

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ზაზა მარდალეიშვილი

ტელეტრაფიკის ამოცანებში ფრაქტალური მეთოდების გამოყენების
შესაძლებლობების კვლევა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა „ტელეკომუნიკაცია“ შიფრი 0402

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

_____ 2016 წელი

საავტორო უფლება © 2016, ზაზა მარდალეიშვილი ზურაბის ძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავცანით ზაზა მარდალეიშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ტელეტრაფიკის ამოცანებში ფრაქტალური მეთოდების გამოყენების შესაძლებლობების კვლევა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი _____

ხელმძღვანელი: ტ.მ.დ, პროფესორი თამაზ კუპატაძე

რეცენზენტი: პროფესორი, ომარ შამანაძე

რეცენზენტი: პროფესორი, გიორგი ჩირაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2016 წ.

ავტორი: ზაზა მარდალეიშვილი

დასახელება: ტელეტრაფიკის ამოცანებში ფრაქტალური მეთოდების

გამოყენების შესაძლებლობების კვლევა

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარებულია: _____ 2016 წ.

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ, ზემოთ მოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში, მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა და სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებულ საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

მონოსერვისული ქსელის დაპროექტება, განხორციელება და ექსპლუატაცია ემყარება ცოდნას სატელეკომუნიკაციო ქსელში ტრაფიკის აღწერის ტრადიციული მეთოდებისა და მოდელირების გზების შესახებ, კერძოდ: ქსელის ტრაფიკის მახასიათებლები; მომსახურების ხარისხის მიმართ მოთხოვნები; ტრაფიკის სახეები—უწყვეტი ტრაფიკი, ელასტიური ტრაფიკი, ტრაფიკის გაერთიანება. ტრაფიკის მოდელირების თვალსაზრისით, განიხილება ტრაფიკის მათემატიკური აღწერა, კერძოდ ბიტების, პაკეტების და ა.შ. შემოსვლა, როგორც წერტილოვანი პროცესი T_1, T_2, \dots, T_n დროის მომენტებში. გასათვალისწინებელია ტრაფიკის პულსირებადი სტრუქტურა, დისპერსიის ინდექსის განსაზღვრის საჭიროება, ტრაფიკის პიკურობა, პიკურობის განზომილებები, პიკურობის გაზომვა სხვადასხვა სერვისებისათვის: კერძოდ ვიდეოტრაფიკისათვის, ATM – ტრაფიკისათვის, Ethernet–ტრაფიკისათვის.

მულტისერვისულ ქსელებში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება სატელეკომუნიკაციო ქსელში მოთხოვნების შემოსვლის ნაკადების შესწავლას, რომლის შედეგების საფუძველზე შესაძლებელია ქსელთან დაკავშირებული პრობლემების განხილვა და გადაწყვეტა. შეიძლება ითქვას, რომ ქსელის პროექტირებასთან დაკავშირებული ნებისმიერი პროცესები წარმოადგენს მხოლოდ რთული გამოთვლების ჩატარებას, ხოლო ფუნდამენტალური თეორია, რომელიც ასეთი გამოთვლების ჩატარების საშუალებას იძლევა, არის მოთხოვნების ნაკადების თეორია, რომელიც თავისი დონით შეესაბამება ერთ–ერთ მწყობრსა და დასრულებულ თეორიას. ამიტომაც სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილი მაქვს „მოთხოვნათა ნაკადების თვისებები და მახასიათებლები“, რომლის გამოყენების სამართლიანობას ვეძებ პულსირებული, ანუ სტრუქტურული ნაკადების აღწერისა და რაოდენობრივი შეფასების მიზნით. აქ კორელაციის ფუნქცია თამაშობს მეტად მნიშვნელოვან როლს, ვინაიდან წარმოადგენს იმ ძირითად კრიტერიუმს, რომლის საშუალებითაც განისაზღვრება ასეთი პროცესების მასშტაბური ინვარიანტულობა. „მოშორებით“ არსებული (ანუ სხვა დროს არსებულ) კორელაციას უწოდებენ ხანგრძელ დამოკიდებულებას. თვითმსგავსი პროცესების კორელაციის ფუნქციის განმასხვავებელი ნიშანი, ჩვეულებრივ პროცესებთან შედარებით იმაში მდგომარეობს, რომ კორელაცია, როგორც დროითი დაყოვნების ფუნქცია, ითვალისწინებს პოლინომიალურ და არა ექსპონენციალურ მიღევას.

საწყისი ეტაპის კვლევის მიზანს წარმოადგენდა ტელეტრაფიკში თვითმსგავსების მიზეზების შესწავლის შედეგების წარმოჩენა. ეს შედეგები, მიუხედავად მათი მნიშვნელობისა და დახვეწილობისა, მოიკოჭლებს არარეალური დაშვებების არსებობის გამო. რეალური საქსელო გარემოცვა ყოველთვის შეიცავს შეზღუდული რაოდენობის რესურსებს, რაც იმას ნიშნავს,

რომ შეზღუდული რაოდენობის რესურსის მოპოვების პროცესში აუცილებლად წარმოიქმნება არაწრფივი მოვლენები და ამის შედეგად თავს იჩენს ტრაფიკის წყაროებს შორის დამოკიდებულობა. გადატვირთულობის შემთხვევაში წარმოიქმნება ასეთივე არაწრფიობები მართვის მექანიზმებშიც, როგორებიცაა TCP (გადაცემის მართვის პროტოკოლი), Ethernet და სხვა. ქსელის რესურსების გამოყენება ხდება ქსელის არქიტექტურის ყველა დონეზე, რაც იძლევა იმის საშუალებას, რომ არსებული რესურსები ოპტიმალურად გადანაწილდეს სტატისტიკურ საფუძველზე. რადგანაც თანამედროვე მულტისერვისული ქსელი წარმოადგენს კავშირგაბმულობის სისტემას საშუალო და გროვებით, ლეონარდ კლინროკის აზრით, სწორედ ასეთ ქსელებში ვლინდება „დიდი პოპულაციების მოსწორების ეფექტი, რომლის დახვეწილ განსახიერებას წარმოადგენს პაკეტური კომუტაცია“ და შესაბამისად ამ მოსაზრების საფუძველზე პაკეტების ნაკადზე შესაძლებელია გავრცელდეს მოთხოვნათა ნაკადებისათვის არსებული კლასიკური თეორია.

მაგრამ, აღნიშნული პროცესები მასშტაბირების დროს სტატისტიკური მსგავსების გარდა ავლენენ რაოდენობრივ თვისებებსაც. თვითმსგავსების ნიშნები შეიძლება გამომჟღავნდეს რამოდენიმე, ტოლფასოვანი ნიშნით.

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული კვლევებისა და მიღებული შედეგების სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

- ქსელის რესურსების შეზღუდვა რაოდენობისა და ტრაფიკის ურთიერთდამოუკიდებელი წყაროების შემთხვევაში ფრაქტალურობა (თვით მსგავსება) წარმოიქმნება ცალკეული, აქტიურ/პასიური (ON/OFF) წყაროების სიმრავლეთა გაერთიანების შედეგად. წყაროს აქტიური და პასიური პერიოდების განაწილება ხასიათდება მძიმე წაგრძელებებით და აქვს უსასრულო დისპერსია. აქტიურ/პასიური წყაროების სიმრავლის ზედდება ავლენს უსასრულო დისპერსიის მიდრეკილებას და ქსელში ჩამოყალიბებული გაერთიანებული ტრაფიკი არის თვითმსგავსი, რომლის სახეც მიისწრაფის ბროუნის მოძრაობის ტიპის ფრაქტალურობისაკენ. აქ ძირითადია აქტიურ/პასიური წყაროების მოქმედების მაღალცვალებადი ქცევა, ისევე როგორც მომხმარებელ/სერვერი არქიტექტურის შემთხვევაში. ასეთ მსჯელობას გააჩნია მნიშვნელოვანი ცდომილებების წყაროები, მაგალითად, ქსელის რესურსების შეზღუდული რაოდენობა იწვევს ინფორმაციის წყაროებს შორის მკვეთრად გამოხატულ ურთიერთდამოკიდებულებას.
- სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული შედეგების საფუძველზე დადგენილია, რომ ქსელის ტრაფიკში ხანგრძლივი დამოკიდებულების წარმოქმნის ძირითადი ფაქტორებია:
 - მომხმარებლის ქცევა;
 - მონაცემთა გენერაცია, სტრუქტურა და მოძიება;
 - ტრაფიკის გაერთიანება;
 - ქსელის მართვის საშუალებები;

- უკუკავშირზე დაფუძნებული მართვის მექანიზმები;
- ქსელის განვითარება.
- სადისერტაციო ნაშრომში შემოთავაზებულია ტრაფიკის რიგების საშუალო სიდიდეების გამოთვლის მეთოდი, ტრაფიკის ტრასებზე კორელაციისა და დისპერსიის ექსპერიმენტულად განსაზღვრის საფუძველზე. სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული შედეგები ეძღვნება კავშირგაბმულობის მულტისერვისული ქსელების პროექტირებისა და ექსპლუატაციის პრობლემებს.

Abstract

Creation, implementation and utilization of mono-service networks is based upon the knowledge of traditional methodology for defining and modelling traffic in telecommunication networks. In particular, network traffic qualities; requirements towards quality of service; types of traffic – uninterruptable traffic, elastic traffic, unified traffic. For the purpose of traffic modeling, it needs to be described in mathematical terms, namely arrival of bytes, packets etc. as point process. A point process consists of a sequence of arrivals instants T_1, T_2, \dots, T_n . The pulsing structure of traffic, need for defining dispersion index, picks for traffic, pick time dimensions and measuring picks for variety of services such as video-traffic , ATM and Ethernet traffic.

In the multi-service networks emphasis are made on studying the arrival of request flows, based on the results of the study the problems arising in the network can be discussed and resolved. Thus, activities related to modeling the network are, conducting complicated calculations, while fundamental theory that allows such complicated calculations is the theory of request flows, one of the most complete theories. That is why, the proposed thesis covers “Qualities and Features of Request Flows”, to apply the results in studding pulsing or structural flows. In this case the correlation function is a main criteria. The specific feature of correlation function for self-similar processes in comparison to the correlation function of normal processes is that distribution is polynomic but not exponential.

At the first stage, the research focus was identification of causes for self- similarity in teletraffic.

In real networks the resources are limited, the sources of traffic are large and while accessing those scarce resource the sources of traffic become interdependent. In case of network overload, non-linearity appears in control mechanisms such as Transmission Control Protocol (TCP), Ethernet etc. The utilization of network resources happen on every level of network archnitecture, thus providing opportunity

to distribute existing resources optimally, based on statistics. Modern multi-service network is telecommunication system with medium accumulation, thus traffic in it is flattened, which is evident in packet switching based on Leonard Kleinrock. Based on this, existing classic theory can be applied to packet flows.

When the scale of these processes is enlarged, in addition to statistical similarity they also show self-similarity.

The scientific novelty derived from the given research are:

- In case of independent sources of traffic, self-similarity is created by the accumulation of number of individual on/off sources. The distribution of active and passive periods of the source has tail and unlimited dispersion. The unified traffic is self-similar, and resembles Brownian motion fractionality. However, it has significant sources of disparity i.e. limited resources of the network causes interdependency between sources of information.
- The main factors for long-range dependence in network traffic are:
 - Customer behavior
 - Data generation, structure and search;
 - Traffic unification;
 - Network Control equipment;
 - Feedback based control mechanisms;
 - Network development
- The thesis offers method for calculating average mean of traffic queuing, based on measuring correlation and dispersion of traffic on paths. The results of the research are covering issues of modeling and utilization of multi-service networks.

შინაარსი

	83
შესავალი -----	xiv
ლიტერატურული მიმოხილვა -----	18
თავი 1. წმინდად შემთხვევითი ტიპის ნაკადის თვისებები და მახასიათებლები -----	21
1.1. მეზობელ მოთხოვნებს შორის დროის შუალედების განაწილების კანონი -----	21
1.2. წმინდად შემთხვევითი ტიპის ნაკადის მახასიათებლები -----	23
1.3. ნაკადების გაერთიანება და დაყოფა -----	24
1.4. რიგთა თეორიის შედეგების საფუძველზე აგებული ქსელები -----	25
1.5. მარკოვის ჯაჭვები და M/M/1 ტიპის რიგი -----	28
1.6. M/M/1 ტიპის რიგის მოდელი -----	35
1.7. მიღებული შედეგების გამოყენება სტატისტიკური მულტიპლექსირების შეფასებისათვის -----	38
1.8. ქსელი M/M/1 რიგებით -----	39
თავი 2. ფრაქტალურობის არსებობის მიზეზები ტელეტრაფიკის სფეროში -----	42
2.1. მომხმარებლის ქცევა -----	43
2.2. მონაცემთა გენერაცია, სტრუქტურა და მოძიება -----	44
2.3. ტრაფიკის გაერთიანება -----	45
2.4. ქსელის მართვის საშუალებები -----	46
2.5. უკუკავშირზე დაფუძნებული მართვის მექანიზმები -----	47
2.6. ქსელის განვითარება -----	48
2.7. ეფექტურობა -----	48
2.8. ტრაფიკის პულსირებადი სტრუქტურა -----	51
2.9. დისპერსიის ინდექსი -----	53
2.10. პაკეტების ნაკადის სტატისტიკური თვისებები -----	55
თავი 3. მასობრივი მომსახურების სისტემა თანამედროვე მულტისერვისული სატელეკომუნიკაციო ქსელის რეჟიმში -----	63
3.1. რიგის ცვლილების სიჩქარე -----	64
3.2. ავტოკორელაციური მომენტები -----	69
3.3. ტრაფიკის ახალი სახეობები და სატელეკომუნიკაციო ქსელში მომსახურების ხარისხისადმი მოთხოვნების ევოლუცია -----	72
თავი 4. გადაცემის პაკეტური ტექნოლოგიის სატელეკომუნიკაციო ქსელის ანალიზის თეორიული ასპექტები -----	79
4.1. მულტისერვისული ქსელის საარხო რესურსის განსაზღვრის საკითხისათვის -----	81
4.2. მასობრივი მომსახურების სისტემა ცვლადი ინტენსიობის ხასიათის პაკეტური ნაკადის მიწოდების რეჟიმში -----	88
4.3. ორი ფაზით მომსახურე სისტემა -----	90
4.4. ერთსერვერიანი სისტემა შეზღუდული რიგით -----	92

4.5. სისტემა მოთხოვნათა არასტაციონარული ნაკადის მომსახურების რეჟიმში -----	93
4.6. ტრაფიკის მომსახურების ანალიზი დეიტაგრამული რეჟიმის სისტემებში -----	96
4.7. მრავალსერვერიანი სისტემა რიგებითა და ცვლადი ინტენსიობის ტრაფიკით -----	102
4.8. სატელეკომუნიკაციო ქსელში მომსახურების სახეობათა მოთხოვნებზე დაყოვნებების წარმოქმნა -----	106
4.9. SSP-SCP მონაკვეთზე დაყოვნების წარმოქმნის ანალიზი -----	109
საერთო დასკვნები -----	113
გამოყენებული ლიტერატურა -----	116

ცხრილების ნუსხა

- ცხრილი 1. მომსახურების ხარისხის მახასიათებლები
- ცხრილი 2. დაყოვნებებზე და კარგვებზე მოთხოვნების მნიშვნელობები
მომსახურების სახეობათა შესაბამისად
- ცხრილი 3. სისტემის მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობების განაწილება
- ცხრილი 4. საჭირო არხების რიცხვის გამოთვლის შედეგები

ნახაზების ნუსხა

- ნახაზი 1. გადასვლების დიაგრამა
- ნახაზი 2. M/M/1 რიგის სიგრძის ცვლილება
- ნახაზი 3. M/M/1 ტიპის რიგის გადასვლების დიაგრამა
- ნახაზი 4. ქსელი სამი ბუფერით
- ნახაზი 5. რიგის წარმოქმნის პროცესი
- ნახაზი 6. მულტისერვისული ქსელის ფრაგმენტი
- ნახაზი 7. მოდელირების შედეგები, სადაც მიერთების ქსელის გამტარუნარიანობაა 4 მბიტ/წმ
- ნახაზი 8. მოდელირების შედეგები, როდესაც მიერთების ქსელის გამტარუნარიანობაა 10 გბიტ/წმ
- ნახაზი 9. სატელეფონო კვანძებიდან SSP-კენ შესაძლო მარშრუტები
- ნახაზი 10. №7 სიგნალიზაციის ქსელით განხორციელებული დიალოგი SSP-სა და SCP-ს შორის

დისერტაციაში გამოყენებული აბრევიატურები

ATM (Asynchronous Transfer Mode) -	გადაცემის ასინქრონული რეჟიმი
ABR (Available Bitr Rate) -	გადაცემის შესაძლო სიჩქარის მექანიზმი
CPU (Central Processing Unit) -	ცენტრალური პროცესორი
FIFO (First Input First Output) -	პირველი შემოვიდა, პირველივე გავიდა
GII (Global Informational Infrastructure) -	გლობალური ინფორმაციული ინფრასტრუქტურა
ITU (International Telecommunication Union) -	ელექტროკავშირგაბმულობის საერთაშორისო საბჭო
ISE (Infinite - Server Effect) -	სერვერების უსასრულო ჯგუფის არსებობა
iil (identical and independent distributed) -	ურთიერთდამოუკიდებელი და ერთნაირად განაწილებული
IPTD (IP Time Delay) -	პაკეტების გადაცემის დაყოვნება
IPDV (IP Delay Variance) -	დაყოვნების ცვალებადობა – ვარიაცია (ჯიტერი)
IPLR (IP Loss Ratio) -	დაკარგული პაკეტების წილი
IPER (IP Error Rate) -	შეცდომებით გადაცემული პაკეტების წილი
IMS (IP Multimedia Subsystem) -	პაკეტური მულტიმედიური ქვესისტემა
IoT (Internet of Things) -	მოწყობილობათა ინტერნეტი
LTE (Long Term Evolution) -	ხანგრძლივი განვითარების პროექტი
M/M/1 -	სისტემა 1 სერვერით, შემთხვევითი ნაკადით და მომსახურების ხანგრძლიობის ალბათობათა ექსპონენციალური განაწილებით
MPEG (Motion Pictures Experts Group) -	მოძრავი გამოსახულებებისა და თანხმლები ხმის შეკუმშვის მექანიზმი
MBS (Maximum Burst Site) -	პიკური სიჩქარით გენერირებული უჯრედების მაქსიმალური რიცხვი
NGN (Next Generation Networks) -	შემდეგი თაობის ქსელი
ON/OFF -	აქტიური/პასიური მდგომარეობა
SCP (Service Control Point) -	მომსახურების სახეობათა მართვის წერტილი
PTC (Poisson Traffic Comparison) -	პუასონის ტიპის ტრაფიკი
QoS (Quality of service) -	მომსახურების ხარისხი
TCP (Transmission Control Protocol) -	გადაცემის მართვის პროტოკოლი

UDP (User Datagram Protocol) -

მომხმარებლის დატაგრამების გადაცემის
პროტოკოლი

VBR (Variable Bit Rate) -

ბიტები ცვლადი ინტენსიობით

WWW (World Wide Web) -

მსოფლიო მასშტაბით ტექსტებისა და სხვა
დოკუმენტების კრებული, რომლებიც
ხელმისაწვდომია ინტერნეტის ქსელით

შესავალი

საერთაშორისო ექსპერტების თვალსაზრისით XXI საუკუნე იქნება გლობალური ინფორმაციული საზოგადოების საუკუნე. მის საფუძველს წარმოადგენს გლობალური ინფორმაციული ინფრასტრუქტურა (Global Informational Infrastructure-GII), რომელიც მოიცავს კავშირგაბმულობის მძლავრ სატრანსპორტო ქსელებს, ინფორმაციის დამუშავებისა და განაწილების სისტემებს, მომსახურების მრავალფეროვან საინფორმაციო სახეობებთან მიერთების საშუალებებს.

ყველა განვითარებულ ქვეყნებში მიმდინარეობს გლობალური ინფორმაციული ინფრასტრუქტურის შექმნისა და განვითარების სამუშაოები, რომლებიც ითვალისწინებს განვითარებადი ქვეყნების მოქცევას მსოფლიოს ერთიან საინფორმაციო სივრცეში. ამ საქმიანობაში ჩართულია მრავალი საერთაშორისო ორგანიზაცია და მათ შორის ყველაზე ავტორიტეტული ინფოტელეკომუნიკაციის სფეროში - ელექტროკავშირგაბმულობის საერთაშორისო საბჭო ITU (International Telecommunication Union), ამასთან ერთად, ტელეკომუნიკაციის დარგში სამეცნიერო-თეორიული და გამოყენებითი კვლევების ძირითად მიმართულებას წარმოადგენს თანამედროვე ქსელებისა და სისტემების ფუნქციონირების ხარისხობრივი მაჩვენებლების რაოდენობრივი შეფასების ახალი მეთოდების დამუშავება.

ტელეკომუნიკაციის ტექნოლოგიების სწრაფმა განვითარებამ და მომსახურების ახალ საფეხურებზე მოთხოვნების ზრდამ გამოიწვია მომსახურების ახალი სახეობების შექმნისა და მათი უსწრაფესად დანერგვის აუცილებლობა.

დღევანდელ ეტაპზე პერსპექტიულია კავშირგაბმულობის ქსელები პაკეტების კომუტაციით, რომელიც უკვე ფართოდ არის გამოყენებული ინფორმაციის ნებისმიერი სახეობის გადაცემისათვის. ქსელების არქიტექტურა განუხრელად რთულდება, განსხვავდებიან შემოთავაზებული მომსახურების სახეობებითა და დანიშნულებით. აღნიშნულის საფუძველზე ჩამოყალიბდა ახალი (შემდეგი) თაობის ქსელების (Next Generation Networks - NGN) კონცეპცია.

შემდეგი თაობის ქსელს შეუძლია გააერთიანოს ტელეკომუნიკაციის ინდუსტრიის ყველა სფერო - ტრადიციული სატელეფონო ქსელები და ინტერნეტ მომსახურება, კორპორატიული ქსელები და საერთო სარგებლობის ქსელები, სატრანსპორტო ქსელები და მიერთების ქსელები, სადენიანი და უსადენო ქსელები, სრულიად განსხვავებული ტექნოლოგიური ბაზისა და მომსახურების სახეობების ქსელები: შემდეგი თაობის ქსელების მთავარი თავისებურებაა - ღია მოდულური არქიტექტურა, რაც იძლევა ახალი მოდულების დამუშავებისა და დანერგვის საშუალებას და ამის საფუძველზე

მარტივდება ახალი ტექნოლოგიების, მომსახურებათა სახეობებისა და ფუნქციების დანერგვა და ურთიერთქმედება არსებულ ქსელებთან.

ყოველივე ამის საფუძველზე უნდა ვივარაუდოთ, რომ უახლოეს წლებში ტელეტრაფიკის თეორიისა და რიგთა თეორიის სპეციალისტების სამეცნიერო აქტივობა გაიზრდება. ვიმედოვნებთ, რომ ტელეკომუნიკაციის დარგის ახალი მიმართულებები საქართველოშიც მიაღწევს სრულყოფილებას და გახდება კომპიუტერული და სატელეკომუნიკაციო ქსელებისა და მისი კომპონენტების ანალიზის, მოდელირებისა და ოპტიმიზაციის ახალი ტექნოლოგიის საფუძველი.

მონოსერვისული ქსელის დაპროექტება, განხორციელება და ექსპლუატაცია ემყარება ცოდნას სატელეკომუნიკაციო ქსელში ტრაფიკის აღწერის ტრადიციული მეთოდებისა და მოდელირების გზების შესახებ, კერძოდ: ქსელის ტრაფიკის მახასიათებლები; მომსახურების ხარისხის მიმართ მოთხოვნები; ტრაფიკის სახეები—უწყვეტი ტრაფიკი, ელასტიური ტრაფიკი, ტრაფიკის გაერთიანება. ტრაფიკის მოდელირების თვალსაზრისით, განიხილება ტრაფიკის მათემატიკური აღწერა, კერძოდ ბიტების, პაკეტების და ა.შ. შემოსვლა, როგორც წერტილოვანი პროცესი T_1, T_2, \dots, T_n დროის მომენტებში. გასათვალისწინებელია ტრაფიკის პულსირებადი სტრუქტურა, დისპერსიის ინდექსის განსაზღვრის საჭიროება, ტრაფიკის პიკურობა, პიკურობის განზომილებები, პიკურობის გაზომვა სხვადასხვა სერვისებისათვის: კერძოდ ვიდეოტრაფიკისათვის, ATM – ტრაფიკისათვის, Ethernet–ტრაფიკისათვის.

