0 = 0.1$ un $x_0 = 0.5$, attiecīgi.



Attēls 4.16: H novērtējums x 90. iterācijā, $r = 3.6$

Autoram liekas dabiski ģenerēt sevlīdzīgo procesu no citiem procesiem, kas arī ir sevlīdzīgie, vai fraktālie, savā pamatā. Kaut arī tas joprojām nepaskaidro kā kontrolēt Hersta parametru lai iegūtu prognozējamus rezultātus pēc 4.7, bet pārbaudītus parametrus var pielietot sevlīdzīgā trafika ģenerēšanai, kuru var izmantot bezvadu vai citu tīklu modelēšanai.

5

Nobeigums

5.1 Pētījumu rezultāti un ieguldījumi

Darba gaitā bija sasniegti definētie mērķi un sekojošie nostādījumi apkopo autora pētījumu rezultātus:

- Tika uzkrāts un izanalizēts bezvadu tīklu trafiks. Parādīts, ka tādām trafikam ir sevlīdzīguma īpašības un augsts Hersta koeficients H
- $M/M/1/K$ sistēmas relaksācijas laiks T_{relax} palielinās ar sistēmas noslodzes pieaugumu
- H.Kobayashi modeli, pat ar autora modifikācijām, nevar pielietot sevlīdzīgā trafika sistēmas modelēšanai
- $P/M/1/K$ sistēmas relaksācijas laiks T_{relax} un vidējais pieprasījumu skaits $\bar{n}$ palielinās līdz ar sevlīdzīguma pakāpes H un noslodzes koeficienta ρ pieaugumu
- $P/M/1/K$ sistēmas relaksācijas laiku T_{relax} var aproksimēt ar Verhulsta funkciju
- Var ģenerēt sevlīdzīgo laika secību, izmantojot Verhulsta vienādojumu

Visi punkti tika apspriesti starptautiskajās konferencēs un izklāstīti deviņās autora publikācijās [9, 11, 12, 22–26, 28]

5.2 Iespējamā praktiskā pielietojamība

Darba rezultātu praktiskā pielietošana var iekļaut sevī:

- Sistēmas rindas garuma prognozēšana atkarībā no trafika sevlīdzīguma pakāpes un sistēmas noslodzes koeficienta
- Sistēmas pārejas režīma ilguma prognozēšana atkarībā no trafika parametriem un sistēmas noslodzes koeficienta
- Tīkla ierīces projektēšana - noslodzes plānošana, ierīces veiktspējas parametru plānošana, atmiņas apjoms un rindas garums
- Tīkla plānošana
- Sevlīdzīgā tīkla trafika simulācija

References

- [1] The bufferbloat projects. <http://www.bufferbloat.net/>.
- [2] E-book readers comparison. http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_e-book_readers.
- [3] Gpss world. <http://www.minutemansoftware.com/simulation.htm>.
- [4] Ieee 802.11u. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11u-2011.html>.
- [5] Linux kernel archives. <http://kernel.org/>.
- [6] M.E. Crovella and A. Bestavros. Explaining world wide web traffic self-similarity. Technical report, Boston University Computer Science Department, 1995.
- [7] M.J. Feigenbaum. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. *Journal of statistical physics*, 19(1):25–52, 1978.
- [8] Jim Gettys. Bufferbloat: Dark buffers in the internet. *IEEE Internet Computing*, 15:96, 95, 2011.
- [9] S. Ilnickis, E. Petersons, and R. Jerjomins. Server non-stationary behaviour research at near to self-similar query stream influence. *Electronics And Electrical Engineering*, 59(3):46–51, 2005.
- [10] A. Ipatovs. *Experimental and Analytical Goodput Evaluation of Drive-thru Internet Systems*. PhD thesis, Riga Technical University, 2012.
- [11] R. Jerjomins and E. Petersons. Client-server model non-stationary behaviour research at near self-similar query stream influence under the condition of overloaded terminal system. *Electronics And Electrical Engineering*, 71(7):35–38, 2006.
- [12] R. Jerjomins and E. Petersons. Server non-stationary behaviour research in a wireless network under the condition of self-similar traffic. In *Riga*

Technical University 48th International Scientific Conference, Electronics and Telecommunications, page 9–15. Riga Technical University, 2007.

- [13] L. Kleinrock. *Queueing systems: Computer applications*. Number vol. 2 in Wiley-Interscience Publication. Wiley, 1976.
- [14] L. Kleinrock. *Queueing Systems: Theory*. Number vol. 1 in A Wiley-Interscience publication. Wiley, 1976.
- [15] Hisashi Kobayashi. Application of the diffusion approximation to queueing networks i: Equilibrium queue distributions. *J. ACM*, 21:316–328, April 1974.
- [16] Hisashi Kobayashi. Application of the diffusion approximation to queueing networks ii: Nonequilibrium distributions and applications to computer modeling. *J. ACM*, 21:459–469, July 1974.
- [17] M. Kulikovs. *Research and development of effective managing algorithms in admission control systems for telecommunication networks*. PhD thesis, Riga Technical University, 2010.
- [18] W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, and D.V. Wilson. On the self-similar nature of ethernet traffic. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 23(4):183–193, 1993.
- [19] R.M. May et al. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261(5560):459–467, 1976.
- [20] O. Rose. Estimation of the hurst parameter of long-range dependent time series. *University of Wurzburg, Institute of Computer Science Research Report Series*.—February, 1996.
- [21] W. Stallings. *High-speed networks and internets: performance and quality of service*. William Stallings books on computer and data communications technology. Prentice Hall, 2002.
- [22] R. Yeryomin and E. Petersons. Self-similar traffic in wireless networks. In *Proc. of International Conference Mathematical Methods of Optimization of Telecommunication Networks*.—Minsk: Belarusian State University Press, volume 18, page 49–55, 2005.
- [23] R. Yeryomin and E. Petersons. Server relaxation time at near to self-similar query stream influence. In *Proc. of International Conference Mathematical Methods of Optimization of Telecommunication Networks*.—Minsk: Belarusian State University Press, volume 19, page 87–91, 2007.

- [24] R. Yeryomin and E. Petersons. Transient process relaxation time research under the condition of self-similar traffic input in wireless networks. *Automatic Control and Computer Sciences*, 43(3):138–147, 2009.
- [25] R. Yeryomin and E. Petersons. Analytical estimation of self-similar wireless traffic relaxation time and hurst coefficient dependence. *Electronics And Electrical Engineering*, 108(2):31–34, 2011.
- [26] R. Yeryomin and E. Petersons. Generating self-similar traffic for wireless network simulation. In *Internet Communications (BCFIC Riga), 2011 Baltic Congress on Future*, page 218–220. IEEE, 2011.
- [27] А. Кофман и Р. Крюон. *Массовое обслуживание. Теория и приложения*. Мир, 1965.
- [28] Р. Еремин и Э. Петерсонс. Исследование времени релаксации переходного процесса при обслуживании самоподобного входного трафика в беспроводных сетях. *Автоматика и вычислительная техника*, 43(3):36–46, 2009.