მულტისერვისულ ქსელებში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება სატელეკომუნიკაციო ქსელში მოთხოვნების შემოსვლის ნაკადების შესწავლას, რომლის შედეგების საფუძველზე შესაძლებელია ქსელთან დაკავშირებული პრობლემების განხილვა და გადაწყვეტა. შეიძლება ითქვას, რომ ქსელის პროექტირებასთან დაკავშირებული ნებისმიერი პროცესები წარმოადგენს მხოლოდ რთული გამოთვლების ჩატარებას, ხოლო ფუნდამენტალური თეორია, რომელიც ასეთი გამოთვლების ჩატარების საშუალებას იძლევა, არის მოთხოვნების ნაკადების თეორია, რომელიც თავისი დონით შეესაბამება ერთ–ერთ მწყობრსა და დასრულებულ თეორიას. ამიტომაც სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილი მაქვს „მოთხოვნათა ნაკადების თვისებები და მახასიათებლები“, რომლის გამოყენების სამართლიანობას ვეძებ პულსირებული, ანუ სტრუქტურული ნაკადების აღწერისა და რაოდენობრივი შეფასების მიზნით. აქ კორელაციის ფუნქცია თამაშობს მეტად მნიშვნელოვან როლს, ვინაიდან წარმოადგენს იმ ძირითად კრიტერიუმს, რომლის საშუალებითაც განისაზღვრება ასეთი პროცესების მასშტაბური ინვარიანტულობა. „მოშორებით“ არსებული (ანუ სხვა დროს არსებულ) კორელაციას უწოდებენ ხანგრძელ დამოკიდებულებას. თვითმსგავსი პროცესების კორელაციის ფუნქციის განმასხვავებელი ნიშანი, ჩვეულებრივ პროცესებთან შედარებით იმაში მდგომარეობს, რომ კორელაცია, როგორც

დროითი დაყოვნების ფუნქცია, ითვალისწინებს პოლინომიალურ და არა ექსპონენციალურ მილევას.

საწყისი ეტაპის კვლევის მიზანს წარმოადგენდა ტელეტრაფიკში თვითმსგავსების მიზეზების შესწავლის შედეგების წარმოჩენა. ეს შედეგები, მიუხედავად მათი მნიშვნელობისა და დახვეწილობისა, მოიკოჭლებს არარეალური დაშვებების არსებობის გამო. რეალური საქსელო გარემოცვა ყოველთვის შეიცავს შეზღუდული რაოდენობის რესურსებს, რაც იმას ნიშნავს, რომ შეზღუდული რაოდენობის რესურსის მოპოვების პროცესში აუცილებლად წარმოიქმნება არაწრფივი მოვლენები და ამის შედეგად თავს იჩენს ტრაფიკის წყაროებს შორის დამოკიდებულობა. გადატვირთულობის შემთხვევაში წარმოიქმნება ასეთივე არაწრფიობები მართვის მექანიზმებშიც, როგორებიცაა TCP (გადაცემის მართვის პროტოკოლი), Ethernet და სხვა. ქსელის რესურსების გამოყენება ხდება ქსელის არქიტექტურის ყველა დონეზე, რაც იძლევა იმის საშუალებას, რომ არსებული რესურსები ოპტიმალურად გადანაწილდეს სტატისტიკურ საფუძველზე. რადგანაც თანამედროვე მულტისერვისული ქსელი წარმოადგენს კავშირგაბმულობის სისტემას საშუალო და გრძელვადიან, ლეონარდ კლეინროკის აზრით, სწორედ ასეთ ქსელებში ვლინდება „დიდი პოპულაციების მოსწორების ეფექტი, რომლის დახვეწილ განსახიერებას წარმოადგენს პაკეტური კომუტაცია“ და შესაბამისად ამ მოსაზრების საფუძველზე პაკეტების ნაკადზე შესაძლებელია გავრცელდეს მოთხოვნათა ნაკადებისათვის არსებული კლასიკური თეორია.

მაგრამ, აღნიშნული პროცესები მასშტაბირების დროს სტატისტიკური მსგავსების გარდა ავლენენ რაოდენობრივ თვისებებსაც. თვითმსგავსების ნიშნები შეიძლება გამომჟღავნდეს რამოდენიმე, ტოლფასოვანი ნიშნით.

კვლევის ობიექტს წარმოადგენს მასობრივი მომსახურების სისტემები პაკეტების ჯგუფების მოთხოვნათა მომსახურების რეჟიმით, რაც დამახასიათებელია კავშირგაბმულობის მულტისერვისული ქსელებისათვის. სადისერტაციო ნაშრომში ნაჩვენებია, რომ პაკეტების ჯგუფების ნაკადების კორელაციური თვისებები არის წარმოქმნილი რიგების ძირითადი განმსაზღვრელი მოვლენა. სადისერტაციო ნაშრომში დასმული ამოცანების გადასაწყვეტად გამოყენებულია: მასობრივი მომსახურების თეორიის მათემატიკური მეთოდები, კერძოდ მოთხოვნათა შემომავალი ნაკადების თეორია, სტაციონალური რიგების მათემატიკური თეორია, ინფორმაციის მიმოცვლის პროცესის მათემატიკური მოდელები.

თანამედროვე ინფორმაციული საზოგადოების ობიექტურ რეალობას წარმოადგენს ახალი, საინფორმაციო მომსახურების სახეობებზე მოთხოვნათა ზრდა, ამასთანავე, გასათვალისწინებელია, რომ ერთიანი მულტიმედიაური ტერმინალი სტანდარტული ფართოზოლოვანი ინტერფეისით მიერთებულია ქსელთან. მომსახურებათა სახეობები ITU (International Telecommunication Union) სტანდარტიზაციის სექტორის რეკომენდაციებში განმარტებულია როგორც ინფორმაციული მომსახურება, ინფორმაციის კომპლექსური

მიწოდებით. ამის შესაბამისად, ნაციონალური ინფოსაკომუნიკაციო ქსელის პროექტირება წარმოადგენს უახლოესი პერსპექტივის ამოცანას, როდესაც იქმნება ელექტროკავშირგაბმულობის მულტისერვისული ქსელი, მულტიმედიური მომსახურების ორგანიზაციის სპეციფიკის გათვალისწინებით (კავშირის დამყარების აუცილებლობის ფაზის არსებობა ქსელის რესურსების ცვლადი რაოდენობით და მოთხოვნათა ნაკადის მრავალკომპონენტური სტრუქტურით; მულტიმედიური მოთხოვნების ბლოკირება; ჭარბი მულტიმედიური დატვირთვის წარმოქმნა. გადაცემის გამჭოლ ტრაქტში იზოქრონული პაკეტების არსებობის დროის ინტერვალების განაწილების კანონზომიერება და სხვა) ერთიანი სატელეკომუნიკაციო ქსელის ჩარჩოებში. სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული შედეგები ეძღვნება კავშირგაბმულობის მულტისერვისული ქსელების პროექტირებისა და ექსპლუატაციის პრობლემებს.

ლიტერატურის მიმოხილვა

ფრაქტალური პროცესების კვლევასთან დაკავშირებული ცნობილი შედეგების ანალიზი

- გარდა სტატისტიკური და პრაქტიკული მხარისა, თვითმსგავს მოდელებთან დაკავშირებით, საჭიროა, ექსპერიმენტალურად მიღებული შედეგების ფრაქტალური სტრუქტურის ფიზიკური განმარტება. ამ მიმართულებით არსებული ნაშრომები, რომლებშიც განხილულია ქსელის მაღალჩქაროსნული ტრაფიკი და ის თუ როგორ არის დაკავშირებული თანამდევ უსასრულო დისპერსიასთან, ან როგორც მას უწოდებენ „მძიმე კუდების“ (წაგრძელებების) არსებობასთან, თვითმსგავსების თვისებების გამოვლენის ცალკეულ მექანიზმებთან, წარმოდგენილია [36-44] ნაშრომებში.
- სტატისტიკური თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ტრადიციული ტრაფიკის მოდელებსა და რეალურად გაზომილ ტრაფიკს შორის არსებობს (რეალურ ტრაფიკზე ექსპერიმენტული დაკვირვებით გამოვლენილი) განსხვავება. ცნობილია მტკიცებულებანი იმის შესახებ, რომ რეალური ტრაფიკის ფრაქტალური თვისებები (კერძოდ, ხანგრძლივი დამოკიდებულება და წაგრძელებული ხასიათის განაწილება) ახდენენ რეალურ ზეგავლენას პრობლემების ფართო სპექტრზე, რომლებიც წარმოიქმნება ქსელის პროექტირების პროცესში. ცნობილია აგრეთვე, თუ მოთხოვნათა ტრადიციული ნაკადები, როგორ ზეგავლენას ახდენენ რიგების ორგანიზებაზე [40-57].
- დღეისათვის ხელმისაწვდომია ტრადიციული ნაკადების რიგების ორგანიზებაზე ზეგავლენის და ამ ზეგავლენის შედეგად წარმოქმნილი უკუქმედების რაოდენობრივი შეფასების მეთოდები [58-63].

- ამ ვითარებაში საყურადღებოა, გადაცემის მაღალი სიჩქარის ქსელებში, მოთხოვნების მომსახურების მართვის განხორციელება ეფექტური გამტარუნარიანობის ცნების გამოყენების საფუძველზე [64-74].
- რიგების წარმოქმნის შესწავლისათვის, მკაცრად ჩამოყალიბებული მარკოვის მოდელებისაგან განსხვავებით, მომსახურებაზე შემოსვლა და ხანგრძლივი დამოკიდებულებების პროცესებით რიგის წარმოქმნა, დღეისათვის არსებობს მხოლოდ რამოდენიმე თეორიული შედეგის სახით. ამ სფეროში არსებული თანამედროვე მიღწევები, რომელიც ეხება პრაქტიკულად არსებულ ფრაქტალურ ტრაფიკს, განხილულია [75-93].
- მაშინ როდესაც, ხანგრძლივი დამოკიდებულების შემომავალი პროცესებისათვის რიგების წარმოქმნის მოდელებთან დაკავშირებით არსებობს შემდგომი კვლევების რეალური შესაძლებლობები, რიგების შესწავლა, მომსახურების ხანგრძლივობების წაგრძელებული განაწილებებით, აგრეთვე ხელმისაწვდომია [94-100] ნაშრომებში.
- ON/OFF - ხასიათის, ერთი ან მრავალი საინფორმაციო წყაროების ნაკადებით შექმნილი მარტივი რიგების ქმედებები, რომელიც ვლინდება ON, ან OFF პერიოდების წაგრძელებული განაწილებებით („განაწილებები მძიმე კუდებით“), მომსახურების სისტემის შესასვლელზე ბროუნის ფრაქტალური ნაკადებით, ეძღვნება ნაშრომები [101-106].
- ტელეტრაფიკის ამოცანების მონაცემებისათვის განაწილებები წაგრძელებით და მართებული მოდელირებით, წარმოადგენს [107] მიმოხილვითი ნაშრომის საგანს.
- ემპირიულად, განაწილება წაგრძელებებით, რომელიც შეიძლება წარმოადგენდეს გაუსის განაწილების ანალოგს - არის მდგრადი განაწილება [108-111].
- მეცნიერების სხვადასხვა სფეროებშიც გვხვდება უსასრულო დისპერსიის მოდელები, მაგალითად ეკონომიკასა და ფინანსებში [112-120].

- როდესაც დისპერსია უსასრულოა, შეუძლებელია კორელაციის განსაზღვრა, რომელსაც ვიყენებთ პროცესების ურთიერთ-დამოკიდებულების აღწერისათვის. აქ ალტერნატივას წარმოადგენს კორელაციის ის შემთხვევები, რომლებიც შედის რეგრესიის ფორმულებში [121-130].

თავი 1. წმინდად შემთხვევითი ტიპის ნაკადის თვისებები და მახასიათებლები

1.1. მეზობელ მოთხოვნებს შორის დროის შუალედების განაწილების კანონი

$$P_i(t) = \frac{(\lambda t)^i}{i!} \cdot e^{-\lambda t}$$

არის პუასონის ტიპის, ანუ წმინდად შემთხვევითი ნაკადის განსაზღვრის ერთ-ერთი მეთოდი. განსხვავებულ მეთოდს წარმოადგენს მეზობელ მოთხოვნებს შორის დროის შუალედების განაწილება: $P(z < 1) = 1 - P(z > 1)$. აქ ალბათობა $P(z < 1)$ ტოლფასია იმ ალბათობისა, რომ t ხანგრძლიობის დროის შუალედში არ შემოვა არცერთი მოთხოვნა: $P(z > t) = P_0(t)$, ანუ

$$P_i(z < t) = 1 - P_0(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

t -ს მიხედვით ამ განტოლების დიფერენციალი განსაზღვრავს მეზობელ მოთხოვნებს შორის დროის შუალედების განაწილების სიმკვრივეს:

$$p(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

შემთხვევით სიდიდეთა განაწილების ასეთ კანონს ეწოდება ექსპონენციალური, ანუ მაჩვენებლიანი განაწილების კანონი, ხოლო λ არის ამ განაწილების პარამეტრი. ასეთი განაწილების შემთხვევა არის პუასონის ტიპის ნაკადის არსებობის აუცილებელი და საკმარისი პირობა. ამისათვის განვსაზღვროთ z შუალედების მათემატიკური მოლოდინი, დისპერსია და საშუალოკვადრატული გადახრა:

$$M_z = \int_0^{\infty} t p(t) dt = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda;$$

$$D_z = \int_0^{\infty} t^2 p(t) dt - M_z^2 = \int_0^{\infty} t^2 \lambda e^{-\lambda t} dt - 1/\lambda^2 = 1/\lambda^2;$$

$$\sigma_z = \sqrt{D_z} = 1/\lambda.$$

მათემატიკური მოლოდინის და საშუალოკვადრატული გადახრის მნიშვნელობათა დამთხვევა დამახასიათებელია მაჩვენებლიანი (ექსპონენციალური) განაწილებისათვის. პრაქტიკულ საქმიანობაში ექსპონენციალური განაწილების ამ თვისებას იყენებენ, სტატისტიკური მონაცემების საფუძველზე მიღებული განაწილების, მაჩვენებლიან კანონთან შესაბამისობის დადგენის კრიტერიუმად.

როდესაც რეალური ნაკადისათვის გაზომილია მოთხოვნებს შორის დროის შუალედები და შემთხვევითი z სიდიდისათვის გაგვაჩნია n რაოდენობის მნიშვნელობები, ვანგარიშობთ საშუალო მნიშვნელობას, შევაფასებთ წაუნაცვლებელ დისპერსიას და z სიდიდის საშუალოკვადრატულ გადახრას:

$$\bar{z} = \sum_{i=1}^n z_i / n; \quad D_z = \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 / n - 1; \quad \sigma_z = \sqrt{D_z}.$$

\bar{z} და σ_z მნიშვნელობათა დამთხვევის სიზუსტის შესაბამისად შეიძლება ვიმსჯელოთ, რამდენად შენარჩუნებულია (არსებობს) სისტემაში, შემოსულ მოთხოვნათა შორის დროის შუალედების განაწილების ექსპონენციალური კანონი.

თუ ცნობილია, რომ მოთხოვნებს შორის დროის შემთხვევითი z შუალედი, განაწილებულია მაჩვენებლიანი კანონით და გრძელდებოდა τ დროის ხანგრძლიობით, შუალედის დანარჩენი დროის განმავლობაშიც, განაწილების კანონი, აგრეთვე იქნება მაჩვენებლიანი, იგივე მნიშვნელობის პარამეტრით და არ იქნება დამოკიდებული τ -ზე [1].

ამ ვითარების დამტკიცების მიზნით დაუშვათ, რომ უკანასკნელი მოთხოვნის შემოსვლიდან გავიდა τ დრო, და განვსაზღვროთ იმის ალბათობა,

რომ შემდეგი მოთხოვნის შემოსვლამდე გაივლის არანაკლებ t დრო. ალბათობების ნამრავლის თეორემის საფუძველზე $P(z > \tau + t) = P(z > \tau)P_\tau(z > t)$.

აქ $P(z > \tau + t)$ და $P(z > \tau)$ არის იმის ალბათობები, რომ z შუალედი იქნება $\tau + t$ და τ -ზე მეტი. იმის გათვალისწინებით, რომ $P_\tau(z < t) = 1 - e^{-\lambda t}$, მივიღებთ:

$$e^{-\lambda(\tau+t)} = e^{-\lambda\tau} \cdot P_\tau(z > t); P_\tau(z > t) = e^{-\lambda t} = P(z > t).$$

ამრიგად, პირობითი ალბათობა $P_\tau(z > t)$, არ არის დამოკიდებული უკვე განვლილ τ დროზე და ტოლია $P(z > t)$ უპირობო ალბათობისა. მაჩვენებლიანი განაწილების კანონი არის ერთადერთი, ასეთი თვისების მატარებელი განაწილება.

არსებითად, ეს არის პუასონის ნაკადის ძირითადი თვისების განსხვავებული ფორმულირება - უუკუქმედებობა. ექსპონენციალური (მაჩვენებლიანი) განაწილების ეს თვისება საშუალებას იძლევა, მოთხოვნათა შემოსვლასა და მათ მომსახურებასთან დაკავშირებული პროცესების ანალიზისათვის მნიშვნელოვნად გამარტივდეს მათემატიკური გარდაქმნები.

1.2. წმინდად შემთხვევითი ტიპის ნაკადის მახასიათებლები

განვსაზღვროთ t დროის შუალედში შემოსული მოთხოვნების რაოდენობის მათემატიკური მოლოდინი M_i და დისპერსია D_i :

$$M_i = \sum_{i=1}^{\infty} iP_i(t) = \sum_{i=1}^{\infty} i \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} = \lambda t e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!} = \lambda t$$

$$D_i = \sum_{i=1}^{\infty} i^2 P_i(t) - M_i^2 = \sum_{i=1}^{\infty} i^2 \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} - (\lambda t)^2 = \lambda t.$$

შემოსულ მოთხოვნათა რაოდენობის მათემატიკური მოლოდინისა და დისპერსიის მნიშვნელობათა ტოლობა შეიძლება გამოვიყენოთ რეალური

ნაკადისათვის, პუასონის ტიპის ნაკადის მოდელის მისადაგების სამართლიანობის დასადგენად. დაუშვათ, რომ რეალური ნაკადისათვის დათვლილი გვაქვს t ხანგრძლიობის, n რაოდენობის შუალედებში შემოსული მოთხოვნების რაოდენობები x_1, x_2, \dots, x_n :

$$\bar{x} = \sum_{j=1}^n x_j / n; \quad D_x = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 / (n-1).$$

იმის მიხედვით, თუ რა სიზუსტით ემთხვევა \bar{x} და D_x მნიშვნელობები ვაკეთებთ დასკვნას პუასონის ტიპის ნაკადთან რეალური ნაკადის თავსებადობის შესახებ [1].

1.3. ნაკადების გაერთიანება და დაყოფა

რამოდენიმე, დამოუკიდებელი პუასონის ტიპის ნაკადების გაერთიანების შემთხვევაში, წარმოიქმნება ისევ პუასონის ნაკადი, რომლის პარამეტრი ტოლია საწყისი ნაკადების პარამეტრების ჯამის.

როდესაც ხდება მოწოდებული (შემომავალი) პუასონის ტიპის, λ პარამეტრიანი ნაკადის დაშლა n რაოდენობის მიმართულებებში გადასაცემად ისე, რომ ძირითადი ნაკადის ყოველი მოთხოვნა P_i ალბათობით $\left(\sum_{i=1}^n P_i = 1 \right)$ მიეწოდება i -ურ მიმართულებას, i -ური მიმართულების ნაკადი აგრეთვე იქნება პუასონის ტიპის λP_i პარამეტრით.

პუასონის ნაკადის მოდელი, რომელიც იძლევა საშუალებას შედარებით მარტივად მივიღოთ საანგარიშო ფორმულები, ყველაზე მეტად არის გავრცელებული ინფორმაციის განაწილების თეორიაში, ვინაიდან ეს მოდელი პრაქტიკული მიზნებისათვის დამაკმაყოფილებლად აღწერს შესაბამის

პროცესებს ინფორმაციის წყაროების დიდი რაოდენობის არსებობის შემთხვევაში.

1.4. რიგთა თეორიის შედეგების საფუძველზე აგებული ქსელები

განხილულია ცვლადი ინტენსიობის ხასიათისა და მეხსიერების მქონე მასობრივი მომსახურების სისტემების ზოგიერთი სპეციფიკური მათემატიკური მოდელების ალბათური ანალიზი. მოცემულია ისეთი სისტემების მათემატიკური მოდელების შესწავლის მცდელობა, რომლებშიც მოთხოვნათა შემომავალი ნაკადის ინტენსიობა ან მომსახურების ინტენსიობა დამოკიდებულია რიგის სიგრძის გარკვეულ დონეზე, დამოკიდებულია უარების რიცხვზე და აგრეთვე, სისტემის უკუქმედებაზე, ანუ იმ წინა პერიოდის მდგომარეობაზე, რომელშიც იმყოფებოდა სისტემა.

აღსანიშნავია, რომ ტელეტრაფიკი შეისწავლის არა უშუალოდ ინფორმაციის განაწილების რეალურ სისტემებს, არამედ მათ მათემატიკურ მოდელებს და ამიტომაც უმეტეს შემთხვევებში, ტელეტრაფიკის ასეთი მოდელები განზოგადობას პოულობს მეცნიერებისა და ტექნიკის სხვადასხვა სფეროებში.

რიგთა თეორია შეისწავლის მომსახურების ისეთი სისტემების მოდელებს, რომლებშიც შემოსული მოთხოვნები ელოდებიან მომსახურებას. რიგთა თეორიის ერთ–ერთი მნიშვნელოვანი ამოცანაა მომსახურების პროცესის დასრულების დაყოვნებისა და მომსახურების მოლოდინში არსებული მოთხოვნების რიგის სიგრძის შეფასება.

რიგი არის მოთხოვნის მომსახურების ორგანიზაციის საშუალება დამგროვებელი ბუფერის გამოყენების საშუალებით. ამრიგად, მოთხოვნები იკავებენ რიგს გარკვეული დროით, რომელსაც მომსახურების დრო ეწოდება. პრაქტიკულად სისტემა შეიცავს რამოდენიმე მომსახურე მოწყობილობას

(სერვერს) და მომხმარებელს ეძლევა ლოდინის საშუალება განთავისუფლებულ სერვერთან მიერთებამდე. ბუფერში დაგროვილი მოთხოვნები ტოვებენ რიგს მომსახურების დამთავრების შემდეგ.

განვიხილოთ ბუფერი, რომელსაც გააჩნია R ბიტ/წმ სიჩქარით მომქმედი გადამცემი. თუ ბუფერში პაკეტების შემოსვლებს შორის დროის შუალედები დიდია, მაშინ, ყოველთვის, ახალი პაკეტის შემოსვლის დროის მომენტში, ბუფერი იქნება თავისუფალი. ამ შემთხვევაში ბუფერში პაკეტის დაყოვნების დრო ტოლია პაკეტის გადაცემისათვის საჭირო დროის ხანგრძლიობის, კერძოდ L რაოდენობის ბიტების შემცველი პაკეტის გადაცემისათვის საჭირო იქნება L/R წამი.

მაგალითად, თუ $R=1$ მბიტ/წმ და თუ ყოველი პაკეტი შეიცავს 1000 ბიტს, პაკეტის გადაცემის დრო იქნება 10^{-3} წმ. დაუშვათ, რომ პაკეტების შემოსვლების დროის მომენტებს შორის დროის შუალედები არის არანაკლებ 1 მწმ, მაშინ ბუფერში ყოველი პაკეტის დაყოვნების დრო იქნება 1 მწმ. ამრიგად, პაკეტი, რომელიც ბუფერში ხვდება დროის T მომენტში, ამ პაკეტის უკანასკნელი ბიტი ბუფერს დატოვებს $(T+1)$ მწმ დროის მომენტში. ცხადია, აქ სისტემის მოდელის გამარტივების მიზნით, დაშვებული გვაქვს პირობა რომ პაკეტი ბუფერს იკავებს მყისიერად.

განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც ბუფერში თანამიმდევრულად შემოსულ პაკეტებს შორის დროის შუალედები 1 მწმ-ზე ნაკლებია. ვთქვათ, პაკეტი შემოვიდა დროის „0“ მომენტში, ხოლო მომდევნო პაკეტი კი 0,4 მწმ – ს შემდეგ. დაუშვათ აგრეთვე, რომ გადამცემი პაკეტებს აგზავნის პაკეტების შემოსვლის თანამიმდევრობით. ამ შემთხვევაში ცხადია, რომ პირველი პაკეტის ბოლო ბიტი ბუფერს დატოვებს 1 მწმ დროის მომენტში. დროის ამ მომენტისათვის მომდევნო, მეორე პაკეტი უკვე მიღებულია ბუფერში და ბუფერი იწყებს მის გადაცემას. მეორე პაკეტის ბოლო ბიტი გადაცემული იქნება 2 მწმ დროის მომენტში. მაგრამ, რადგანაც მეორე პაკეტი ბუფერში

შემოვიდა 0,4 მწმ დროის მომენტში, ის ბუფერში რჩება 1,6 მწმ დროის განმავლობაში ანუ პაკეტი, შემოსვლის დროის მომენტიდან რიგში იდგა და ელოდა გადაცემას 0,6 მწმ დროის განმავლობაში. დროის ამ ხანგრძლიობას ეწოდება რიგში დგომით გამოწვეული დაყოვნების დრო. ბუფერში დაყოვნების საერთო დრო წარმოადგენს რიგში დგომით გამოწვეული დაყოვნების დროისა და პაკეტის გადაცემისათვის საჭირო დროის ჯამს.

პაკეტის გადაცემისათვის საჭირო დრო დამოკიდებულია მხოლოდ პაკეტის სიგრძეზე და გადაცემის სიჩქარეზე, ხოლო რიგში დგომით დაყოვნების დრო კი დამოკიდებულია ბუფერში პაკეტების შემოსვლის დროის მომენტებზე. ამრიგად, რიგში დგომით გამოწვეული დაყოვნების დრო დამოკიდებულია ტრაფიკზე, ანუ იმ დატვირთვაზე, რომლის გათვალისწინებით უხდება ბუფერს მუშაობა. რიგში დგომით გამოწვეული დაყოვნება იზრდება დატვირთვის ზრდასთან ერთად, რადგანაც ხდება ბუფერის გადავსება. ბუფერი გადავსებულად ითვლება, როდესაც მას აღარ აქვს მიწოდებული პაკეტების ათვისების უნარი.

საზოგადოდ, ქსელის არხებში პაკეტების შემოსვლის დროის მომენტები შემთხვევითი სიდიდეებია. მიუხედავად ამისა, დიდი რაოდენობის არხების არსებობის შემთხვევაში, პაკეტების შემოსვლებს შორის დროის შუალედების გამოკვლევა გვაძლევს საშუალებას, შევადგინოთ ტიპური ვითარების შესაბამისი მათემატიკური მოდელი. მათემატიკურ მოდელში გათვალისწინებული უნდა იქნას პაკეტებს შორის დროის შუალედების შესაძლო ცვლილებების (ფლუქტუაციების) შეფასების შესაძლებლობა. ასეთივე მათემატიკური მოდელი შეიძლება გამოვიყენოთ პაკეტების შესაძლო სიგრძეთა აღწერისათვის. პაკეტების შემოსვლის დროის მომენტებისა და პაკეტების სიგრძეთა განსაზღვრისათვის მიზანშეწონილი მათემატიკური მოდელის შერჩევითა და რიგთა თეორიის მეთოდების გამოყენებით, შეიძლება

ვიწინასწარმეტყველოთ რიგში დგომისა და ბუფერში სრული დაყოვნების სტატისტიკური მახასიათებლები.

1.5. მარკოვის ჯაჭვები და M/M/1 ტიპის რიგი

მარკოვის ჯაჭვები მიეკუთვნება შემთხვევითი პროცესების კლასის მოდელს. ეს მოდელები ხელსაყრელია, შემდეგი ორი მიზეზის გამო:

1. სხვადასხვა ფიზიკური პროცესები (სისტემები) შესწავლისათვის წარმოადგენენ განზოგადოებული მოდელირების მეთოდს;
2. მარკოვის ჯაჭვების თეორია წარმოადგენს შესაბამისი მოდელის პარამეტრების რიცხვითი შეფასების მეთოდს.

მარკოვის ჯაჭვები ასახავს $X=\{x_t, t \geq 0\}$ შემთხვევით პროცესს, რომელიც გამოხატავს X -ის თვლად სიმრავლეში, შემთხვევით ცვლილებებს, ანუ x_t აღნიშნავს დროის t მომენტში სისტემის რაიმე მდგომარეობას. X სიმრავლეს ეწოდება მდგომარეობათა სივრცე, ხოლო X -ის ელემენტებს ეწოდებათ მდგომარეობები და მათი აღნიშვნა შეიძლება, როგორც $x.y.z$ და ა.შ. მარკოვის ჯაჭვი განსაზღვრავს x_t -ს X - ში გადასვლის შემთხვევით კანონს. თუ დროის t მომენტისათვის მოცემულია პირობა, რომ $x_t=x$ და მოცემულია X მნიშვნელობები t მომენტამდე, მაშინ $x_{t+\varepsilon}=y$ მდგომარეობაში გადასვლის პირობითი ალბათობა იქნება:

$$P\{x_{t+\varepsilon} = y | x_t = x; x_s, s < t\} = \begin{cases} q(x, y)\varepsilon + 0(\varepsilon), & \text{როდესაც } y \neq x \\ 1 - \sum_{z \neq x} q(x, z)\varepsilon + 0(\varepsilon), & \text{როდესაც } y = x \end{cases} \quad (1.1)$$

სადაც: $0(\varepsilon)$ არის ისეთი $\varepsilon > 0$ ცვლადი ფუნქცია, რომელიც, როდესაც $0(\varepsilon)/\varepsilon \rightarrow 0$, თუ $\varepsilon \rightarrow 0$, ხოლო $\{q(x,y), x \neq y \in X\}$, წარმოადგენს ისეთი ნამდვილი დადებითი მნიშვნელობების ერთობლიობას, რომ $\sum_{y \neq x} q(x,y) < \infty$, ყველა $x \in X$ – თვის.

ამრიგად x_t გადადის x მდგომარეობიდან $y \neq x$ - ში $q(x, y)\varepsilon$ ალბათობით, $\varepsilon \ll 1$ დროის შუალედში. $Q(x_t, y)$ რიცხვითი მნიშვნელობებს ეწოდებათ X -ში გადასვლის ინტენსიობები. ამასთანავე, t დროის მომენტის შემდეგ X -ში ცვლილებები დამოკიდებულია, მხოლოდ t მომენტში არსებულ მდგომარეობაზე. ყოველივე ეს კი მიუთითებს, რომ X პროცესით მოდელირებულ სისტემას არ გააჩნია მეხსიერება, ანუ, ეს სისტემა „ივიწყებს“, თუ როგორ მოვიდა მოცემულ მდგომარეობაში.

მნიშვნელოვან მოვლენას წარმოადგენს X -ის მიახლოება გარკვეულ სტატისტიკურ წონასწორობასთან, ე.ი. მდგრად მდგომარეობასთან. ანუ, $P\{x_t = x\}$ ალბათობას შეუძლია მიუახლოვდეს არა t -ზე, არამედ x -ზე დამოკიდებულ მუდმივ სიდიდეს, როდესაც $t \rightarrow \infty$? ეს არის დასმული კითხვა, რომლის პასუხი გვაძლევს საშუალებას, ვიპოვოთ სისტემის გარკვეულ მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობა, რასაც გამოვიყენებთ სისტემის პარამეტრების განსაზღვრისათვის.

მაგალითად, თუ კავშირგაბმულობის ქსელი X -ით არის მოდელირებული, მაშინ ზღვრული ალბათობები განსაზღვრავენ მისი დატვირთულობის სიდიდის ალბათობას. $P\{x_t = x\}$ ცვლილების შეფასების მიზნით, უნდა განვსაზღვროს:

$$\pi_1 = \{x_t = x\}, x \in X - \text{თვის.}$$

გამოვიყენოთ (1) და ვიპოვოთ:

$$\pi_{t+\varepsilon}(y) = \sum_{x \neq y} \pi_t(x)[q(x, y)]\varepsilon + 0(\varepsilon)] + \pi_t(y)[1 - \sum_{x \neq y} q(y, x)\varepsilon + 0(\varepsilon)]. \quad (1.2)$$

ამ თანაფარდობიდან ჩანს რომ $x_{t+\varepsilon}$ ტოლია y , როდესაც x_t შეესაბამება $x \neq y$ ზოგიერთ მნიშვნელობებს და ε დროის განმავლობაში X გადადის x მდგომარეობიდან y -ში ან თუ x_t ტოლია y და X რჩება y -ის ტოლი დროის მომდევნო ε ინტერვალში. თუ განტოლების ორივე მხარეს გამოვაკლებთ $\pi_t(y) - \varepsilon$, სხვაობას გავყოფთ ε -ზე მაშინ, როდესაც $\varepsilon \rightarrow 0$, მივიღებთ:

$$\frac{d\pi_t(y)}{dt} = \sum_x \pi_t(x)q(x,y) \quad (1.3)$$

სადაც განმარტების შესაბამისად

$$q(x,y) = -\sum_{y \neq x} q(x,y).$$

(1.3) განტოლება აღწერს $\pi_t(\cdot)$ -ს ცვლილებას, ვიპოვოთ მისი ინვარიანტული ამოხსნა, ანუ ამოხსნა, რომელიც არ არის დამოკიდებული t -ზე. დავუშვათ, რომ $\pi_t(x) \equiv \pi(x), x \in X$ – სთვის. თუ $\pi_t(x) \equiv \pi(x)$, თანაფარდობა (1.3) დებულობს შემდეგ სახეს:

$$0 = \sum_x \pi(x)q(x,y). \quad (1.4)$$

თუ გამოვიყენებთ $q(x,y)$ -ის განსაზღვრას, მაშინ:

$$\pi(y) \sum_{x \neq y} \pi(x)q(x,y) = \sum_{x \neq y} \pi(x)q(x,y) \quad x \in X - \text{სათვის.} \quad (1.5)$$

მიღებულ განტოლებებს ეწოდებათ წონასწორობის განტოლებები, რომლებიც გამოხატავენ y -დან სხვა მდგომარეობებში გადასვლის ინტენსიობებს, კერძოდ, ტოლობის მარცხენა მხარე.

ამრიგად, განხილული გარდაქმნები გვაძლევს საშუალებას დავასკვნათ, რომ თუ x_t -ს ალბათობების განაწილება არ არის დამოკიდებული t -ზე, ის უნდა აკმაყოფილებდეს (1.5) თანაფარდობას.

როდესაც x_t ალბათობის განაწილება არ არის დამოკიდებული t -ზე სისტემა არის მდგრად (დამყარებულ) მდგომარეობაში.

შევისწავლოთ, თუ რამდენი ამონახსნი შეიძლება ჰქონდეს (1.5) განტოლებას და აგრეთვე, თუ სისტემა არ იმყოფება მდგრად მდგომარეობაში, დროთა ვითარებაში ეს სისტემა შეძლებს თუ არა მდგრადი მდგომარეობის მიღწევას. მარკოვის ჯაჭვს ეწოდება დაყვანილი იმ შემთხვევაში, როდესაც მას შეუძლია ნებისმიერი მდგომარეობიდან სხვა, ნებისმიერ მდგომარეობაში გადასვლა, სხვადასხვა შესაძლო ნახტომების გაკეთების შემდეგ. თუ მარკოვის

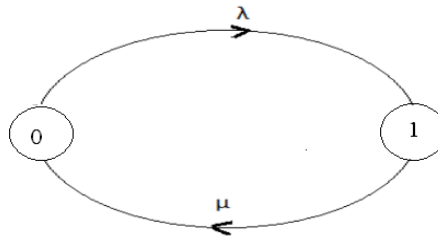
X ჯაჭვი დაუყვანელია, მაშინ (1.5) განტოლებას აქვს მხოლოდ ერთი ამონახსნი, ამასთანავე, თუ არსებობს π ამონახსნი, მაშინ

$$\pi_t \rightarrow \pi(x), \text{ როდესაც } t \rightarrow \infty, \text{ ყველა } x \in X - \text{სთვის.}$$

განვიხილოთ, შემდეგი წესით განსაზღვრული მარკოვის ჯაჭვი:

$$X = \{0,1\}, q(0,1) = \lambda, q(1,0) = \mu,$$

სადაც μ და λ არის დადებითი, ნამდვილი რიცხვები. ასეთი წესით განსაზღვრული მარკოვის ჯაჭვი ასახულია ნახ.1-ზე მოცემული გადასვლების დიაგრამით.



ნახ.1. გადასვლების დიაგრამა.

დიაგრამა ასახავს მდგომარეობიდან მდგომარეობაში შესაძლო გადასვლებს და გადასვლების ინტენსიობას. ამ კერძო შემთხვევისათვის წონასწორობის (1.5) განტოლებას ექნება შემდეგი სახე:

$$\pi(0)\lambda = \pi(1)\mu \quad \text{და} \quad \pi(1)\mu = \pi(0)\lambda$$

ამრიგად, ორივე განტოლება ერთმანეთს დაემთხვა და შესაბამისად აღარ წარმოადგენს საკმარის პირობას π -ს ინვარიანტული განაწილების განსაზღვრისათვის. ამასთანავე ცნობილია, რომ π უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგი განტოლების პირობას:

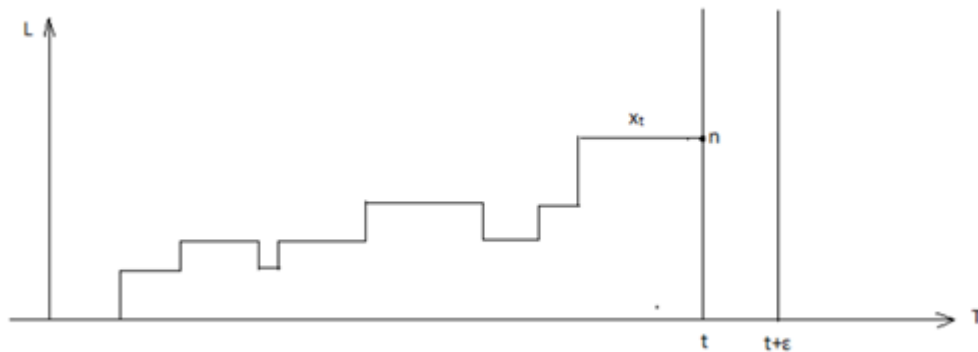
$$\sum_{x \in X} \pi(x) = 1, \text{ რადგანაც } \pi \text{ წარმოადგენს ალბათობათა განაწილებას.}$$

ამრიგად, $\pi(0) + \pi(1) = 1$. ამ პირობის გათვალისწინებით და წონასწორობის განტოლებების ჩათვლით ვღებულობთ:

$$\pi(0) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad \text{და} \quad \pi(1) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

π ვექტორი არის ალბათობათა ერთადერთი ინვარიანტული განაწილება, რადგანაც, აგრეთვე $\pi_t(0) \rightarrow \pi(0)$ და $\pi_t(1) \rightarrow \pi(1)$ მარკოვის ჯაჭვი დაუყვანელია.

დავასაბუთოთ, რომ M/M/1 ტიპის რიგის $X = \{x_t, t \geq 0\}$ სიგრძე წარმოადგენს მარკოვის ჯაჭვს, ანუ უნდა დავასაბუთოთ (1.1) გამოსახულების სამართლიანობა.



ნახ. 2. M/M/1 რიგის სიგრძის ცვლილება.

ნახ.2-დან რიგის სიგრძე $t > 0$ დროის მომენტამდე განისაზღვრება სიდიდით $x_t = n > 0$. იმის ალბათობა, რომ შესრულდება პირობა $x_{t+\varepsilon} = n + 1$ ტოლია ალბათობისა, რომ თანმიმდევრულ მოთხოვნათა შორის დროის ინტერვალი, რომელიც ჯერ კიდევ გრძელდება t დროის მომენტში, დასრულდება $(t, t + \varepsilon)$ დროის ინტერვალში და სერვერი დროის ამ ინტერვალში, ვერ დაასრულებს მომსახურებას.

რეალური სტატისტიკური მონაცემების საფუძველზე, ცნობილი უნდა იყოს, როდის დაიწყო ორ თანმიმდევრულ მოთხოვნათა შორის დროის ინტერვალი და როდის დაიწყო მოთხოვნის მომსახურება. ვინაიდან, ეს შემთხვევითი სიდიდეები განაწილებულია ექსპონენციალური კანონით და

ისინი არ არიან დამოკიდებული წინმსწრებ მოვლენებზე, რაც იმას ნიშნავს, რომ დროის წინა ინტერვალში, რიგის სიგრძეზე ჩატარებული დაკვირვებით, იმის ალბათობა, რომ დროის მომდევნო ε ინტერვალში შემოვა ერთი მოთხოვნა, ტოლია $\lambda\varepsilon + 0(\varepsilon)$. ასევე, იმის ალბათობა, რომ t დროის მომენტში დაწყებული მომსახურება დასრულდება ε დროის მონაკვეთში, ტოლია $\mu\varepsilon + 0(\varepsilon)$.

შესაბამისად, t დროის მომენტამდე განვითარებული პროცესის გათვალისწინებით, იმის ალბათობა, რომ $x_{t+\varepsilon} = n + 1$ აღწერილი იქნება:

$$\{\lambda\varepsilon + 0(\varepsilon)\} \cdot \{1 - \mu\varepsilon - 0(\varepsilon)\} = \lambda\varepsilon + 0(\varepsilon).$$

იმის გათვალისწინებით, რომ $0(\varepsilon)0(\varepsilon) + 0(\varepsilon)$, $0(\varepsilon)\varepsilon$ და ε^2 შეესაბამებიან $0(\varepsilon)$ სიდიდეს, მიღებული შედეგი შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$P[x_{t+\varepsilon} = n + 1 | x_t = n; x_s, S < t] = \lambda\varepsilon + 0(\varepsilon) \tag{1.7}$$

სადაც S არის ბუფერიდან პაკეტის გადაცემის დროის ხანგრძლიობა.

ამავე ხერხით შეიძლება დავამტკიცოთ, რომ:

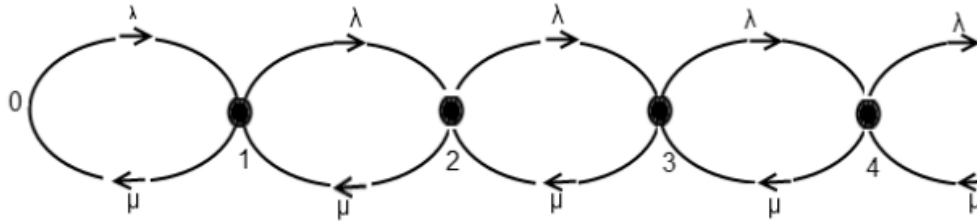
$$P[x_{t+\varepsilon} = n - 1 | x_t = n; x_s, S < t] = \begin{cases} \mu\varepsilon + 0(\varepsilon), & \text{თუ } n > 0 \\ 0, & \text{თუ } n = 0 \end{cases} \tag{1.8}$$

ამრიგად, მდგომარეობათა სივრცე წარმოადგენს მარკოვის ჯაჭვს, გადასვლების შემდეგი ინტენსიობებით:

$$q(n, n + 1) = \lambda \quad \text{და} \quad q(n, n+1) = \mu, \quad \text{როდესაც } n \geq 0; \tag{1.9}$$

$$q(m, n) = 0 \quad \text{როდესაც } |m - n| > 1$$

მიღებული თანაფარდობები შეიძლება წარმოვადგინოთ გადასვლების შემდეგი დიაგრამის სახით:



ნახ.3. M/M/1 ტიპის რიგის გადასვლების დიაგრამა.

M/M/1 რიგი არის დაუყვანელი მარკოვის ჯაჭვი იმიტომ, რომ რიგის სიგრძემ შეიძლება მიაღწიოს ნებისმიერ მნიშვნელობას, მიუხედავად მისი საწყისი მნიშვნელობისა. ამრიგად, თუ წონასწორობის განტოლებებს აქვთ ამონახსნი, ეს ამონახსნი არის ერთადერთი და წარმოადგენს რიგის სიგრძის მნიშვნელობის „ზღვრული“განაწილებას. მე (1.5) წონასწორობის განტოლება, (1.9) – ის გათვალისწინებით, იღებს შემდეგ სახეს:

$$\pi(0)\lambda = \pi(1)\mu;$$

$$\pi(1)\{\lambda + \mu\} = \pi(0)\lambda + \lambda(2)\mu;$$

$$\pi(2)\{\lambda + \mu\} = \pi(1)\lambda + \pi(3)\mu \text{ და ასე შემდეგ.}$$

ამ განტოლებების ამოხსნის მიზნით, პირველი განტოლებიდან განსაზღვრული $\pi(1)\mu = \pi(0)\lambda$ გამოვაკლოთ მეორე განტოლებას და მივიღებთ $\pi(1)\lambda = \pi(2)\mu$. თუ მესამე განტოლებას გამოვაკლებთ $\pi(1)\mu = \pi(2)\lambda$, მივიღებთ $\pi(2)\lambda = \pi(3)\mu$ და ა. შ. თუ გავაგრძელებთ მოქმედებებს, მივიღებთ:

$$\pi(n)\lambda = \pi(n+1)\mu, \quad n \geq 0 \text{ სათვის} \quad (1.10)$$

ავღნიშნოთ, რომ $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ და მიღებული განტოლება გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\pi(n+1) = \rho\pi(n), \quad n \geq 0 \text{ სათვის.}$$

ამრიგად, $\pi(n) = \rho^n \pi(0)$. ეს თანაფარდობა ასაბუთებს, რომ წონასწორობის განტოლებებს აქვთ ამონახსნი, თუ $\rho < 1$, ანუ $\lambda < \mu$.

ამ შემთხვევაში, $\pi(0)$ -ის ისე შერჩევა, რომ $\{\pi(n), n \geq 0\}$ მნიშვნელობების ჯამი ტოლი იყოს 1-ის, გვაძლევს:

$$\pi(n) = (1 - \rho) \rho^n, \quad n \geq 0 - \text{სათვის.} \quad (1.11)$$

მე-(10) თანაფარდობა ასახავს წონასწორობის მდგომარეობაში მყოფ სისტემაში x_t -ს $A = \{0, 1, \dots, n\}$ - სიმრავლიდან $A' = \{n+1, n+2, \dots\}$ სიმრავლისაკენ გადასვლების ინტენსიობების და x_t -ს A' სიმრავლიდან A - სიმრავლისაკენ გადასვლების ინტენსიობების ტოლობას.

დავუშვათ, რომ $X = \{x_t, t \geq 0\}$ არის მარკოვის ჯაჭვი მდგომარეობათა X სივრცით და $\{q(x, y), x \neq y \in X\}$ გადასვლების ინტენსიობით. თუ ამ შემთხვევაში A არის X სიმრავლის ქვესიმრავლე, ხოლო თუ $A' = X - A$ წარმოადგენს A -ს დამატებას, მაშინ:

$$\sum_{x \in A} \sum_{y \in A'} \pi(x) q(x, y) = \sum_{x \in A'} \sum_{y \in A} \pi(x) q(x, y)$$

ამ შედეგის შინაარსი იმაში მდგომარეობს რომ როდესაც მდგომარეობათა სივრცე X არის მდგრად მდგომარეობაში, A -დან გადასვლის ინტენსიობები ტოლია A -ში გადასვლის ინტენსიობების, რასაც ადასტურებს განტოლება (1.5).

1.6. M/M/1 ტიპის რიგის მოდელი

განვიხილოთ ბუფერი, რომელსაც გააჩნია პაკეტების გადამცემი, ანუ პაკეტების გადაცემის უნარი. დავუშვათ, რომ ბუფერში პაკეტები შემოდის თანმიმდევრობით $0 < T_1 < T_2 < T_3 \dots$ დროის მომენტებში და ბუფერი ახდენს მათ გადაცემას, FIFO წესით, $S_1, S_2, S_3 \dots$ დროის ხანგრძლიობებით.

სისტემას ეწოდება M/M/1 ტიპი რიგით, თუ:

- პაკეტების შემოსვლებს შორის დროის შემთხვევითი ინტერვალები $T_1, T_2-T_1, T_3-T_2, \dots$ დამოუკიდებელია და ერთგვაროვნად არიან განაწილებული, ალბათობით:

$$P\{T_{n+1} - T_n \geq t\} = e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (1.12)$$

ამრიგად, პაკეტების შემოსვლებს შორის დროის ინტერვალები განაწილებულია ექსპონენციალურად, $\lambda > 0$ პარამეტრით ანუ პაკეტების შემოსვლის T_n დროის მომენტები ემნიან პუასონის ტიპის პროცესს, λ პარამეტრით;

- გადაცემის S_n დროის ინტერვალები დამოუკიდებელია, ექსპონენციალურად განაწილებული შემთხვევითი სიდიდეები μ პარამეტრით. პაკეტების სიგრძეებიც, აგრეთვე ურთიერთდამოუკიდებელი სიდიდეებია, განაწილებულები ექსპონენციალური კანონით μ^{-1} მათემატიკური მოლოდინით, განზომილებით ბიტებში. შესაბამისად:

$$P\{S_n \geq t\} = e^{-\mu t}, \quad t \geq 0 \quad (1.13)$$

M/M/1 აღნიშნავს მოდელის ტიპს, სადაც პირველი M მიუთითებს, რომ პაკეტების შემოსვლის პროცესი მიმდინარეობს მეხსიერების გარეშე, ანუ უკუქმედების გარეშე; მეორე M მიუთითებს რომ მომსახურების დროის ხანგრძლიობებსაც არ გააჩნიათ მეხსიერება. M/M/1 პირობით აღნიშვნაში ციფრი“1“ მიუთითებს რომ რიგს ემსახურება მხოლოდ ერთი გამოსასვლელი ანუ ერთი სერვერი.

ავღნიშნოთ x_t პაკეტების ის რაოდენობა, რომლებიც ან ბუფერშია, ან მიმდინარეობს მათი გადაცემის პროცესი $t > 0$ დროის განმავლობაში, ამ შემთხვევაში სისტემაში, რომელიც წარმოადგენს M/M/1 ტიპის რიგს, სტატისტიკურ წონასწორობის პირობებში, სამართლიანია შემდეგი თანაფარდობა:

$$P\{x_i=n\} = \rho^n(1-\rho), n \geq 0 \quad \text{როდესაც } \rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1 \quad (1.14)$$

თუ $\lambda \geq \mu$ მაშინ ბუფერში პაკეტების საშუალო რიცხვი უსასრულოა, ანუ არ არის გათვალისწინებული პაკეტების შემოსვლის შეზღუდვის სისტემა, რიგი მუდმივად იზრდება.

$\lambda < \mu$ მაშინ (14) –ის საფუძველზე რიგის საშუალო სიგრძე ტოლია:

$$L = E\{x_i\} = \sum_{n=0}^{\infty} n \rho^n \{x_i = n\} = \frac{\rho}{1-\rho} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \quad (1.15)$$

იმისათვის, რომ გამოვიყენოთ (1.15) თანაფარდობა, გათვალისწინებულია, რომ პაკეტების გადაცემის ხანგრძლიობები ტოლია $S_n = L_n/R$, ხოლო ამის შემდეგ ისინი ურთიერთდამოუკიდებელი სიდიდეებია, განაწილებული ექსპონენციალურად და მათემატიკური მოლოდინით $\mu^{-1} = 1 \frac{\text{მწმ}}{\text{პაკეტზე}}$. მართლაც:

$$P\{S_n \geq t\} = P\left\{\frac{L_n}{R} \geq t\right\} = P\{L_n \geq Rt\} = e^{-aRt} = e^{-\mu t}.$$

გამოვიყენოთ ფორმულა (1.15) სისტემის ბუფერში პაკეტის დაყოვნების საშუალო T დროის განსაზღვრისათვის. საშუალო T დაყოვნება დაკავშირებულია რიგის საშუალო სიგრძესთან ლიტლის ფორმულით:

$$L = \lambda T, \quad (1.16)$$

შესაბამისად, M/M/1 ტიპის რიგისათვის მივიღებთ:

$$T = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (1.17)$$

ლიტლის (1.16) ფორმულა სამართლიანია რიგის შემცველი სისტემების ფართო კლასისათვის. ამ შედეგის გამოყენების მაგალითი განვიხილოთ მასობრივი მომსახურების სისტემისათვის მოწესრიგებული რიგით (მომსახურების წესი: პირველი შემოვიდა, პირველს მოემსახურენ, (FIFO, First-In- First-Out).

1.7. მიღებული შედეგების გამოყენება სტატისტიკური მულტიპლექსირების შეფასებისათვის

დროში განცალკევების მეთოდით მულტიპლექსირების ნაცვლად სტატისტიკური მულტიპლექსირების გამოყენების შედეგად მიღწეული მოგება შეიძლება წარმატებით იქნას შეფასებული მიღებული შედეგების საფუძველზე. განვიხილოთ არხი R გადაცემის სიჩქარით, რომელიც გადასცემს პაკეტების N ნაკადს, ყოველ ნაკადში პაკეტების შემოსვლის λ ინტენსიობით (პაკეტი/წმ). დაუშვათ, რომ პაკეტებს შორის დროის ინტერვალები ქმნიან ურთიერთდამოუკიდებელ პუასონის ნაკადს λ პარამეტრით და პაკეტების სიგრძეებიც ურთიერთდამოუკიდებელია და განაწილებულია ექსპონენციალურად, L მათემატიკური მოლოდინით.

დროში განცალკევებით მულტიპლექსირება წარმოადგენს გადამცემის გამტარუნარიანობის დაყოფას N არხად, თითოეულ არხში R/N გადაცემის სიჩქარით. პაკეტების ყოველი ნაკადის მოდელირება შეიძლება M/M/1 ტიპის რიგით, პაკეტების შემოსვლის λ პაკეტი/წმ ინტენსიობით და გადამცემის სიჩქარით $\mu = \frac{R}{LN}$ პაკეტი/წმ.

პაკეტის საშუალო დაყოვნება განისაზღვრება (1.17) ფორმულით:

$$T = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

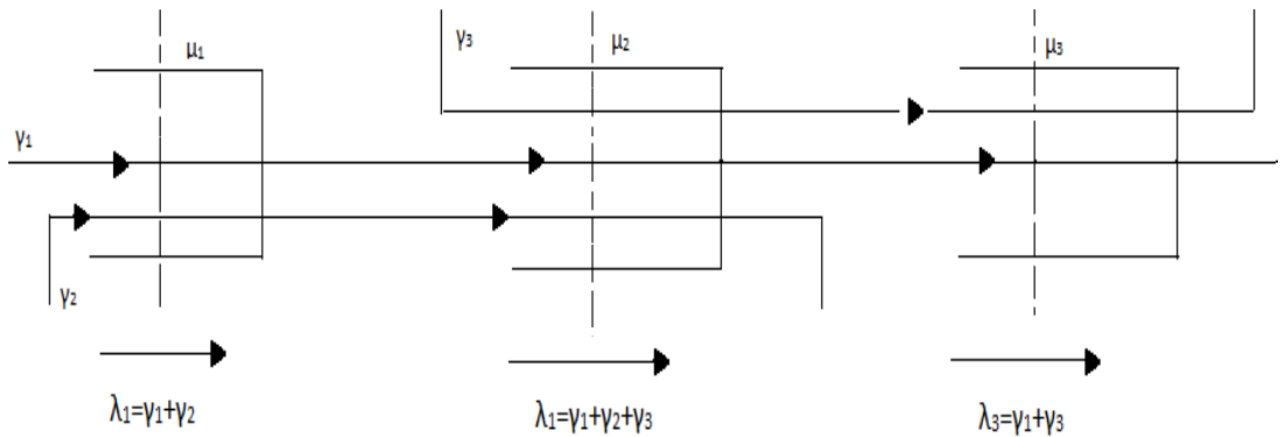
სტატისტიკური მულტიპლექსირების დროს ხდება პაკეტების N ნაკადების ერთი და იგივე ბუფერში დაგროვება და თითოეული პაკეტის თანმიმდევრობით გადაცემა. ამ შემთხვევაში პაკეტების ერთ ბუფერში შემოსვლის ინტენსიობა იქნება $N \times \lambda$ და ეს ნაკადიც, აგრეთვე არის პუასონის პროცესი. შესაბამისად, ასეთი სისტემის მოდელირება შეიძლება M/M/1 ტიპის რიგით, პაკეტების შემოსვლის $N \times \lambda$ ინტენსიობითა და $\frac{R}{L} = N \times \mu \frac{\text{პაკეტი}}{\text{წმ}}$ გადაცემის სიჩქარით. ამ შემთხვევაში დაყოვნების საშუალო სიდიდე იქნება:

$$\frac{1}{N \times \mu - N \times \lambda} = \frac{T}{N} \quad (1.18)$$

ამრიგად, სტატისტიკური მულტიპლექსირების გამოყენების შემთხვევაში სისტემაში ერთი პაკეტის საშუალო დაყოვნება შეადგენს დროითი განცალკევების მეთოდით მულტიპლექსირების დაყოვნების $1/N$ ნაწილს.

1.8. ქსელი M/M/1 რიგებით

საზოგადოდ, ქსელი შეიცავს ერთზე მეტ ბუფერს. განვიხილოთ ასეთ შემთხვევაში ქსელში პაკეტების საშუალო დაყოვნების შეფასების შესაძლებლობა.



ნახ.4. ქსელი სამი ბუფერით.

მოცემული ნახაზის შესაბამისად ქსელი ატარებს პაკეტების სამ ნაკადს. დაუშვათ, რომ შემომავალი ნაკადები, ნახაზზე აღნიშნული ინტენსიობებით, არის პუასონის ტიპის. დაუშვათ, რომ სამივე ბუფერში მომსახურების დროის ხანგრძლიობები არის ურთიერთდამოუკიდებლები, ექსპონენციალური კანონით განაწილებულები ნახ. 4- ზე აღნიშნული პარამეტრებით.

მოცემულ ქსელში რიგები შეიძლება განვიხილოთ ცალ-ცალკე, ანუ შესაძლებელია დასაბუთება, რომ ცალკეულ ბუფერებში პაკეტების საშუალო რიცხვი განისაზღვრება (1.15) ფორმულით. მაგალითად, $i = 1, 2, 3$ – სთვის i – ურ ბუფერში პაკეტების L_i რიცხვი ტოლია:

$$L_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i - \lambda_i} \quad (1.19)$$

აქ λ_i არის i – ურ ბუფერში გამავალი პაკეტების საშუალო ინტენსიობა. ნახ.3 – ის მიხედვით $\lambda_1 = \gamma_1 + \gamma_2$, $\lambda_2 = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$ და $\lambda_3 = \gamma_1 + \gamma_3$

ქსელში პაკეტის საშუალო T დაყოვნება, ქსელში პაკეტების საშუალო L რიცხვთან დაკავშირებულია თანაფარდობით $L = \gamma \cdot T$, სადაც γ არის ქსელში პაკეტების შემოსვლის საშუალო ინტენსიობა. ნახ.4–ზე მოცემული ქსელისათვის:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad \text{და} \quad \gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 \quad (1.20)$$

განხილული მეთოდი შეიძლება განვაზოგადოთ საშუალო დაგროვების პრინციპის, ნებისმიერი არქიტექტურის ქსელისათვის. მართლაც, შეიძლება დავასაბუთოთ, რომ ქსელში პაკეტის საშუალო დაყოვნებისათვის სამართლიანია:

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{j=1}^l \frac{\lambda_j}{\mu_j - \lambda_j} \quad (1.21)$$

სადაც γ არის ქსელში პაკეტების ნაკადის საშუალო ინტენსიობა;

j ქსელში რიგების რაოდენობა;

λ_i ნაკადის საშუალო ინტენსიობა i –ურ რიგში;

μ_i გადაცემის საშუალო ინტენსიობა i –ურ რიგში.

(1.21) თანაფარდობა სამართლიანია:

- როდესაც, ქსელში პაკეტების ნაკადი არის ურთიერთდამოუკიდებელი პუასონის ტიპის პროცესი;
- რიგებიდან პაკეტების გადაცემის დროის ხანგრძლიობები არის ურთიერთდამოუკიდებელი და განაწილებულია ექსპონენციალურად.

პირველი პირობა რეალურად სრულდება ყოველთვის, ხოლო მეორე პირობა არ არის მკაცრი და იდეალიზირებულია. მართლაც, როდესაც პაკეტი მიმდევრობით გადის სხვადასხვა ბუფერების რიგებს, ცხადია პაკეტის გადაცემის დროის ხანგრძლიობები პაკეტის სიგრძის პროპორციულია და შესაბამისად შეუძლებელია, ურთიერთ-დამოუკიდებლობის გამორიცხვა. მიუხედავად ამისა, რეალური პროცესების მოდელირება გვამლევს საშუალებას დავასკვნათ, რომ (1.21) გამოსახულება სარწმუნოდ აფასებს პაკეტის დაყოვნების საშუალო მნიშვნელობას პაკეტების კომუტაციის, საშუალოდ დაგროვების პრინციპის ქსელებში.

თავი 2. ფრაქტალურობის არსებობის მიზეზები

ტელეტრაფიკის სფეროში

ქსელის რესურსების შეუზღუდავი რაოდენობისა და ტრაფიკის ურთიერთდამოუკიდებელი წყაროების შემთხვევაში ფრაქტალურობა (თვით მსგავსება) წარმოიქმნება ცალკეული, აქტიურ/პასიური (ON/OFF) წყაროების სიმრავლეთა გაერთიანების შედეგად. წყაროს აქტიური და პასიური პერიოდების განაწილება ხასიათდება მძიმე წაგრძელებებით და აქვს უსასრულო დისპერსია. აქტიურ/პასიური წყაროების სიმრავლის ზედდება ავლენს უსასრულო დისპერსიის მიდრეკილებას და ქსელში ჩამოყალიბებული გაერთიანებული ტრაფიკი არის თვითმსგავსი, რომლის სახეც მიისწრაფის ბროუნის მოძრაობის ტიპის ფრაქტალურობისაკენ. აქ ძირითადია აქტიურ/პასიური წყაროების მოქმედების მაღალცვალებადი ქცევა, ისევე როგორც მომხმარებელ/სერვერი არქიტექტურის შემთხვევაში. ასეთ მსჯელობას გააჩნია მნიშვნელოვანი ცდომილებების წყაროები, მაგალითად, ქსელის რესურსების შეუზღუდული რაოდენობა იწვევს ინფორმაციის წყაროებს შორის მკვეთრად გამოხატულ ურთიერთდამოკიდებულებას. ასევე, მართვის მექანიზმებიც, როგორებიცაა დაგეგმარების ალგორითმი (Operating System), გადაცემის მართვის პროტოკოლი (Transmission Control Protocol), Ethernet, ქსელის გადატვირთვის შემთხვევაში იძლევიან მიმდინარე პროცესების დამატებით დამახინჯებებს.

ქსელის ტრაფიკის თვითმსგავსე დაყვანის სირთულის ძირითადი მიზეზია ის, რომ არ არსებობს მკაფიოდ გამოკვეთილი, თვითმსგავსების გამომწვევი მიზეზობრივი ფაქტორები. ქსელის თვითმსგავს ტრაფიკში არსებული სხვადასხვა კორელაციები, შეიძლება წარმოიქმნან განსხვავებული მიზეზებით და მახასიათებლებში გამოვლიდნენ კონკრეტულ დროით მასშტაბებში. ეს შეიძლება იყოს ინფორმაციისა და ძეგნის სტრუქტურა

(მაგალითად დისკი და მეხსიერებაში არსებული პროგრამები), მომხმარებლის მხრიდან „მოფიქრების დროის ხანგრძლივობას“ და ფაილების გადაცემის უპირატესობები, საშუალოდ ბუფერების ეფექტი (ქეშირება), გადაცემის მართვის პროტოკოლი (TCP), Ethernet და ATM-მექანიზმების მართვა (მიერთების მართვა, გადატვირთულობების მართვა და სხვა).

ქსელის ტრაფიკში ხანგრძლივი დამოკიდებულების წარმოქმნის ძირითადი ფაქტორებია [2]:

- მომხმარებლის ქცევა;
- მონაცემთა გენერაცია, სტრუქტურა და მოძიება;
- ტრაფიკის გაერთიანება;
- ქსელის მართვის საშუალებები;
- უკუკავშირზე დაფუძნებული მართვის მექანიზმები;
- ქსელის განვითარება.

2.1. მომხმარებლის ქცევა

ტრაფიკის ხასიათზე მნიშვნელოვან ზეგავლენას ახდენს მომხმარებლის ქცევა (აქტიურ/პასიური დონე). კვლევები ადასტურებს, რომ სამომხმარებლო მოთხოვნათა განაწილება (დაფიქრების დროის ხანგრძლივობები) და ინტერნეტის დოკუმენტებისადმი უპირატესობები, დროის ფართო მასშტაბში ამჟღავნებს ფლუქტუაციების მაღალ ხარისხს [3,4]. გარდა ამისა ქსელის ტრაფიკის პულსირებული სტრუქტურის გაძილებას ხელს უწყობს ინფორმაციის ნაკადების მართვის სხვადასხვა მექანიზმები (მაგალითად, ვიდეო ტრაფიკი ბიტების ცვლადი ინტენსიობით – VBR „Variable Bit Rate“, მოძრავი გამოსახულებებისა და თანხმლები ხმის შეკუმშვის ალგორითმი – MPEG „Motion Pictures Experts Group“, ABR „Available Bitr Rate“ ანუ გადაცემის შესაძლო სიჩქარის მექანიზმი, გადაცემის მართვის პროტოკოლი), რომლებიც

ქსელის დატვირთულობის მდგომარეობიდან გამომდინარე, არეგულირებენ გამოსასვლელი ტრაფიკის ინტენსიობას, რაც აგრეთვე აძლიერებს ქსელის ტრაფიკის პულსირებულ სტრუქტურებს [5].

2.2. მონაცემთა გენერაცია, სტრუქტურა და მოძიება

თვითმსგავსი სტრუქტურის ტრაფიკის გაჩენის მნიშვნელოვანი მიზეზი დაკავშირებულია მონაცემთა წარმოქმნის წესთან. გაზომვების შედეგად გამოვლინდა [6], რომ ქსელისა და მომსახურების სახეობათა დონის ტრაფიკებში, წარმოადგენს ორგანოზომილებიანი თვისებების მატარებელს, რომელიც ნაწილობრივ დაკავშირებულია ფაილის (პაკეტის) უჯრედის შემოსვლებს შორის დროის შუალედების განაწილებების და ნაწილობრივ კი, ფაილის/პაკეტის ზომების განაწილებასთან. ამრიგად, მომსახურებათა სახეობების დონეზე ტრაფიკისათვის, თვითმსგავსების მდგომარეობა არ იქნება შექმნილი ხელოვნურად. ცალკეული მომსახურებათა სახეობები და მათი წყაროები ქმნიან ტრაფიკს სტატისტიკურად განსხვავებული მახასიათებლებით, მაგრამ ძირითადი სტატისტიკური მაჩვენებლებით, მაგრამ ძირითადი სტატისტიკური მაჩვენებლები (მაგალითად, კორელაციური სტრუქტურა), არის ინვარიანტული ერთი მანქანა/ქსელიდან მეორესაკენ. მაგალითად, როგორც ეს ნაჩვენებია [6], მომსახურების დონეზე ინფორმაციული ობიექტების ზომების განაწილება (მომხმარებელი/სერვერის პრინციპი), კარგად შეიძლება აღწერილი იქნას მძიმე წაგრძელებების ტიპის განაწილების ფუნქციით.

2.3. ტრაფიკის გაერთიანება

ცალკეული ინფორმაციული წყაროებიდან გენერირებული ტრაფიკის შენარჩუნება ერთმანეთისაგან იზოლირებულად დაკავშირებულია მნიშვნელოვან სირთულესთან, ქსელში ტრაფიკის გაერთიანების გამო (სტატისტიკური მულტიპლექსირება), რომელიც ხორციელდება ქსელებში პაკეტების (ან უჯრედების) კომუტაციით. აქტიურ/პასიური (ON/OFF) წყაროების სიმრავლის ზედდების შედეგად იქმნება უსასრულო დისპერსიის ტრაფიკი, რომელიც საბოლოოდ ყალიბდება, როგორც ქსელის თვითმსგავსი გაერთიანებული ტრაფიკი, რომელიც მიისწრავის ფრაქტალურ ბროუნის მოძრაობის ხასიათისაკენ. ტრაფიკში ხანგრძლივობის მახასიათებლებიც, აგრეთვე იჩენენ ქსელში მიმდინარე პროცესების მიმართ გაერთიანება, მდგრადობას (განცალკავება, რიგების წარმოქმნა, მართვის ორგანიზება). თვითმსგავსება შენარჩუნებულია მაშინაც, როდესაც ხდება ერთგვაროვანი და ურთიერთდამოკიდებული ინფორმაციული წყაროების ზედდება და გამტარუნარიანობისა და ბუფერის ტევადობის ცვლილება გადამკვეთ (ჯვარედინ) ტრაფიკებთან შერევა, რომელსაც გააჩნია განსხვავებული კორელაციური მახასიათებლები [7,8]

როდესაც კონკრეტული წყაროებიდან ხდება ტრაფიკის გენერირება ხანგრძლივი დამოკიდებულების ხასიათით, გაერთიანებული ტრაფიკიც იქნება ხანგრძლივი დამოკიდებულება გაერთიანებაში შემავალი სხვა ტრაფიკების მახასიათებლებისაგან დამოუკიდებლად. გაერთიანების პროცესი არის რთული და ნაკადის ყველა მახასიათებლები იცვლება, მათ შორის ხერსტის მაჩვენებელი, საშუალო მნიშვნელობა და დისპერსია [9,10].

2.4. ქსელის მართვის საშუალებები

ხანგრძლივი დამოკიდებულების ერთ–ერთ ძირთად მიზეზს წარმოადგენს, რეალურ ქსელებში არსებული რესურსების შეზღუდული მოცულობა (საკომუტაციო რესურსები, გამტარუნარიანობა, ბუფერების შეზღუდული ზომები, მონაცემთა დამუშავების სიჩქარის შეზღუდული შესაძლებლობები). ასეთ პირობებში ტრაფიკს, გარდა ხანგრძლივი დამოკიდებულების ხასიათისა გააჩნია მძიმე წაგრძელების განაწილება, რაც ტრაფიკის მომსახურების თვალსაზრისით საჭიროებს დიდი მოცულობის რესურსებს. ტრაფიკის მართვის მექანიზმების გამოყენების პროცესში შესაძლებელია არაწრფივი დამოკიდებულებების წარმოშობა, მართლაც, რესურსების რაოდენობის შეზღუდვის გამო, სხვადასხვა კონფლიქტური ვითარებები ვერ მოგვარდება მარტივი მეთოდებით. ამასთანავე, ეს პრობლემა შეიძლება წარმოიქმნას ნებისმიერ გარემოში, დაწყებული რიგების წარმოქმნის უმარტივესი მოდელებიდან, მართვის ურთულეს მექანიზმებამდე. როდესაც არ არის ნაკადის მართვის მექანიზმები, მაგალითად UDP (User Datagram Protocol) - მომხმარებლის დატაგრამების გადაცემის პროტოკოლი, ქსელში წარმოქმნილი ტრაფიკი ნაკლებად ავლენს ფრაქტალურობის თვისებებს, ანუ ქსელის ტრაფიკში ხანგრძლივი დამოკიდებულება წარმოიქმნება მძიმე წაგრძელებების მქონე განაწილების ფაილების გადაცემის დროს და როდესაც არხის გამტარუნარიანობა შეზღუდულია. ხანგრძლივი დამოკიდებულების ტრაფიკის მართვის პრობლემა კიდევ უფრო რთულდება, როდესაც დიდი რაოდენობის მომხმარებლები ცდილობენ მიიღონ მომსახურება შეზღუდული რაოდენობის რესურსების პირობებში, აქედან გამომდინარე, ქსელის რესურსების კორექტული განაწილება არის უმნიშვნელოვანესი ამოცანა, რაც კიდევ უფრო მკვეთრი ხდება ქსელის მრავალგანზომილებიანი სტრუქტურის გამო, მაგალითად აპარატურული უნზრუნველყოფის მოთხოვნილების შემთხვევაში

(CPU - Central Processing Unit, ანუ ცენტრალური პროცესორი), ან: მეხსიერების, გამტარუნარიანობის, პროგრამული საშუალებების (ოპერატიული სისტემის დაგეგმარების სტრატეგია, პრიორიტეტული პროცესები) და ა.შ.

2.5. უკუკავშირზე დაფუძნებული მართვის მექანიზმები

სირთულეების ერთ-ერთ მიზეზს წარმოადგენს მართვის ისეთი მექანიზმების დიდი რაოდენობის არსებობა, რომლებშიც გამოყენებულია უკუკავშირი, მაგალითად, ნაკადისა და გადატვირთულობის მექანიზმი (TCP, რომელშიც მართვის მექანიზმები ეფუძნება ნაკადის ინტენსიობის გამოვლენას და ა.შ.) ეს მიუთითებს, რომ გადატვირთულობის შემთხვევაში შეიძლება თავი იჩინოს დამატებითმა არაწრფიობამ, სისტემის დინამიური ქმედებების შესაძლებლობათა დიდი დიაპაზონით, ისეთებმა, როგორებიცაა მულტიმდგრადობა და ქაოსი [11]. მნიშვნელოვანია იმის აღნიშვნა, რომ მსგავს შემთხვევაში შეიძლება წარმოიქნას ძალზე რთული ურთიერთკავშირები დატვირთვის ფლუქტუაციებსა და ქსელის მართვის სხვადასხვა მექანიზმებს შორის. ეს ურთიერთქმედებები, არამარტო ტრაფიკის ფრაქტალური სტრუქტურის (მაგალითად, ტრაფიკის ფორმირება, UDP-User Datagram Protocol) მართვისათვის, არამედ გარკვეულ პირობებში ამ ურთიერთქმედებებს შეუძლიათ შექმნან და გააძლიერებინ კიდევ ფრაქტალური სტრუქტურები (მაგალითად, ოპერაციული სისტემის კონფლიქტური დაგეგმარება, TCP და Ethernet) [9]. ამ შემთხვევაში წარმოიქმნება ორი კლასის სპეციფიკური პრობლემები: რეალური ტრაფიკის ზეგავლენა მართვის კონკრეტული მექანიზმების ეფექტურობაზე და ტრაფიკის ხასიათის ცვლილებების ხარისხი მართვის მექანიზმების ზეგავლენით.

2.6. ქსელის განვითარება

ქსელში ტრაფიკის პულსირებადი სტრუქტურის ზრდის მნიშვნელოვან მიზეზს წარმოადგენს ქსელის განვითარება, რაც დაკავშირებულია ახალი სერვისებისა და მომსახურების სახეობების შემოტანის უწყვეტ პროცესთან. ამის მაგალითად გამოდგება WWW-სერვისების შემოსვლა, რომლებმაც გამოიწვია ტრაფიკის სტრუქტურის გართულება.

საარხო დონის მახასიათებლების რაოდენობრივი შეფასებისა (მაგალითად Ethernet) უნდა განისაზღვროს ქსელის ტრაფიკის პარამეტრები მილიწამების ფარგლებში. ადამიანის ქცევის ზეგავლენა, რომელიც დაკავშირებულია მონაცემთა გენერაციასთან და ძებნასთან, განსაზღვრავს ტრაფიკის მახასიათებლებს ათობით წამებში (წუთებში და საათებშიც კი) [3]. შუალედებში, თავს იჩენს, ძირითადად მართვის მექანიზმების სხვადასხვა გავლენა. როგორებიცაა TCP (მისი დროის მასშტაბია წამები), რიგების მახასიათებლებს შეესაბამება ასეულობით მილიწამები [7].

2.7. ეფექტურობა

ეფექტური და გაერთიანებული საქსელო სტრუქტურების დამუშავების დროს, რომლის ფარგლებშიც სრულად არის გათვალისწინებული გამჭოლი მომსახურების ხარისხის (Qos-Quality of Service) უზრუნველყოფა თვითმსგავსების განმარტება და დასაბუთება არსებული რეალური ფიზიკური გარემოცვის საფუძველზე არ არის საკმარისი. აუცილებელია იმის მკაფიოდ გაგება, თუ რა ზეგავლენას ახდენს თვითმსგავსი სტრუქტურის არსებობა. ეს შეიძლება შეფასდეს, როგორც რიგების ფრაქტალურ აგებაზე ზეგავლენა (ანუ ფრაქტალური ტრაფიკებისათვის რიგების აგების მოდელები) და მართვაზე თვითმსგავსი სტრუქტურის ზეგავლენა.

კვლევების შედეგად დადგენილია, რომ ლოკალურ ქსელში LAN (Local Area Network) და გლობალურ ქსელში -WAN (Wide Area Network) არსებულ პაკეტურ ტრაფიკს თან ახლავს ხანგრძლივი დამოკიდებულებები. ქსელში პაკეტები შემოდისან ჯგუფებად. ხანგრძლივი დამოკიდებულების არსებობის გამო ხანგრძლივი დროის მასშტაბებში პულსაციების ზეგავლენა არ მოსწორდება მარტივად, კერძოდ, პაკეტების გაერთიანებით, ასეთი ტრაფიკი ინარჩუნებს ინფორმაციის წყაროს თვისებას, რომლებიც დალაგებულია წყაროს აქტიურ და პასიურ (ON/OFF) მდგომარეობებს შორის, სადაც ერთ-ერთ ასეთ მდგომარეობაში ყოფნის დრო განაწილებულია მძიმე წაგრძელებებით. ხანგრძლივი დამოკიდებულება ყალიბდება აქტიურ/პასიურ პერიოდების დიდ ფარგლებში ცვალებადობის გამო.

ინტერნეტის ქსელში მომსახურებათა სახეობების უდიდესი ნაწილი შეიძლება განხილული იქნას, როგორც მომხმარებელი/სერვერი არქიტექტურა. მომხმარებელი უგზავნის მოთხოვნას სერვერს (ეს არის მომხმარებლის მხარე აქტიურ/(ON) მდგომარეობაში), სერვერი პასუხობს, უგზავნის რა მომხმარებელს პასუხს (ეს არის სერვერის მხარე აქტიურ/(ON) მდგომარეობაში). მოთხოვნებსა და პასუხებს შორის დროის შუალედებში მომხმარებელი და სერვერი იმყოფებიან პასიურ (OFF) მდგომარეობაში. აქტიურ პერიოდის ხანგრძლიობა დამოკიდებულია მომსახურების სახეობისათვის საჭირო შეტყობინების ზომაზე. უმეტესად, შეტყობინება მოთხოვნის შემოსვლის შესახებ, ხანმოკლეა, მათი სიგრძეების განაწილება ხასიათდება მცირე დისპერსიით, პასუხის შესაბამისი შეტყობინებები უფრო, ხანგრძლივებია და მათი განაწილება ხასიათდება დიდი დისპერსიით. მომსახურების სახეობებთან დაკავშირებული პასუხის შეტყობინება ფრაგმენტირდება მომსახურების სახეობათა ბუფერში. ეს ბუფერები, თავის მხრივ, ანაწილებენ თავიანთ შემცველობას პაკეტებად („კასკადური ეფექტი“ [12]), რათა შეტყობინება გადაცემულ იქნას ქსელის გადამცემი რესურსით.

პასუხების ზომების დიდი ცვალებადობა უშუალოდ არის დაკავშირებული პაკეტების შემოსვლის ინტენსიობის მაღალ ცვალებადობასთან. პასიურ პერიოდები წარმოიქმნება მომხმარებლის უმოქმედობის გამო, ხოლო პასიური პერიოდების ცვალებადობა დაკავშირებულია განსხვავებული ტიპების მომხმარებელთა დიდი რაოდენობის არსებობასთან, რომლებიც ერთდროულად მუშაობენ ქსელში.

პაკეტების გადაცემა დამაბოლებელ წერტილებს შორის მიმდინარეობს დაყოვნებებისა და შეცდომების პირობებში. შეიძლება წარმოიქმნას ვითარება, როდესაც პაკეტები იქნება უარყოფილი გადატვირთული მარშრუტიზატორებისა და კომუტატორების მხრიდან. ხანგრძლივი დამოკიდებულების არსებობის გამო წარმოიქმნება ქსელის წარმადობასთან დაკავშირებული პრობლემები, კერძოდ გამტარუნარიანობასთან, კარგვებთან, ბუფერების დაკავებულობასთან. მაგალითად, ხანგრძლივი დამოკიდებულების არსებობის გამო, ტრაფიკის რიცხვითი და ანალიზური შეფასება ასაბუთებს, რომ რიგის განაწილების დაბოლოება მიიღწევა უფრო ნელა, ვიდრე ექსპონენციალური განაწილებაში, რომელიც აღწერს ტრადიციულ ტრაფიკს, ხანგრძლივი დამოკიდებულების არსებობის გარეშე. რიგის სიგრძესთან დაკავშირებული ასეთი ვითარება იწვევს საშუალოდ კვანძებში მომსახურებისთვის უფრო ხანგრძლივ ლოდინს.

სხვა მნიშვნელოვანი შედეგები, შემდეგში მდომარეობს:

- პაკეტების დაყოვნებები და ამის შესაბამისად, სერვისების გამოყენების დონეზე დაყოვნებებს აქვთ მძიმე წაგრძელებების ხასიათის განაწილება;

- სატრანსპორტო დონის პროტოკოლები (მაგალითად, TCP) შეაფასებენ რა ერთ და მეორე მხარეს სიგნალის გავლის ხანგრძლიობებს შესაბამისი დადასტურებების საფუძველზე, მათზე დამოკიდებული ხდებიან;

- გადატვირთულობების ვითარებები გარდაუვალია, რომლებიც ვლინდებიან ხანმოკლე იმპულსების სახით. დატვირთვის ზრდასთან ერთად,

გადატვირთულობები ვლინდებიან დროში განშორებულად და ამ ვითარებაში ტრაფიკის პულსირებული ხასიათი შენარჩუნებულია;

- მხოლოდ ბუფერების ზომების გაზრდას არ შეუძლია პაკეტების კარგების სტატისტიკის მნიშვნელოვნად გაუმჯობესება.

2.8. ტრაფიკის პულსირებადი სტრუქტურა

მულტისერვისულ ქსელში ტრაფიკზე ზემოქმედი უმნიშვნელოვანესი ფაქტორია, სერვისების ძირითადი სახეობების პულსირებადი სტრუქტურა, როგორებიცაა შეკუმშული ვიდეოინფორმაციის, ფაილების და სხვათა გადაცემა. თუ $\{T_n\}$ დროის მომენტებში შემოდის პაკეტები და ისინი წარმოადგენენ დროის ღერძზე კონცენტრირებულ (შეჯგუფებულ) თანმიმდევრობას, მაშინ ამ პროცესს აქვს პულსირებული სტრუქტურა, შესაბამისად, შემოსვლებს შორის დროის შუალედები $\{A_n\}$ მიისწრაფის გარკვეული რაოდენობის მოკლე შუალედების წარმოქმნისაკენ, რომელიც მოსდევს ასეთ ჯგუფამდე შემოსულ პაკეტებს შორის ხანგრძლივ პერიოდებს და ა.შ. შეიძლება გამოვყოთ პულსირებული სტრუქტურის წარმოქმნის ორი ძირითადი წყარო. ესენია, მარგინალური განაწილების ფორმა და $\{A_n\}$ -ს კორელაციური ფუნქცია. პულსირებადი სტრუქტურის ძირითადი მიზეზია დადებითი კორელაციები დიდ დაყოვნებებისას. დაგეგმარების პროცესში იყენებენ პულსირებადი სტრუქტურის უმარტივეს განზომილებას, კერძოდ, ტრაფიკის პირველი რიგის სტატისტიკურ მახასიათებლებს, რომლებიც დაკავშირებულია პაკეტების შემოსვლებს შორის დროის ინტერვალების განაწილებასთან. ტიპიურ მაგალითს წარმოადგენს ტრაფიკის ინტენსიობის პიკური მნიშვნელობის, საშუალო მნიშვნელობასთან ფარდობის განსაზღვრა (PMR-Peak to Mean Ratio), რაც ითვლება მხოლოდ მიახლოებით

განზომილებად, რადგანაც ის დამოკიდებულია ტრაფიკის ინტენსიობის გაზომვის დროის ინტერვალზე. პულსირებადი სტრუქტურის განზომილებად იყენებენ აგრეთვე პაკეტების შემოსვლებს შორის დროის ცვლილების კოეფიციენტს $C_A = \lambda_A \cdot \sigma_A$. საზოგადოდ ეს მახასიათებლები ასახავენ ტრაფიკის პულსირებად სტრუქტურას ძალზე ზედაპირულად. პულსირებადი სტრუქტურის უფრო ზუსტი განზომილების განსაზღვრისათვის იყენებენ პაკეტების შემოსვლებს შორის დროის ინტერვალების განაწილების, $\{A_n\}$ -ის, მეორე რიგის თვისებას (Second Order Properties), კერძოდ, განზომილებას, რომელიც დაკავშირებულია მის კორელაციურ ფუნქციასთან და პულსირებადი სტრუქტურის საზომ ერთეულად, თვითმსგავსების კონცეპციის საფუძველზე, გამოყენებულია ხერსტის მაჩვენებელი H .

ცნობილია მრავალი პულსირებადი სტრუქტურის აღწერის ორი მეთოდი – დისპერსიის ინდექსის და ტრაფიკის პიკურობის, რაც იძლევა პუასონის ტიპის ტრაფიკთან (PTC-Poisson Traffic Comparison) და სერვერების უსასრულო ჯგუფის არსებობის (ISE Infinite -Server Effect) ზეგავლენის შედარების საშუალებას.

PTC პრინციპი საშუალებას იძლევა შედარდეს $\{X_n\}$ –ტრაფიკის პროცესის ახალი სტატისტიკური მაჩვენებელი, თანაზომად $\{E_n\}$ პუასონის d_e მაჩვენებელთან, სადაც E_n არის ურთიერთდამოუკიდებელი და ერთნაირად განაწილებული (iid - identical and independent distributed) ექსპონენციალური, შემთხვევითი ცვლადები. მიმდინარე პროცესის სტატისტიკური აღწერა დაკავშირებულია იმ მომენტებთან, რომლებიც წარმოადგენენ ამ პროცესების საფუძველს. PTC პრინციპი ეფუძნება იმ დაშვებას, რომ პუასონის ტიპის პროცესები მიეკუთვნებიან ტრაფიკის ეტალონურ ტესტებს და H შედარებითობა ნიშნავს, რომ პუასონის ეტალონური ტესტური ტრაფიკის ინტენსიობა შერჩეულია შესასწავლი ტრაფიკის ინტენსიობის ტოლად. მათემატიკურად შედარება შეიძლება ეტალონურ მნიშვნელობასთან,

შესასწავლი ტრაფიკის მნიშვნელობის შეფარდებით. კერძოდ, PTC-შედარების პრინციპი ეფუძნება b_x პულსირებადი სტრუქტურის (ანუ ობიექტების შემთხვევითი რაოდენობა განსახილველ ჯგუფში) შემდეგი სახით შეფასებას:

$$b_x = \frac{d_x}{d_t},$$

როგორც, ამ გამოსახულების სახე მიუთითებს, ნებისმიერი პუროსნი ტიპის პროცესი, როგორც ეტალონური, შეფასდება ერთგვაროვნად და შესაბამისად პულსირებადი სტრუქტურის დისპერსიის იდექსის მაჩვენებლები განსზღვრული იქნება PTC-პრინციპით.

ISE - პრინციპი ითვალისწინებს, რომ $\{X_n\}$ ტრაფიკის ნაკადი მიეწოდება უსასრულო რაოდენობის სერვერთა ჯგუფს და განისაზღვრება, თუ ნაკადი რა ზეგავლენას ახდებს შესაბამის d_x სტატისტიკურ მახასიათებელზე. სერვერების უსასრულო რაოდენობის დაშვება ამარტივებს პულსირებადი სტრუქტურის აღწერას სისტემაში გარკვეული რაოდენობის მომხარებლებისათვის, სათანადო თანაბარწონიანი მომენტების გამოყენების საფუძველზე.

2.9. დისპერსიის ინდექსი

განვიხილოთ სტაციონალური არაუარყოფითი მიმდევრობა $\{X_n\}_{n=0}^{\infty}$ როგორც ტრაფიკის პროცესში მოთხოვნათა შემოსავლებს შორის დროის შუალედები.

აქ ჩვენ ვუშვებთ, რომ მოთხოვნათა ნაკადისათვის $0 < \sigma < \infty$ და $\{X_n\}$ მიმდევრობა ელემენტარულია, ანუ $P\{X_n = 0\} = 0$. ტრაფიკის პულსირებადი სტრუქტურის აღწერისათვის შეიძლება გამოვიყენოთ ცვლილების კოეფიციენტი C_x , იმის გათვალისწინებით, რომ ეს კოეფიციენტი დაკავშირებულია მხოლოდ $F_x(x)$ განაწილების ფუნქციასთან და წარმოადგენს პირველი რიგის მახასიათებელს. მეორე რიგის სტატისტიკური

მახასიათებლები განისაზღვრება $\{X_n\}$ -ს კორელაციური ფუნქციით, რომელიც შემდეგი სახით არის წარმოდგენილი.

ავლნიშნავთ: X_n პროცესის განაწილების ფუნქცია $F_x(x)$ სახით; ტრაფიკის ინტენსიობა $\lambda = 1/M[X_n]$; დისპერსია $\sigma_x^2 = \sigma^2[X_n]$; ცვალებადობის კოეფიციენტი $C_x = \lambda_x \sigma_{x1}$, სადაც M ტრაფიკის სტატისტიკური მახასიათებლის საშუალო მნიშვნელობა.

$$r_x(\tau) = \frac{M[X_k X_{k+\tau}] - \lambda_x^{-2}}{\sigma_x^2}, \quad \tau = 0, 1, \dots,$$

და რომელიც ზომავს მოთხოვნათა შემოსავლებიდან დაყოფნებულ დროით ინტერვალებს შორის წრფივ დამოკიდებულებას და წარმოადგენს პულსირებადი სტრუქტურის შესწავლის ძირითად კომპონენტს.

ტრაფიკის ცვალებადობის, ანუ ტრაფიკის პულსირებადი სტრუქტურის აღწერისათვის, უფრო მოხერხებული მეთოდია შემოთავაზებული დისპერსიის ინდექსის სახით დროის ინტერვალისათვის (IDI-Index of Dispersion for Intervals), რომელიც შემდეგი გამოსახულებით განისაზღვრება [13]:

$$J_n(n) = \frac{\sigma^2[\sum_{j=1}^n X_j]}{n\lambda_x^{-2}}$$

იმისათვის, რომ დისპერსიის ინდექსი დავაკავშიროთ PTC –პრინციპთან, შემოგვაქვს აღნიშვნა $s_x(n) = \sigma^2[\sum_{j=1}^n x_j]$. მაშინ, პუასონის ტიპის ნაკადისათვის, რომელშიც მოთხოვნების შემოსვლებს შორის დროის ინტერვალები $\{E_n\}$ ხასიათდება საშუალო ინტენსიობით $1/\lambda_E$, მივიღებთ:

$$s_E(n) = n\lambda_E^{-2}$$

შესაბამისად, დისპერსიის ინდექსის გამოსახულება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$J_x(n) = \frac{s_x(n)}{s_E(n)}$$

დისპერსიის ინდექსის კავშირი PTC-პრინციპთან, შემდეგი გამოსახულებით აისახება:

$$J_x(n) = C_x^2 \left[1 + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \left(1 - \frac{j}{n} \right) r_x(j) \right]$$

სადაც $r_x(j)$ არის კორელაციის ფუნქცია.

2.10. პაკეტების ნაკადის სტატისტიკური თვისებები

პულსირებულად ცვლადი სტუქტურების აღწერისა და რაოდენობრივი შეფასების მიზნით, აუცილებელია ქსელში შესაბამისი სატრაფიკო ტრასებზე ჩატარებული გაზომვების შედეგებით სარგებლობა. ტრაფიკის მოდელირებასთან დაკავშირებული კვლევების მიზანს წარმოადგენს თვითმსგავსების (self-similarity), ანუ ფრაქტალურობის იდენტიფიცირება, რაოდენობრივი მახასიათებლების შეფასება, შესაძლო ხანგრძლივი დამოკიდებულების შესწავლა, ქსელის ტრაფიკში ფრაქტალურობის მიზეზების არსებობის განმარტება და რიგების არსებობის გათვალისწინებით, ქსელის წარმადობის კვლევა.

მაშინ, როდესაც ანალიზური კვლევა შეუძლებელია, ხელოვნური ტრასების სინთეზის ალგორითმები განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენენ, ვინაიდან მათი გამოყენებით შესაძლებელია ფრაქტალური დატვირთვის მიმართ მოდელირება. ხელოვნური ტრაფიკის სინთეზი გარკვეულად უფრო ხელსაყრელია ვიდრე რეალური გაზომვების შედეგად შედგენილი მოდელი, ვინაიდან:

- რეალური ტრასები ძალზე მოუხერხებელია გაზომვებისა და შედეგების დასაფიქსირებად;

- აღსაქმელად, შედარებით თვალსაჩინო პარამეტრები საშუალებას იძლევა რეალური მონაცემების საფუძველზე განვაზოგადოთ მოდელირების შედეგები ნებისმიერი ვითარებისთვის, რომელთა განსაზღვრა რთული ამოცანაა (ჰერსტის მაჩვენებელი, საშუალო მნიშვნელობები, დისპერსიის დამოკიდებულება აგრეგირების პარამეტრისაგან და სხვა) [14].

რეალური მონაცემები ავლენენ ურთულესი სტრუქტურული დამოკიდებულების ხასიათს, ვიდრე, შესწავლილი პროცესისათვის სპეციალურად ფორმირებული ვითარებები, რომლებსაც გააჩნიათ ხანგრძლივი დამოკიდებულებების შინაარსი.

პაკეტური კომუტაციის შემთხვევაში, ბიტების უწყვეტი ნაკადი გადაცემის ცვლადი სიჩქარით, ქმნიან პაკეტების ნაკადს, ამასთანავე პაკეტებს შორის დროის ინტერვალების განაწილების სიმკვრივე, ცალსახად განსაზღვრავს პაკეტების ნაკადის სტატისტიკურ თვისებას და წარმოადგენს წაგრძელების შემცველ განაწილებას. ბიტების ნაკადი გადაცემის $r(t)$ სიჩქარით, მიეწოდება მეხსიერების ელემენტს და პაკეტებს შორის დროის ინტერვალის τ ხანგრძლივობა განისაზღვრება ბუფერში ინფორმაციის დაგროვების საჭირო დროის ხანგრძლივობით. უნდა ჩავთვალოთ, რომ ბუფერის ტევადობა საკმარისია L_0 (ბიტებში) სიგრძის პაკეტის შესაქმნელად.

თუ ვიცით, გადაცემის საშუალო სიჩქარე, $r_{საშ}$, მაშინ

$$r_{საშ} \cdot \tau = L_0 \quad (2.1)$$

ხოლო r და τ შემთხვევით სიდიდეებს შორის დამოკიდებულების განსაზღვრის მიზნით ჩავთვალოთ, რომ $r_{საშ} = r$ დაშვების სამართლიანობა თუ პაკეტის L_0 სიგრძე არ არის დიდი, და მიღებულია, რომ $r_{საშ}$ დროის ინტერვალის განაწილების ფუნქცია განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$g(\tau) = \frac{L_0}{\tau^2} f\left(\frac{L_0}{\tau}\right) \quad (2.2)$$

სადაც $f(r) = f\left(\frac{L_0}{\tau}\right)$ არის ბიტების ნაკადის საწყისი სიჩქარის განაწილების კანონი.

ბიტების ნაკადის $f(r)$ განაწილების კანონისაგან დამოუკიდებლად, მოდელის ასეთი გამარტივება იწვევს „მძიმე“ წაგრძელებების წარმოქმნას პაკეტების ნაკადის განაწილებაში.

ამრიგად, პაკეტური ქსელების ტრაფიკში ფრაქტალურობის წარმოქმნას საფუძვლად უდევს ის მიზეზობრივი ფაქტორი, რომ ხდება ბიტების ნაკადის გარდაქმნა პაკეტების ნაკადად.

ანალიზის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ (2.2) თანაფარდობა, $r_{საშ} = r$ დაშვების გათვალისწინებით სამართლიანია, თუ ქსელში რესურსების რაოდენობა შეზღუდულია და ტრაფიკის წყაროები ურთიერთდამოუკიდებლებია. რეალურად, ეს დაშვება ნიშნავს, რომ ბუფერის მეხსიერებაში პაკეტების გადასვლის შემდეგ კავშირის არხები თავისუფლდებიან, ხოლო წარმოქმნილი დაყოვნება და პაკეტების ხანგრძლივობის ტოლია. ეს ფაქტორი განსაზღვრავს პაკეტებს შორის დროის ხანგრძლივობების განაწილების ხასიათს. როდესაც კავშირის არხი დაკავებულია, ფორმირებული პაკეტები რჩებიან მეხსიერებაში არხის განთავისუფლებამდე, რის შემდეგაც ხდება რამოდენიმე პაკეტის ერთბაშად გადაცემა. ამის გამო იზრდება პაკეტების ჯგუფ-ჯგუფად შემოსვლის ხასიათი და იზრდება წაგრძელებების სიმძიმე. აგრეთვე, რამოდენიმე პაკეტის ერთდროულად გადაცემის შემდეგ, წარმოიქმნება შუალედი, სანამ გადამგზავნ კვანძში არ იქნება მიღებული შესაბამისი დადასტურება. ამის გამო შემთხვევითი ცვლადი τ ავლენს დამატებით ცვალებადობას და შესაბამისად, აგრეთვე იზრდება წაგრძელების სიმძიმე. ასეთი ხასიათის განაწილებებიდან ამონაკრებებს აქვთ τ - ს მცირე მნიშვნელობების შემთხვევაშიც ალბათობების

სასრული მნიშვნელობები, განაწილებები ასევე შეიცავს τ - ს დიდ მნიშვნელობებსაც, განსაზღვრული ალბათობებით. ამ შემთხვევაში პაკეტებად გარდასახვის ხასიათი იცვლება და აღარ არის სამართლიანი (2.1) გამოსახულებით პაკეტის სიგრძის განსაზღვრა.

ზემოთაღნიშნულის საფუძველზე, მნიშვნელოვანია ვიპოვოთ $g(\tau)$ განაწილების სიმკვრივე, როდესაც $r = \varphi(\tau)$ გარდაქმნას აქვს ნებისმიერი სახე და საჭიროა მიღებული შედეგების გამოყენების შესაძლებლობების კვლევა ქსელის სტრუქტურებში ფრაქტალური ტრაფიკის მოდელირებისათვის.

პაკეტების ნაკადის სტატისტიკური თვისებების განსაზღვრავს შემდეგი ფაქტორები [14]:

- ინფორმაციის წყაროდან გენერირებული ბიტების ნაკადის ტრაფიკის შემთხვევითი ხასიათი;
- ბიტების ნაკადის, პაკეტების ნაკადად გარდაქმნის თავისებურებები;
- სატელეკომუნიკაციო ქსელის ხარისხობრივი მაჩვენებლების გაუმჯობესების მიზნით ნაკადის აგრეგაციის პროცესში მისი მიზნობრივი გარდასახვა.

რადგანაც ბიტების ნაკადის გარდასახვის გამო, პაკეტების შემოსვლა არათანაბარია, დროის ინტერვალები პაკეტების შემოსვლებს შორის იქნება შემთხვევითი სიდიდე.

პაკეტების ნაკადის სტატისტიკურ მახასიათებლებზე და სტრუქტურაზე ზეგავლენას ახდენს შემდეგი ფაქტორები [14]:

1. დროის დაყოფის პრინციპით მომქმედი ოპერაციული სისტემის თავისებურება იმაში მდგომარეობს, რომ სისტემის ყოველი პროცესი ვითარდება ვირტუალურ დროში, რაც ძირითადად განისაზღვრება მიღწევადი რესურსებით. ამიტომ მომსახურების სახეობათა დონიდან არხის დონემდე, ქმნის არათანაბარ დროის

ინტერვალებს პაკეტების ფორმირების ფაზებს შორის, მაშინაც კი, როდესაც მონაცემთა ნაკადი თანაბარია.

2. მონაცემთა აგრეგირების ხასიათი განისაზღვრება მომსახურების სახეობათა გამოყენების დინამიკით, რომელიც მოითხოვს ქსელების ურთიერთქმედების საშუალებების გამოყენებას. მომსახურების სახეობათა გამოყენება ქმნის მონაცემთა გენერაციის ინტენსიობას, რომელიც განისაზღვრება ბუფერის შესაძლებლობით მეხსიერების მოცულობით და არხების გამტარუნარიანობით
3. სატრანსპორტო დონის პროტოკოლის მოქმედება უნდა უზრუნველყოფდეს პაკეტების სწორად გადატანასა და გადაცემის სიჩქარის რეგულირებას მონაცემთა წყაროსა და მიმღებს შორის უკუკავშირის შეკრული კონტურის გამოყენების საფუძველზე.
4. საარხო დონის პროტოკოლების მოქმედების თავისებურებაა პაკეტებს შორის დროის ინტერვალების ზრდა არხების გადატვირთულობის შესაბამისად, კოლიზიების გახშირების გამო.
5. სერვისების პარამეტრების ხარისხის უზრუნველსაყოფად მახასიათებლების და საჭირო შეზღუდვების შემოტანა გათვალისწინებულია საშუალოდო კვანძებში.

რადგანაც თანამედროვე სატელეკომუნიკაციო ქსელი არის სისტემა საშუალოდო დაგროვებით, აქ სრულად ვლინდება „ დიდ სიმრავლეთა შემარბილებელი ეფექტი, რომლის დახვეწილ განსახიერებას წარმოადგენს პაკეტური კომუტაცია“ (ლეონარდ კლეინროკი - [15]).

განვიხილოთ ბიტების ნაკადის პაკეტებად გარდასახვის პროცესი. ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარე, რომელიც მიღწევადია მომხმარებლისათვის K- მომსახურების სახეობის მისაღებად, იმის გათვალისწინებით, რომ მასზე მიერთება მომხმარებლისთვის მიღწევადია, არის სტოქასტური სიდიდე და შესაბამისად, წარმოადგენს დროის ფუნქციას ალბათური აღწერით. შესაბამის

ალბათურ მახასიათებლებს შეიძლება წარმოადგენდეს შემთხვევითი სიდიდის უპირობო და ერთობლივი სიმკვრივეები, რომლებიც ასახავენ დროის ფიქსირებული მომენტების ნაკადს და რომლებიც წარმოადგენენ დროის ფიქსირებული მომენტებისათვის წერტილოვან ფუნქციებს, მაგალითად - ბიტების გადაცემის სიჩქარეს. მათი ერთობლიობა ქმნის ანსამბლს, რომელშიც, ნებიმიერი კომპონენტი არის $r^K(t)$ შემთხვევითი პროცესისათვის გამოვლენილი შერჩევითი ფუნქცია, რომელიმე კონკრეტული სენსისათვის. მისი რეალიზების მნიშვნელობები დროის გარკვეულ t_i მომენტებში განსაზღვრავენ $R_i^{(K)}$ შემთხვევით სიდიდეს. პაკეტური კომუტაციის დროს ბიტების ნაკადი გარდაიქმნება პაკეტების დისკრეტულ მიმდევრობად, ზოგად შემთხვევაში ცვლადი ხანგრძლიობებით.

რაოდენობრივი ანალიზის ჩატარების მიზნით, შემოვიფარგლოთ ფიქსირებული L სიგრძის პაკეტის განხილვით. ამ შემთხვევაში ტრაფიკის სტრუქტურა სრულად შეიძლება აღიწეროს პაკეტებს შორის ინტერვალების ხანგრძლიობების განაწილებით. ინტერვალის ხანგრძლიობა განისაზღვრება ბუფერში ინფორმაციის დაგროვების დროის ხანგრძლიობით, რომელიც საკმარისი უნდა იყოს, საჭირო L_0 სიგრძის პაკეტის შესაქმნელად:

$$\int_{t_i}^{t_i+\tau} r(t)dt = L_0 \quad (2.3)$$

ეს გამოსახულება წარმოადგენს τ ინტერვალზე, გადაცემის სიჩქარის საშუალო მნიშვნელობის, ნამრავლს, ინტერვალის τ ხანგრძლიობაზე:

$$r_{საშ} \cdot \tau = L_0 \quad (2.4)$$

სადაც

$$r_{საშ} = \frac{1}{\tau} \int_{t_i}^{t_i+\tau} r(t)dt$$

თუ პაკეტების სიგრძეები შედარებით მოკლეა, მაშინ $r_{საშ}$, მცირე ცდომილებით, შეიძლება ჩანაცვლდეს τ ინტერვალზე სიჩქარის მიმდინარე r მნიშვნელობით.

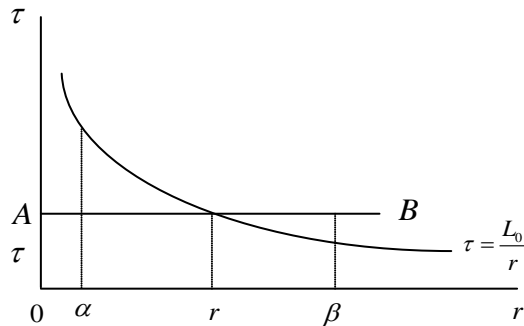
ეს დაშვება გვაძლევს საშუალებას განვსაზღვროთ τ და r შემთხვევით სიდიდეებს შორის ფუნქციონარული დამოკიდებულება:

$$\tau = \frac{L_0}{r} \quad (2.5)$$

რაც გვაძლევს საშუალებას ვიპოვოთ $g(\tau)$ უწყვეტი შემთხვევითი τ სიდიდის განაწილების კანონი, როგორც ერთი შემთხვევითი r არგუმენტის ფუნქცია, მაშინ, როდესაც ცნობილია მისი განაწილების $f(r)$ კანონი.

განვიხილოთ გრაფიკზე $[\alpha, \beta]$ ნებისმიერი მონაკვეთი, რომელზეც განაწინებულია β სიდიდის შესაძლო მნიშვნელობები, ანუ:

$$P(\alpha < R < \beta) = 1$$



β -ს შესაძლო მნიშვნელობების გრაფიკი

ამ ამოცანის ამოხსნის წესი დამოკიდებულია $\tau = \frac{L_0}{r}$ ფუნქციის მოქმედებაზე $[\alpha, \beta]$ მონაკვეთზე - რომელიც უწყვეტი და დიფერენცირებადია მოცემულ მონაკვეთზე.

რადგანაც (2.5) დამოკიდებულება მონოტონურად მიიღევა მოცემულ დადებით უბანზე:

$$G(r) = P(T < \tau) = P(r < R < \beta) = \int_r^\beta f(r) dr$$

მართლაც, რომ სრულდებოდეს პირობა $T < \tau$, შემთხვევითი წერტილი (R, T) უნდა მდებარეობდეს მრუდის იმ უბანზე, რომელიც AB სწორის ქვემოთ არის გავრცელებული. ამისათვის აუცილებელი და საკმარისი პირობაა, რომ შემთხვევითი R სიდიდე აღმოჩნდეს r - დან β - მდე უბანზე.

მაშინ, თუ ზემოთ მოყვანილ გამოსახულებაში ინტეგრალის ქვედა ზღვარს გამოვსახავთ (2.5) პირობით, გვექნება:

$$r = \frac{L_0}{\tau}$$

და შესაბამისად:

$$G(\tau) = \int_{\frac{L_0}{\tau}}^\beta f(r) dr \quad (2.6)$$

მიღებული თანაფარდობის დიფერენცირება τ ცვლადით, რომელიც შედის ინტეგრირების ქვედა ზღვარში, გვაძლევს:

$$g(\tau) = -f\left(\frac{L}{\tau}\right) \cdot \frac{L_0}{\tau^2} \quad (2.7)$$

r და τ შემთხვევითი სიდიდეების ურთიერთდამოკიდებულება არის ინვარიანტული, ფუნქციისა და არგუმენტის ადგილმონაცვლეობის მიმართ და შესაბამისად მიზანშეწონილია ამ დამოკიდებულების წარმოდგენა განზოგადებული ცვლადების საფუძველზე:

$$y = \frac{k}{x}$$

რაც გვაძლევს საშუალებას, რომ (7) განაწილების კანონი განვიხილოთ, როგორც უკუგარდასახვა:

$$f(x) = -g\left(\frac{k}{x}\right) \cdot \frac{k}{x^2} \quad (2.8)$$

თავი 3. მასობრივი მომსახურების სისტემა თანამედროვე მულტისერვისული სატელეკომუნიკაციო ქსელის რეჟიმში

მასობრივი მომსახურების სისტემის შესწავლისათვის იყენებენ განაწილების შემდეგი ორი სახის ალბათურ მახასიათებლებს. ეს არის მეზობელ მოთხოვნებს შორის დროის შუალედების განაწილებისა და მოთხოვნათა მომსახურების (დამუშავების) ხანგრძლიობათა განაწილების მახასიათებლები. ამ მახასიათებლების განაწილებათა კანონის საფუძველზე შეიძლება განისაზღვროს სისტემის გამტარუნარიანობა ρ , რომელიც წარმოადგენს სისტემაში მოთხოვნების შემოსვლის საშუალო სიჩქარის ნამრავლს ყოველი მოთხოვნის საშუალო დონეზე:

$$\rho = \lambda \tau,$$

მაშინ, სისტემაში მოთხოვნათა საშუალო რიცხვის განსაზღვრისათვის მოხერხებულია პოლიაჩეკ-ხინჩინის ცნობილი ფორმულა [16] გამოყენება:

$$\frac{-}{q} = \frac{\rho^2(1 + \nu_\tau^2)}{2(1 - \rho)},$$

რომელიც შემოსაზღვრულია მხოლოდ წმინდად შემთხვევითი ტიპის ნაკადებით ან მიმართებაში, სადაც მოთხოვნათა შორის ინტერვალები განაწილებულია ექსპონენციალურად (და არა ზოგადი სახის განაწილებით) და ამასთანავე არ არიან კორელირებულები.

განვიხილოთ წმინდად შემთხვევითი ნაკადის რეალიზაცია T ხანგრძლიობის დროის შუალედში, მეზობელ მოთხოვნებს შორის დროის ინტერვალების ექსპონენციალური განაწილებით, [17]-ში შემოთავაზებული მეთოდის გამოყენებით. T დროის შუალედის საწყისი წერტილიდან დავალაგოთ მოთხოვნების შემოსვლებს შორის დროის შუალედები, დაკვირვების ხანგრძლიობის ზრდის შესაბამისად. ამ გზით მიღებული

მოთხოვნათა ნაკადი, ისევე როგორც საწყისი ნაკადი, ხასიათდება მოთხოვნებს შორის დროის შუალედების ექსპონენციალური განაწილებით იმ განსხვავებით, რომ რიგის საშუალო სიგრძე მიღებული ნაკადისათვის გაცილებით მეთი იქნება, ვიდრე პირველადი ნაკადისათვის პოლიაჩეკ-ხონჩინის ფორმულით მიღებული მნიშვნელობა. ეს ასაბუთებს, რომ მომსახურების დროის მოცემული მნიშვნელობისათვის, ალბათობათა განაწილების კანონის ცოდნა, სრულად ვერ ასახავს რიგის ზომას, რომელიც წარმოიქმნება მასობრივი მომსახურების სისტემაში. წარმოქმნილი რიგების ზომებზე ძირითად ზეგავლენას ახდენს მოთხოვნათა ნაკადის კორელაციური თვისებები.

მასობრივი მომსახურების ერთსერვერიანი სისტემისათვის სამართლიანია შემდეგი რეკურენტული თანაფარდობა [18], რომელიც ამყარებს კავშირს მოთხოვნათა შემოსულ და დამუშავებულ რაოდენობებს შორის:

$$q_i(\tau) = q_{i-1}(\tau) + m_i(\tau) - \delta_i(\tau) = q_{i-1}(\tau) + u_i(\tau), \quad (3.1)$$

$$\delta_i(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{თუ } q_{i-1}(\tau) = m_i(\tau) = 0 \\ 1, & \text{სხვა შემთხვევებში.} \end{cases}$$

სადაც $m_i(\tau)$ არის i ნომრის τ ინტერვალში შემოსული მოთხოვნების რიცხვი, ხოლო $q_i(\tau)$ კი იგივე ინტერვალში წარმოქმნილი რიგის სიგრძე.

(3.1) წარმოადგენს სისტემის ბალანსის განტოლებას.

3.1. რიგის ცვლილების სიჩქარე

(3.1)-დან განვსაზღვროთ τ ხანგრძლიობის i -ური შუალედის განმავლობაში რიგის სიგრძის ნაზრდი:

$$u_i(\tau) = q_i(\tau) - q_{i-1}(\tau) = m_i(\tau) - \delta_i(\tau), \quad (3.2)$$

$$\delta_i(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{თუ } q_{i-1}(\tau) = m_i(\tau) + \delta_i(\tau) = 0 \\ 1, & \text{სხვა შემთხვევებში.} \end{cases} \quad (3.3)$$

τ შუალედზე მიკუთვნებული ნაზრდი განსაზღვრავს რიგის ცვლილების სიჩქარეს i -ური შუალედში. ნულოვანი საწყისი პირობების შემთხვევაში, მითითებულ შუალედში განისაზღვრება შემდეგი ჯამით:

$$q_i(\tau) = \sum_{j=0}^i u_j(\tau) = \sum_{j=0}^i [m_j(\tau) - \delta_j(\tau)]. \quad (3.4)$$

$u_j(\tau)$ -შემთხვევითი სიდიდე არის მთელი რიცხვი, შეუძლია მიიღოს ნებისმიერი დადებითი, ნულოვანი და უარყოფითი, ერთის ტოლი მნიშვნელობები.

ამრიგად, შემთხვევითი სიდიდე $q_i(\tau)$, რომელიც განსაზღვრავს რიგის სიგრძეს დროის i -ური შუალედში, წარმოადგენს, ყველა შუალედში, დაწყებული ნულოვანიდან $u_j(\tau)$ სიდიდის მნიშვნელობათა ჯამს.

მასობრივი მომსახურების ნებისმიერ, ერთსერვერიან მდგრად სისტემაში, არსებობს მუშაობის ორი რეჟიმი - აქტიური, რომლის განმავლობაშიც სერვერი დატვირთულია და ლოდინის რეჟიმი, როდესაც სერვერი უმოქმედოა. აქტიურ რეჟიმს ყოველთვის მოსდევს უმოქმედობის რეჟიმი, რომელიც მთავრდება შემოსული მოთხოვნის მომსახურების დაწყებით.

ნახ.5-ზე მოცემულია რიგების წარმოქმნის პროცესი ერთსერვერიანი მასობრივი მომსახურების სისტემაში მოთხოვნათა პაკეტების შემოსვლის დროს. დროის სრული შუალედი დაყოფილია τ დროის ინტერვალებად, რომლის განმავლობაშიც შესაძლებელია მხოლოდ ერთი პაკეტის

მომსახურების უზრუნველყოფა. აქ „ა“ - გრაფიკი ასახავს $m_i(\tau)$ პაკეტების რაოდენობის შემოსვლის პროცესს. დროის იმ ინტერვალებს, რომლებშიც არ შემოდის პაკეტები, შეესაბამება $m_i(\tau) = 0$. „ბ“ გრაფიკი ასახავს $q_i(\tau)$ რიგების სიგრძეების ცვლილებას და სერვერზე მიწოდებული პაკეტების $d_i(\tau)$ რაოდენობას. პროცესის აღწერის საწყის მომენტში სერვერში, მომსახურებისათვის პაკეტი არ არსებობს და $q_0(\tau) = 0$. როდესაც ერთდროულად შემოდის პაკეტების ჯგუფი დროის პირველი ინტერვალის განმავლობაში ($m_1 = 10$), პირველი პაკეტი მაშინვე დგება მომსახურებაზე, ხოლო დანარჩენები ქმნიან რიგს ($q_1 = 9$). დროის ყოველი მომდევნო ინტერვალის შემდეგ რიგში არსებული პაკეტების რაოდენობა ერთით მცირდება. თუ სისტემაში გათვალისწინებულია მომსახურების წესი FIFO (First Input First Output), მაშინ პაკეტების შემდგომი შემოსვლის მიუხედავად, პირველი ჯგუფის პაკეტები მომსახურებული იქნება სრულად. თუ, მაგალითად მეექვსე ინტერვალის განმავლობაში შემოდის პაკეტების ჯგუფი ($m_6 = 4$), ისინი ზრდიან არსებული რიგის სიგრძეს. როდესაც დასრულდება პირველი ჯგუფის ყველა პაკეტის მომსახურება, მხოლოდ ამის შემდეგ დაიწყება მეორე ჯგუფის პაკეტების მომსახურება და ა.შ. განხორციელდება ყველა პაკეტის მომსახურება სრულად. თუ ამის შემდეგ, როდესაც დასრულდება წინა ჯგუფის ყველა პაკეტის მომსახურება შემოვა პაკეტების ჯგუფი ($m_{21} = 3$) მომსახურებაზე, მაშინ ამ დასტის მომსახურებამდე ჩნდება პასიური პერიოდი, როდესაც სისტემაში მომსახურების მიზნით პაკეტები არ არსებობს. განხილულ მაგალითში აქტიური პერიოდი შეიცავს $N_a = 14$ ინტერვალს, ხოლო პასიური კი $N_p = 6$ დროის τ ინტერვალებს, შესაბამისად დროის ჯამური ინტერვალები აქ არის $N = 20$. აქტიური პერიოდის დროის N_a ინტერვალები ტოლია იმ პაკეტების რაოდენობის, რომლებიც შემოდის ამ აქტიური ინტერვალის განმავლობაში, ვინაიდან ყველა პაკეტი უნდა იქნას

მომსახურებული. ამიტომ, აქტიური პერიოდის განმავლობაში ყოველთვის სრულდება პირობა $\delta_i(\tau) = 1$ და თანაფარდობა (3.4) ლებულობს შემდეგ სახეს:

$$q_i(\tau) = \sum_{j=0}^i u_j(\tau) = \sum_{j=1}^i [m_j(\tau) - 1]. \quad (3.5)$$

ნახ.4-ის „გ“ გრაფიკზე მოცემულია რიგის სიგრძის ცვლილების სიჩქარის $u_i(\tau)$ ცვლილების მნიშვნელობები. როგორც გრაფიკიდან ჩანს $u_i(\tau)$ სიდიდე შეიძლება იყოს ნული, ერთის ტოლი დადებითი და უარყოფითი მნიშვნელობების. ბუნებრივია, რომ $u_i(\tau)$ სიდიდე არის ცენტრირებული და მისი მათემატიკური მოლოდინი ნულის ტოლია.

განვსაზღვროთ აქტიურ მონაკვეთზე ყველა რიგების ჯამური მოცულობა. (3.5)-ის შესაბამისად გვექნება:

$$Q(\tau) = \sum_{i=1}^{N_a} q_i(\tau) = \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^i [m_j(\tau) - 1] = \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^i u_j(\tau) = 71. \quad (3.6)$$

როგორც ნახ.4-დან ჩანს ჯამური რიგი წარმოადგენს შემდეგ ორ შესაკრებს:

$$Q(\tau) = \sum_{i=1}^{N_a} q_i(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_a} m_i(\tau) [m_i(\tau) - 1] + \sum_{i=1}^{N_a} q_{i-1}(\tau) m_i(\tau) = 51 + 20 = 71. \quad (3.7)$$

ამ გამოსახულების პირველი შესაკრები ასახავს ჯამურ რიგს, იმის გათვალისწინებით, რომ პაკეტების წინა ჯგუფი სრულად იქნა დამუშავებული ახალი ჯგუფის შემოსვლამდე. გამოსახულების მეორე შესაკრები შეესაბამება ჯამური რიგის ზრდის პროცესს, წინა დროის პერიოდში შემოსული პაკეტების დამუშავების დროს წარმოქმნილი დაყოვნებების გამო. ნახ.4-ზე მოცემულია ასეთი პაკეტების ერთი ჯგუფი. რეალურად დაყოვნებით დამუშავებული პაკეტების ჯგუფი შეიძლება იყოს ერთზე მეტი.

განსახილველი დროის ინტერვალის ყოველ τ მონაკვეთზე რიგის საშუალო სიგრძე შეიძლება განისაზღვროს შემდეგნაირად:

$$\overline{q(\tau)} = \frac{Q(\tau)}{N} = \frac{71}{20} = 3,55.$$

იმის დაშვებით, რომ პასიური პერიოდების განმავლობაში პაკეტების შემოსვლა და შესაბამისად რიგების წარმოქმნა არ არსებობს, დაჯამება შეიძლება ვაწარმოოთ სრულ N ციკლზე.

დროის ყოველ τ ინტერვალზე შემოსული პაკეტების რიცხვის მათემატიკური მოლოდინი იქნება:

$$\overline{m(\tau)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_a} m_i(\tau) = \frac{N_a}{N} = \rho = 0.7$$

პაკეტების რაოდენობის დისპერსია განსახილველი ციკლის დროის ყოველ τ ინტერვალზე იქნება:

$$D_m(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_a} [m_i(\tau) - \rho]^2 = 5,31.$$

(3.2)-ში განსაზღვრულია (7) თანაფარდობის პირველი შესაკრების მათემატიკური მოლოდინი შემდეგი სახით:

$$\overline{m_i(\tau)[m_i(\tau) - 1]} = D_m(\tau) - \rho(1 - \rho) = 5,31 - 0,21 = 5,1 \quad (3.8)$$

ხოლო (3.7) თანაფარდობის მეორე შესაკრების მათემატიკური მოლოდინი განსაზღვრულია შემდეგი სახით:

$$q_{i-1}(\tau)m_i(\tau) = \overline{q(\tau)} \cdot \rho + \mu_{q_{i-1}m_i}(\tau), \quad (3.9)$$

სადაც $\mu_{q_{i-1}m_i}(\tau)$ - არის i -ურ ინტერვალზე შემოსული პაკეტების რიცხვსა და წინა ინტერვალზე რიგის $q_{i-1}(\tau)$ ზომას შორის კორელაციური მომენტი.

$$\overline{q_{i-1}(\tau) \cdot m_i(\tau)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_a} q_{i-1}(\tau) \cdot m_i(\tau) = 1,$$

$$\overline{q(\tau)} \cdot \rho = 3,55 \cdot 0,7 = 2,485,$$

$$\mu_{q_{i-1}m_i}(\tau) = -1,485$$

(3.8) და (3.9) თანაფარდობების გათვალისწინებით τ დროის ინტერვალზე პაკეტების რიცხვის საშუალო ზომები იქნება:

$$\begin{aligned}\overline{q(\tau)} &= \frac{Q(\tau)}{N} = \frac{1}{2} \overline{m_i(\tau)[m_i(\tau)-1]} + \overline{q_{i-1}(\tau)m_i(\tau)} = \\ &= \frac{1}{2} D_m(\tau) - \frac{1}{2} \rho(1-\rho) + \overline{q(\tau)\rho} + \mu_{q_{i-1}m_i}(\tau),\end{aligned}$$

აქედან კი:

$$\overline{q(\tau)} = \frac{D_m(\tau) + 2\mu_{q_{i-1}m_i}(\tau)}{2} - \frac{\rho}{2}, \quad (3.10)$$

სადაც: $\rho = \overline{m(\tau)}$ [18].

3.2. ავტოკორელაციური მომენტები

$\mu_{q_{i-1}m_i}$ მნიშვნელობათა განსაზღვრის მიზნით გამოვსახოთ $q_{i-1}(\tau)$, დროის წინა ინტერვალზე შემოსული პაკეტების რიცხვის საშუალებით. ამისათვის განვიხილოთ ხანგრძლივი პერიოდი N ინტერვალის დიდი რიცხვით. მაშინ, გასაშუალების გათვალისწინებით გვექნება:

$$\mu_{q_{i-1}m_i}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_{i-1}(\tau) [m_i(\tau) - \overline{m(\tau)}]. \quad (3.11)$$

დავუშვათ, რომ რიგის საწყისი სიგრძეა $q_0(\tau)$, ხოლო წინა რიგების სიგრძეები ნულის ტოლია. (4) და (11) გამოსახულებების საფუძველზე მივიღებთ:

$$\mu_{q_{i-1}m_i}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^i [m_{i-j}(\tau) - \delta_{i-j}(\tau)] \right\} \times [m_i(\tau) - \overline{m(\tau)}], \quad \text{სადაც } j \leq i \text{ და}$$

როდესაც $j = im_0(\tau) = \delta_0(\tau) = 0$.

რადგანაც $j \leq i$, შემთხვევითი ცვლადი $m_i(\tau)$ არ არის დამოკიდებული $\delta_j(\tau)$, და შესაბამისად:

$$\overline{m_i(\tau) \cdot \delta_{i-j}(\tau)} = \overline{m_i(\tau)} \overline{\delta_{i-j}(\tau)} = [\overline{m(\tau)}]^2.$$

მიღებული შედეგის გათვალისწინებით, გვექნება:

$$\mu_{q_{i-1}m_i}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^i [m_{i-j}(\tau) - \overline{m(\tau)}] \right\} \times [m_i(\tau) - \overline{m(\tau)}]. \quad (3.12)$$

$$\text{ავლნიშნოთ } \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [m_{i-j}(\tau) - \overline{m(\tau)}] \cdot [m_i(\tau) - \overline{m(\tau)}] = \mu_{m_j}(\tau).$$

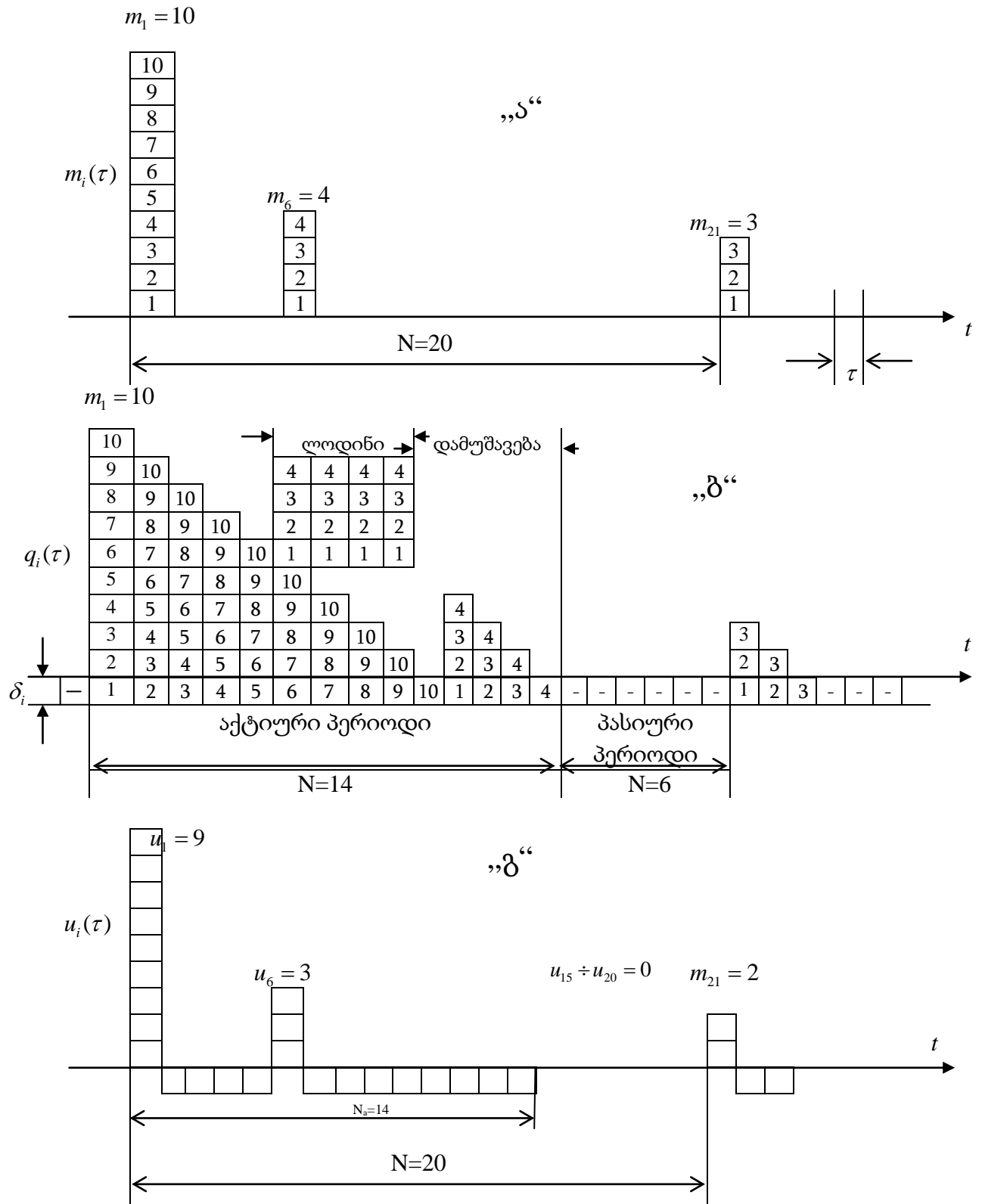
მაშინ N ინტერვალზე პაკეტების რიცხვის კორელაციური მომენტების ჯამი იქნება:

$$\mu_{\sum_m}(\tau) = \sum_{i=1}^N \mu_{m_i}(\tau).$$

ამ შედეგის გათვალისწინებით (10)-დან ვღებულობთ:

$$\overline{q(\rho)} = \frac{D_m(\rho) + 2\mu_{\sum_m}(\tau)}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2}. \quad (3.13)$$

როდესაც პაკეტების რაოდენობის კორელაციური მომენტების ჯამი $\mu_{\sum_m}(\tau)$ არის უარყოფითი რიცხვი, მაგალითად როგორც ეს არის განხილულ მაგალითში, კორელაციური კავშირები იწვევს რიგის სიგრძეების შემცირებას. მაგრამ რეალურ ნაკადებში, სადაც პაკეტების ჯგუფები ზედიზედ შემოდის სისტემაში, პაკეტების რაოდენობის კორელაციური მომენტების ჯამი $\mu_{\sum_m}(\tau)$ არის დადებითი და მრავალჯერადად აღემატება დისპერსიას $D_m(\rho)$.



ნახ.5. რიგის წარმოქმნის პროცესი [16].

ასე მაგალითად, პაკეტების ნაკადისათვის, რომელშიც სამ-სამ პაკეტის მიჯნები შემოდის მიყოლებით და დატვირთულობის კოეფიციენტი $\rho = 0,5$, რიგის საშუალო სიგრძე $\overline{q(\rho)} = 2$, დისპერსია $D_m(\rho) = 1,25$. ხოლო კორელაციური მომენტების გაორკეცებული ჯამი $2\mu_{\Sigma_m}(\tau)$ არის დადებითი და ტოლია დისპერსიის.

რიგების სიგრძეებზე განმსაზღვრელ ზეგავლენას ახდენს ერთმანეთზე მიყოლებით შემოსული პაკეტების ჯგუფების სერიათა სიგრძეები. ამიტომ ATM ქსელებში ტრაფიკის ძირითად მახასიათებელს წარმოადგენს პარამეტრი MBS (Maximum Burst Size) - პიკური სიჩქარით გენერირებული უჯრედების მაქსიმალური რიცხვი.

კვლევის შედეგებმა დაგვარწმუნა, რომ სრული N ციკლის საზღვრების მიღმა არსებული პაკეტების ჯგუფებთან კორელაციური კავშირები არ ჩანს. ამიტომ რიგების სიგრძეთა მათემატიკური მოლოდინი განისაზღვრება დროის ხანგრძლივი პერიოდისათვის (3.13)-ში შემავალი პარამეტრების საფუძველზე.

3.3. ტრაფიკის ახალი სახეობები და სატელეკომუნიკაციო ქსელში მომსახურების ხარისხისადმი მოთხოვნების ევოლუცია [19]

საერთო სარგებლობის სატელეკომუნიკაციო ქსელების შექმნა თავიდანვე გამიზნული იყო სამეტყველო სიგნალების (სატელეფონო სიგნალების) ტრაფიკის მომსახურებაზე. ეს იყო ბუნებრივი მოვლენა საერთო სარგებლობის ჰომოგენური ქსელისათვის. ტელეკომუნიკაციის ტექნოლოგიების სწრაფმა განვითარებამ და მომსახურების სახეობებზე მოთხოვნების ზრდამ გამოიწვია ახალი სახეობების შექმნისა და მათი სწრაფი დანერგვის აუცილებლობა. ამ ფაქტორების ზეგავლენით ჩამოყალიბდა

ჰეტეროგენული პაკეტური შემდგომი თაობის (NGN – Next Generation Networks) ქსელის კონცეფცია, სადაც სამეტყველო სიგნალების გადაცემა განიხილება, როგორც მომსახურების ისეთი სახეობები, რომლებიც მოითხოვენ დაყოვნებების კიდევ უფრო მცირე მნიშვნელობებს, ვიდრე სამეტყველო სიგნალის გადაცემა IP ქსელით, დაყოვნებების პრობლემამ მოახდინა მნიშვნელოვანი ზეგავლენა NGN ქსელის მახასიათებლებზე. [20] ავტორებმა ასეთი ქსელები გამოყვეს ახალ კლასად და უწოდეს ქსელები მცირე დაყოვნებებით.

საერთო სარგებლობის სატელეფონო ქსელის დაპროექტება ხორციელდებოდა კარგვებიანი სისტემის მოდელის ბაზაზე, ერლანგის ფორმულების გამოყენებით და ქალაქის სატელეფონო ქსელისათვის კარგვები (უარები მოთხოვნების მომსახურებაზე) შეადგენდა 5%-ზე ნაკლებს, ხოლო სასადგურო მოწყობილობების შიგნით ნორმირებული იყო 5‰ ($5 \cdot 10^{-3}$) ფარგლებში. საერთო სარგებლობის ციფრული სატელეფონო ქსელების შექმნამ, მომსახურების ხარისხის (QoS – Quality of service) პარამეტრების ნორმირების თვალსაზრისით არ გამოიწვია ახალი პრინციპული პრობლემები, ვინაიდან ქსელი იყო ჰომოგენური – ემსახურებოდა მხოლოდ სატელეფონო ტრაფიკს.

NGN კონცეფციის საფუძველზე საერთო სარგებლობის კავშირგაბმულობის ქსელი გადავიდა პაკეტური კომუტაციის პრინციპებზე, მომსახურების მრავალი სახეობების უნარით, რამაც მოითხოვა QoS-ის კლასებისა და პარამეტრების დიფერენციაცია [21]. გარდა ამისა, QoS-ის განზომილებებს დაემატა პარამეტრი – აღქმის ხარისხი (QoE – Quality of Experience), რომელიც შეესაბამება მომხმარებლის სუბიექტური შეფასების მნიშვნელობას [22].

სატელეკომუნიკაციო ქსელების კლასი მცირე დაყოვნებებით ხასიათდება მომსახურების ხარისხის შესაბამისი მახასიათებლებით,

რომლებიც NGN ქსელისათვის განსაზღვრულია ITU-T-ს რეკომენდაციებით
 Rec.Y.1541 [1].

ცხრილი 1.

მომსახურების ხარისხის პარამეტრი	მომსახურების კლასი					
	0	1	2	3	4	5
პაკეტების გადაცემის დაყოვნება (IPTD - IP Time Delay)	100 მწმ	400 მწმ	100 მწმ	400 მწმ	1 წმ	-
დაყოვნების ცვალებადობა – ვარიაცია (ჯიტერი) (IPDV - IP Delay Variance)	50 მწმ	50 მწმ	-	-	-	-
დაკარგული პაკეტების წილი (IPLR - IP Loss Ratio)	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	-
შეცდომებით გადაცემული პაკეტების წილი (IPER - IP Error Rate)	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	-

ყველაზე მკაცრი მოთხოვნები შეესაბამება მომსახურების ნულოვან კლასს, რომლის გამოყენება განკუთვნილია სამეტყველო სიგნალების დროის რეალურ მასშტაბში გადაცემისათვის არანაკლებ 4000 კმ მანძილზე და აქ დაყოვნებები დაკავშირებულია კავშირგაბმულობის არხში სიგნალის გავრცელების ხანგრძლიობასთან.

ამრიგად, NGN ქსელების დაპროექტება უნდა ითვალისწინებდეს, რომ დაყოვნება არ უნდა აღემატებოდეს 100 მწმ, ხოლო ჯიტერი 50 მწმ, რაც შეეხება პაკეტების კარგების წილისა და შეცდომებით გადაცემული პაკეტების წილის მნიშვნელობებს, მოთხოვნილი ნორმების დაცვა არ წარმოადგენს პრაქტიკულ სირთულეს [20].

ტრაფიკის ახალმა სახეობებმა მნიშვნელოვნად გაამკაცრა მოთხოვნები დაყოვნებებისა და კარგების მიმართ, რომელთა გადაცემა ხორციელდება განსხვავებული პრიორიტეტებით თანამედროვე მობილური კავშირის ქსელში, პაკეტური მულტიმედია IMS (IP Multimedia Subsystem)-ის გამოყენებით.

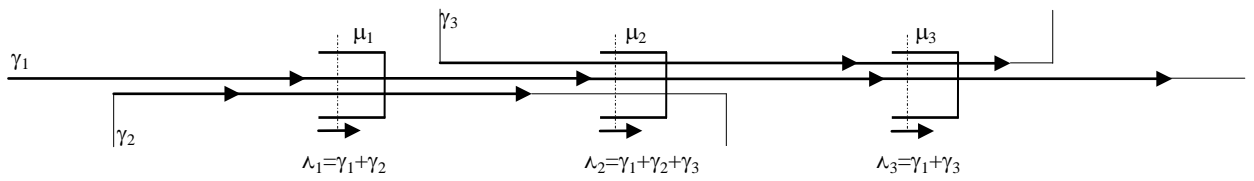
როგორც ცხრილი 2-დან ჩანს განსაკუთრებულად პრიორიტეტულს წარმოადგენს შეერთებების მართვის სიგნალებისა და სიგნალიზაციის ტრაფიკი, ამის შემდგომ საფეხურზეა სამეტყველო სიგნალების გადაცემის ტრაფიკი და ა.შ.

ცხრილი 2.

პრიორიტეტი	დაყოვნებები მწმ.	კარგეები	მომსახურების სახეობა
1	100	10^{-6}	IMS ქვესისტემის სიგნალიზაცია
2	100	10^{-2}	სამეტყველო სიგნალების გადაცემა (VoIP)
3	50	10^{-3}	თამაშები დროის რეალურ რეჟიმში
4	150	10^{-3}	ვიდეოკონფერენც კავშირი
5	300	10^{-6}	ნაკადური მომსახურებები
6	300	10^{-6}	Web
7	100	10^{-3}	ინტერაქტიური თამაშები
8	300	10^{-6}	E-mail
9	300	10^{-6}	ფაილების ჩატვირთვა

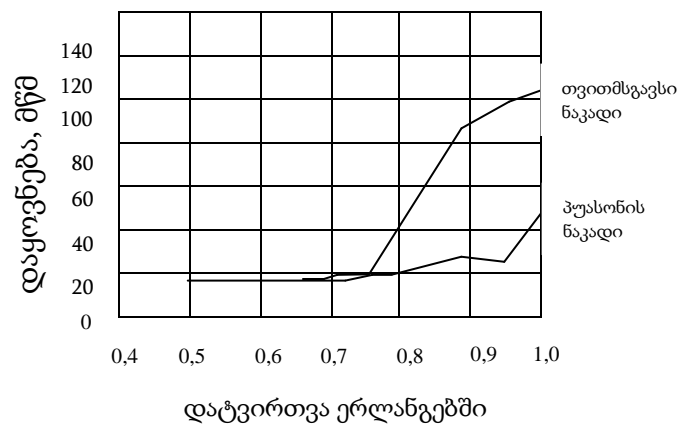
დაყოვნების მნიშვნელობებში პრინციპული ცვლილებები ფიჭური მობილური კავშირის სისტემებში განხორციელდა ხანგრძლივი ევოლუციის სისტემის LTE (Long Term Evolution) დანერგვის შემდეგ, მომსახურების რიგი სახეობებისათვის დაყოვნება შეადგენს 20 მწმ [20].

ნახ.1-ზე მოცემულია ქსელის ფრაგმენტი, რომელიც შედგება რამოდენიმე კვანძისაგან, სადაც მოდელირებისათვის გათვალისწინებულია კვანძებს შორის შემაერთებელი ხაზები გამტარუნარიანობით 10გბიტ/წმ, ხოლო მიერთების ქსელისათვის, გამტარუნარიანობით 4 მბიტ/წმ.

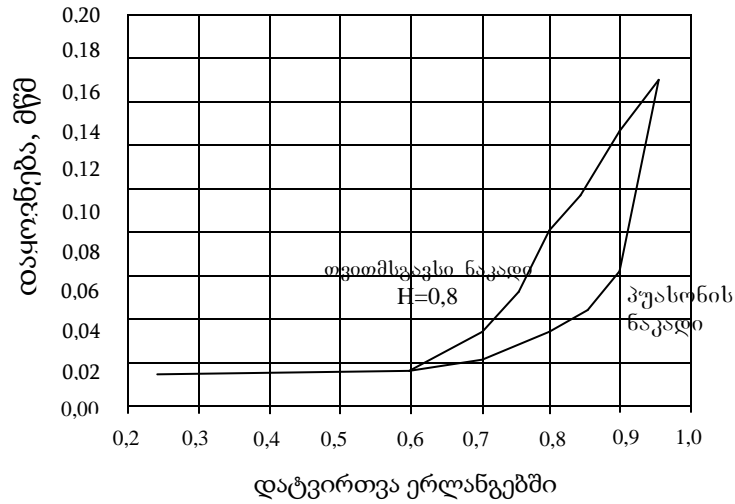


ნახ.6 მულტისერვისული ქსელის ფრაგმენტი

[20]-ში, კვანძის მოდელისათვის გამოყენებულია მასობრივი მომსახურების სისტემა ლოდინით და მომსახურების ხანგრძლიობის უცვლელი დროით. კვანძებს მიეწოდება ტრაფიკის ფონი, რომელიც შეესაბამება კვანძის გამოყენებას, ანუ დატვირთულობას, რომელიც მომსახურების შემდეგ გადის კვანძიდან. გარდა ფონური ტრაფიკისა კვანძს მიეწოდება გამოსაცდელი ტრაფიკი, რომელიც მომსახურების შემდეგ გადაეცემა მომდევნო კვანძის შესასვლელს. ფონური ტრაფიკისათვის შერჩეულია მოთხოვნათა ნაკადების ორი ტიპი: პუასონის და თვითმსგავსი – ხერსტის კოეფიციენტით $H=0.8$. ექსპერიმენტის შედეგად მიღებულია დაყოვნებების საშუალო ხანგრძლიობათა დამოკიდებულებები დატვირთვის სიდიდეზე [20].



ნახ.7. მოდელირების შედეგები, სადაც მიერთების ქსელის გამტარუნარიანობაა 4 მბიტ/წმ [20]



ნახ.8. მოდელირების შედეგები, როდესაც მიერთების ქსელის გამტარუნარიანობაა 10 გბიტ/წმ [20]

ნახ.7-დან ჩანს, რომ დატვირთვის ზრდით მკვეთრად იზრდება დაყოვნების მნიშვნელობა, რაც მასზე მოუთითებს, რომ მიერთების ქსელის პარამეტრები ვერ უზრუნველყოფენ მომსახურების ხარისხის მოთხოვნებს, რაც დასტურდება ნახ.8-ზე წარმოდგენილი მოდელირების შედეგებიდან, სადაც დაყოვნებები იზომება არა ათეულობით მილიწამებში, როგორც ეს ჩანს ნახ.7-დან, არამედ მილიწამების მეათედებით.

დასკვნა

1. პუასონისა და თვითმსგავსი ხასიათის მოთხოვნათა ნაკადებისათვის NGN ქსელში ვლდებულობით მნიშვნელოვან განსხვავებებს დაყოვნებების მნიშვნელობებისათვის, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ღრმად უნდა იქნას გაანალიზებული თვითმსგავსი ნაკადის წარმოქმნის პროცესებთან

დაკავშირებული საკითხები, რათა ტრაფიკის შემოთავაზებული მოდელი იყოს ზუსტი.

2. მომსახურების მუდმივი τ დროის პირობებში ნებისმიერი სტაციონალური და ორდინალური ნაკადებისათვის სამართლიანია რიგის სიგრძის საანგარიშო (3.13) ფორმულა, რომელიც წარმოადგენს პოლიაჩეკ-ხინჩინის ფორმულის განზოგადებას [16]. მართლაც, როდესაც $\mu_{\Sigma^m}(\tau) = 0$ და $D_m(\rho) = \rho$; ფორმულა (3.13) დადის პოლიაჩეკ-ხინჩინის ფორმულის სახეზე.
3. მულტისერვისული ქსელის ტრაფიკისათვის დამახასიათებელია მკაფიო კორელაციური დამოკიდებულებები და მოთხოვნათა რიცხვის კორელაციური მომენტების მნიშვნელობები აღწევს მაღალ, დადებით სიდიდეებს.
4. საკვლევი ხანგრძლიობის დროის ინტერვალებზე მომსახურებათა ცალკეულ სახეობებზე მოთხოვნათა რიცხვის დისპერსია და კორელაციური მომენტების ჯამური მნიშვნელობები შეიძლება განისაზღვროს ექსპერიმენტალურად, რიგების სიგრძეების საშუალო მნიშვნელობების დასადგენად მულტისერვისული მომსახურების ქსელში.

თავი 4. გადაცემის პაკეტური ტექნოლოგიის სატელეკომუნიკაციო ქსელის ანალიზის თეორიული ასპექტები

2017 წლისათვის ნაწინასწარმეტყველებია მსოფლიო ტრაფიკის მოცულობა 1,4 ზეტაბაიტი (10^{21} ბაიტი ანუ 120 ეკზაბაიტი - 10^{18} ბაიტი ყოველთვიურად), ხოლო 2030 წლისათვის სატელეკომუნიკაციო საშუალებების მწარმოებელი კომპანიები წინასწარმეტყველებენ იოტა-ბაიტების (10^{24} ბაიტი) გამოყენების გარდაუვალობას.

2010 წლის კონფერენციაზე (Techonomy) კომპანია Google-მა განაცხადა, რომ ცივილიზაციის ჩასახვის მომენტიდან კაცობრიობამ შექმნა 5 ეკზაბაიტი მოცულობის ინფორმაცია და ასეთივე მოცულობის ინფორმაცია იქმნებოდა 2010 წელს ყოველ 2(!) დღეში, ამასთანავე ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარეების ზრდა განუხრელად გრძელდება. კერძოდ, ამავე პერიოდიდან დაიწყო LTE/4G (Long-Term Evolution - კავშირგაბმულობის მობილური სისტემების ხანგრძლივი განვითარების პროექტი) ტექნოლოგიის ქსელების კომერციული დანერგვა, სადაც გადაცემის სიჩქარეები აღწევს 50-დან 600 მბიტ/წმ და უფრო მაღალ სიჩქარეებს. LTE ქსელების მომხმარებელთა რიცხვი 2014 წლისათვის აღწევდა 500 მილიონს და 2013 წელთან შედარებით გაიზარდა 140%-ით. განცხადებულია, რომ 2015 წლისათვის, მსოფლიო მასშტაბით კომერციულ ექსპლუატაციაში იარსებებს 450 სატელეკომუნიკაციო LTE ტექნოლოგიის ქსელი (2014 წლის ბოლოსათვის ფუნქციონირებდა 364), ხოლო 5 წლის შემდეგ დაიწყება 5 G სატელეკომუნიკაციო ქსელების კომერციული ექსპლუატაცია [23].

ტრაფიკის ზრდის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი წყაროა მონაცემთა გადაცემის არხების „მძლავრად“ შიფრაცია, რათა გაიზარდოს მომხმარებელთა მოწყობილობებზე ინფორმაციის დაცვის ხარისხი, ვინაიდან თანამედროვე

ქსელების საფუძველი TCP/IP (Transmission Control Protocol – გადაცემის მართვის პროტოკოლი IP დონეზე) არ არის იდეალური საშუალება ინფორმაციის უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად.

გეომეტრიული პროგრესიით ტრაფიკის ზრდა და ქსელები არსებული არქიტექტურით, ვერ უზრუნველყოფენ ინფორმაციის მიმოცვლას ხარისხის საჭირო დონეზე. ტრადიციულ მიდგომებს საქსელო ინტეგრაციით (სხვადასხვა მწარმოებლების მოწყობილობებით), არ შეუძლია დაეწიოს ათეულმილიარდობით ქსელში ჩართული მოწყობილობების (მოწყობილობათა ინტერნეტი - IoT, Internet of Things) მოთხოვნებს.

კომუტაციის ტრადიციული SSP (Service Switching Point - მომსახურების სახეობათა კომუტაციის წერტილი) კვანძებიდან ქსელის ინტელექტისა და მომსახურების ლოგიკის გადატანამ კომპიუტერული უზრუნველყოფის SCP (Service Control Point - მომსახურების სახეობათა მართვის წერტილი)-ში მორგებული იყო ინტელექტუალური ქსელის (Intelligent Network) კონცეფციაზე, ITU-ს Q-1200 რეკომენდაციის სპეციფიკაციით. NGN ქსელებზე გადასვლის შესაბამისად, ინტელექტუალური ქსელების კონცეფციიდან, რომელიც ორიენტირებული იყო ქსელებზე არხების კომუტაციით, შეიქმნა მულტიმედიური სისტემების (IMS – Multimedia System) IP არქიტექტურა, რომელიც ორიენტირებულია საქსელო პაკეტების კომუტაციაზე.

ამ ვითარებაში, როდესაც მაღალი სიჩქარეების გამო იზრდება არხების ფართოზოლოვნება და რესურსების რაოდენობა, შესაბამისად მცირდება დაყოვნებები და რიგები და პაკეტების ნაკადის სტატისტიკურ მახასიათებლებზე და სტრუქტურაზე მათი გავლენა, ვიმედოვნებთ, რომ ტელეტრაფიკის არსებული თეორიული ბაზა, რომელიც ეფუძნება ზუსტ მათემატიკურ აპარატს, კვლავ სამართლიანი იქნება თანამედროვე ქსელების პროექტირების ამოცანებისათვის. ცხადია, ამისათვის აუცილებელია შესაძლო პრობლემების წარმოჩენის წყაროებისა და მიზეზების შესწავლა.

ამის ნათელ მაგალითს წარმოადგენს ის შედეგები, რომლებიც მიღებულია არსებული, კლასიკური მეთოდების გამოყენებით და წარმოდგენილია დისერტაციის მეოთხე თავში.

4.1. მულტისერვისული ქსელის საარხო რესურსის განსაზღვრის საკითხისათვის [24]

სატელეკომუნიკაციო ქსელში შემოსული მოთხოვნების, ერლანგებში გამოხატული ინტენსიობა განსაზღვრავს, გარკვეული სახის ინფოკომუნიკაციური სერვისის მიღებისათვის საჭირო შეერთებების საშუალო რიცხვს. მონოსერვისული ქსელებისათვის, პოტენციალურად შესაძლო შეერთებების რიცხვი ემთხვევა ერთდროულად დაკავებული არხების რაოდენობას, რაც არ სრულდება მულტისერვისული მომსახურების პირობებში. სხვა და სხვა სახის სერვისების მიწოდება მოითხოვს საარხო რესურსის განსხვავებულ რაოდენობებს. მულტისერვისული მომსახურების პირობებში, ქსელში არსებული ტრაფიკი განისაზღვრება “ერლანგი-არხზე” [25] ერთეულებში, რომელიც მიუთითებს კავშირგაბმულობის ხაზის საარხო ერთეულის დატვირთულობის კოეფიციენტს. თუ საარხო რესურსის გამოყოფას განვიხილავთ შეერთების დამყარების დონეზე, [26], შეიძლება ვიმსჯელოთ შემოთავაზებული შედეგების გამოყენების შესაძლებლობაზე მულტისერვისული მომსახურების პირობებშიც.

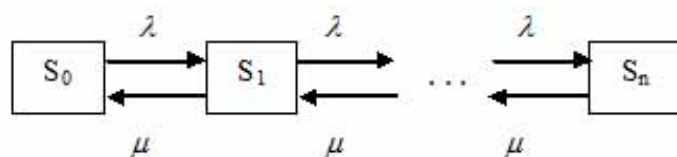
ტელეკომუნიკაციის ქსელების განვითარების პროცესში, ტექნიკური წინადადებების დამუშავების და ტექნიკურ-ეკონომიკური დასაბუთებისათვის აუცილებელია არხების საჭირო რიცხვის დადგენა, რისთვისაც იყენებენ ერლანგის B ფორმულას. მაგრამ, საპროექტო დონეზე, ერლანგის ფორმულით გამოთვლები რთულია და არ არის ხელმისაწვდომი. შესაბამისად,

ტელეკომუნიკაციის საშუალებათა ცნობილი მწარმოებელი კომპანიები, იყენებენ ან ემპირიულ მიდგომას, რომელიც ეფუძნება არხების ტევადობის “გადავსების კოეფიციენტის” სტატისტიკურად დადგენილ მნიშვნელობას, რომელიც განსაზღვრავს არხების ტევადობის აუცილებელ მარაგს, ან იყენებენ საკუთარ ცხრილებს, რაც ყოველთვის დაკავშირებულია ინტერპოლაციის ცდომილებასთან.

შესაძლებელია საინჟინრო პრაქტიკაში წარმატებით გამოვიყენოთ საჭირო არხების რიცხვის, როგორც დატვირთვის ფუნქციის, განსაზღვრის მოხერხებული მეთოდი, დაფუძნებული “სამი სიგმის წესის” გამოყენებაზე [27].

ქსელების პროექტირების პროცესში, მისი ტექნიკურ-ეკონომიკური შეფასებისათვის საჭიროა რესურსების აუცილებელი რიცხვის განსაზღვრა, როგორც ინფორმაციის წყაროების რიცხვისა და შექმნილი დატვირთვის ფუნქცია, მომსახურების ხარისხის დადგენილი მახასიათებლების გათვალისწინებით. არხების კომუტაციის სისტემებში ძირითად მახასიათებელს წარმოადგენს პირველადი მოთხოვნის დაკარგვის ალბათობა, როდესაც მოთხოვნების ნაკადი პუასონის ტიპისაა და წარმოადგენს სისტემის ყველა რესურსის დაკავებულ მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობას. სატელეფონო ქსელებში მომსახურების ხარისხი შეფასდება მომსახურების გარეშე დარჩენილი (დაკარგული) მოთხოვნების რიცხვით, მომსახურებული მოთხოვნების რიცხვთან მიმართებაში.

ტელეტრაფიკის კლასიკურ თეორიაში [1], P_n - მოთხოვნების კარგვების ალბათობის შეფასება დაფუძნებულია, კარგვების რეჟიმში მომქმედი, მასობრივი მომსახურების მრავალარხიანი სისტემის მოდელზე, რომლის მდგომარეობათა გრაფს შემდეგი სახე აქვს:



სადაც S_0, S_1, \dots, S_n არის სისტემის მდგომარეობები, დანომრილი დაკავებული არხების რიცხვის შესაბამისად (S_0 - ყველა არხი თავისუფალია; S_1 - დაკავებულია ერთი არხი, ხოლო დანარჩენები თავისუფალია; S_n - დაკავებულია ყველა n არხი).

$\lambda = 1/T$ არის მოთხოვნათა შემოსვლის საშუალო ინტენსიობა, განსაზღვრული მოთხოვნათა შორის დროის T ინტერვალებით.

$\mu = 1/t$ - მომსახურების ინტენსიობა განსაზღვრული მომსახურების ხანგრძლიობის t საშუალო დროით.

ასეთ სისტემაში, P_n -ის განსაზღვრისათვის, სარგებლობენ ერლანგის B (პირველი) ფორმულით:

$$P_n = \frac{R^n}{\sum_{j=0}^n \frac{R^j}{j!}} = E_n(R) \quad (4.1)$$

სადაც $R = \lambda / \mu$ - არის მომსახურებისათვის ქსელში მოთხოვნების შემოსვლის ინტენსიობა.

თუ t და T განსაზღვრულია დროის ერთი და იგივე ერთეულით, მაშინ $R = t/T$ გვამღევს დატვირთვის ინტენსიობის მნიშვნელობას ერლანგებში.

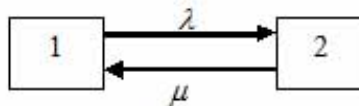
n -ის დიდი მნიშვნელობებისათვის (100-ზე მეტი) P_n -ს პრაქტიკული საქმიანობისათვის საზღვრავენ $E_n(R) = F[E_{n-1}(R), n]$ რეკურენტული ფორმულით, მიახლოებითი მეთოდების გამოყენებით.

პრაქტიკისათვის შესაძლებელია საანგარიშო ფორმულებს მიეცეს ხელსაყრელი შინაარსი, რაც დამყარებული იქნება პროცესების მოდელირების დროს, ფართოდ გავრცელებული, მომენტების დინამიკის და შედეგების სწორად განსაზღვრის უზრუნველყოფის მეთოდებზე [26].

მომენტების დინამიკის მეთოდი იყენებს მარკოვის უწყვეტი ჯაჭვების თეორიის წრფივ დიფერენციალურ განტოლებებს, რომელიც აღწერს უწყვეტ დროში დისკრეტული მდგომარეობების ალბათობათა ცვლილებას, რაც

აგრეთვე შეესაბამება ერლანგის პირველ ფორმულას (ანუ B ფორმულას). მეთოდი ითვალისწინებს სისტემის ელემენტების ურთიერთდამოუკიდებელი მდგომარეობების ვითარებას, იმის საფუძველზე, რომ სისტემის E_i ელემენტების საშუალო რიცხვი, რომლებიც i -ურ მდგომარეობაშია, არის ელემენტების საერთო N რიცხვის (სადაც $N = \sum E_i$) ნამრავლი, სისტემის i მდგომარეობაში ყოფნის P_i ალბათობაზე.

ამ შემთხვევაში სისტემის ელემენტებს წარმოადგენენ ტერმინალები, რომელთაგან თითოეული არის ორი შესაძლო მდგომარეობიდან ერთ-ერთში: 1-პასიურ მდგომარეობაში, როდესაც ის თავისუფალია და 2 - დაკავებული აქვს არხი კავშირის არსებობის განმავლობაში, რასაც შეესაბამება მდგომარეობათა შემდეგი სქემა:



თუ λ და μ არის 1-დან მე-2 მდგომარეობაში აბონენტის გადასვლის ინტენსიობა, მაშინ გადასვლების საშუალო დინამიკა იქნება:

$$\begin{aligned} dE_1/dt &= -\lambda E_1 + \mu E_2; \\ dE_2/dt &= \lambda E_1 - \mu E_2. \end{aligned}$$

აქედან, დამყარებული რეჟიმისათვის მივიღებთ:

$$dE_1/dt = dE_2/dt = 0,$$

ხოლო დაკავებული არხების რიცხვისათვის კი:

$$E_2 = N_p(1 + v),$$

სადაც $v = \lambda / \mu$.

დავუშვათ, რომ x_{ij} დისკრეტული შემთხვევითი სიდიდე ლებულობს მხოლოდ ორ შესაძლო მნიშვნელობას:

$$x_{ij} \begin{cases} 1, \text{თუ } j\text{-ური ელემენტი იმყოფება } i \text{ მდგომარეობაში;} \\ 0, \text{თუ } j\text{-ური ელემენტი თავისუფალია.} \end{cases}$$

ყოველი j -სათვის განაწილების კანონს აქვს ერთი და იგივე სახე [1]:

x_i -ის მნიშვნელობები	0	1
შესაბამისი ალბათობები	$1-P_i$	P_i

სადაც P_i არის სისტემის i მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობა.

შესაბამისად, $i=2$ მდგომარეობაში ყოფნის რიცხვითი მნიშვნელობის დისპერსია არის $x_{ij} = x_i$ სიდიდის დისპერსიების N ერთნაირი მნიშვნელობების ჯამი:

$$D[x_2] = (0 - P_2)^2 (1 - P_2) + (1 - P_2)^2,$$

ანუ

$$D_2 = E_2(1 - E_2 / N) = Nv(1 + v)^2.$$

“სამი სიგმის წესის” შესაბამისად, დაკავებული არხების შესაძლო რიცხვი, როდესაც ის განაწილებულია ნორმალური კანონით, პრაქტიკულად შეადგენს $E_2 + 3\sqrt{D_2}$. ამის საფუძველზე, N რაოდენობის აბონენტების მომსახურებისათვის საჭირო არხების n რიცხვი, თუ ერთი აბონენტის აქტივობა უდიდესი დატვირთვის საათში არის v , გამოისახება შემდეგი სახით:

$$n = \frac{Nv + K\sqrt{Nv}}{1 + v} \tag{4.2}$$

სადაც Nv არის დატვირთვა ერლანგებში, ხოლო K - არის კარგების დასაშვების კოეფიციენტი, რომლისთვისაც ფუნქცია ინარჩუნებს ნორმალური განაწილების კანონის სახეს (შესაბამისობის დადგენა შესაძლებელია საშუალო კვადრატული გადახრის მნიშვნელობის შეფასების საფუძველზე).

(4.2) გამოსახულების გამოყენების სიზუსტის დადგენის მიზნით ჩატარდა არხების საჭირო რაოდენობის $n = n(N, P_{\text{უარის}})$ გამოთვლა, რომელიც შედარებულია $E_n(R)$ მნიშვნელობებთან. ასეთი შედარება, ერთი ტერმინალის $v = 0,15$ ერლანგი დატვირთვისათვის, გვაძლევს, რომ n -ის განსაზღვრა შესაძლებელია 2%-ზე ნაკლები ცდომილებებით (ცხრილი 4).

ცხრილი 4

n	R	\sqrt{R}	k	n გამოთვლილი	ცდომილება %
10	4,416	2,1	3,371	9,92	0,8
15	8,027	2,833	3,258	15,18	1,2
20	11,910	3,45	3,214	20,34	1,7
25	15,963	3,995	3,2	25,445	1,78
30	20,134	4,487	3,2	30,496	1,65
35	24,392	4,938	3,21	35,507	1,4
40	28,718	5,359	3,224	40,485	1,2
45	33,097	5,753	3,242	45,433	0,96
50	37,522	6,125	3,261	50,358	0,71
60	46,479	6,8175	3,303	60,1517	0,25
70	55,550	7,453	3,347	69,879	0,15
80	64,707	8,044	3,393	79,552	0,56
90	73,935	8,598	3,438	89,182	0,9
100	83,220	9,122	3,4836	98,77	1,23

საშუალო მნიშვნელობათა დინამიკის მეთოდით, E_2 -ს მათემატიკური მოლოდინის და D_2 დისპერსიის განსაზღვრით და იმის დაშვებით, რომ (4.2) გამოსახულების შედეგები ექვემდებარება ნორმალური განაწილების კანონს, უარის ალბათობა შეიძლება გამოვსახოთ ლაპლასის ინტეგრალით:

$$\varphi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

ე.ი., ამ შემთხვევითი სიდიდის n -ის მნიშვნელობაზე გადაჭარბების ალბათობა, ან საშუალო მნიშვნელობიდან $E_2 = VN / (1+V)$ გადახრის გადაჭარბება $n-E_2$ სიდიდეზე, იქნება:

$$P_{\text{უარის}} \approx 1 - 2\varphi \left[\frac{n(1+V) / \sqrt{VN} - \sqrt{VN}}{\sqrt{VN}} \right] \quad (4.3)$$

(4.2) გამოსახულების ჩასმით (4.3)-ში, ვღებულობთ:

$$P_{\text{უარის}} \approx 1 - 2\varphi(k)$$

$$\text{ცდომილება იქნება: } \Delta P_{\text{უარის}} = P_{\text{უარის}} - P_V,$$

სადაც P_v არის (4.1) გამოსახულების შინაარსის ბლოკირების ალბათობის ექვივალენტური და განისაზღვრება (4.2)-დან Δv ცდომილებით, აგრეთვე იმ ცდომილებით, რომელიც შეესაბამება სისტემის მდგომარეობათა ნორმალური განაწილების კანონიდან გადახრით გამოწვეულ ცდომილებას.

(4.3) ფორმულით გამოძახებებზე უარების $P_{უარის}$ ალბათობის სიდიდეზე Δv ცდომილების ზეგავლენა შეიძლება შევავსოთ თუ შევადარებთ (4.1)-ის შედეგებს, როდესაც $k=3,2 \dots 3,371$ ($P_{უარის} = 0,01$), $N \geq 10$. $P_{უარის}$ განსაზღვრის ცდომილება, როდესაც ν -ს განსაზღვრის ცდომილება არ აღემატება (1,0-1,5)%, არის 1,78-ზე ნაკლები და აქ მნიშვნელოვანი ცდომილების წყაროს წარმოადგენს, მხოლოდ განაწილების ნორმალური კანონის დაშვება.

როდესაც დისკრეტული შემთხვევითი სიდიდე x_{ij} (ცხრილი 3) ღებულობს მხოლოდ ორ შესაძლო მნიშვნელობას ნებისმიერი j ელემენტისათვის: 1 ან 0, იმის მიხედვით არის თუ არა j ელემენტი i მდგომარეობაში, როგორც ავლნიშნეთ მდგომარეობათა განაწილების კანონს ნებისმიერი j -თვის აქვს ერთი და იგივე სახე. შესაბამისად N დამოუკიდებელი შემთხვევითი სიდიდეების ჯამის განაწილების კანონი იქნება ბინომიალური და შეიძლება გამოვიყენოთ შემდეგი შეფასება [27]:

$$P(|n - E_2| \geq k\sqrt{D_2}) \leq 4/9k).$$

ამ უტოლობის მარჯვენა ნაწილი არ შეიცავს N პარამეტრს, ამიტომ, მაშინაც კი, როდესაც $N < 10$ იმის ალბათობა, რომ $|n - E_2|$ გადააჭარბებს $k\sqrt{D_2}$ -ს, როდესაც $k=3,2-3,371$ და $\nu=0,15$, არ აღემატება 0,042-0,046. როდესაც N -ის მნიშვნელობა იზრდება, ბინომიალური კანონის განაწილების კანონის სახე მისწრაფის ნორმალური განაწილებისაკენ და ამ მიახლოების ხარისხი იზრდება.

ამრიგად, არხების რიცხვის განსაზღვრისათვის ფორმულა (4.2) და უარების ალბათობისათვის ფორმულა (4.3), როგორც მიახლოებითი

ფორმულები, შეიძლება ჩაითვალოს მისაღებად პროექტირებისათვის, გამოთვლების 2%-მდე სიზუსტის უზრუნველყოფით.

4.2. მასობრივი მომსახურების სისტემა ცვლადი ინტენსიობის ხასიათის პაკეტური ნაკადის მიწოდების რეჟიმში

განვიხილოთ ცვლადი ინტენსივობითა და მეხსიერებით მასობრივი მომსახურების სისტემათა მათემატიკური მოდელების ალბათური ანალიზი; ისეთი სისტემების მათემატიკური მოდელების შესწავლა, რომლებშიც შემოსული ნაკადის ინტენსიობა ან მომსახურების ინტენსიობა დამოკიდებულია რიგის სიგრძეზე, უარების რაოდენობაზე და სისტემის იმ მდგომარეობაზე, რომელშიც ის იმყოფებოდა განსახილველ პერიოდამდე.

განვიხილოთ კარგების რეჟიმში მომქმედი სისტემები, ნაკადების ცვლადი ინტენსივობების პირობებში. ცხადია, რომ კავშირგაბმულობის რეალური ქსელები ხასიათდებიან მოთხოვნათა ნაკადების და მომსახურებათა ინტენსივობების ცვალებადობით და ამასთანავე მოთხოვნათა წყაროების რაოდენობა სასრულია. ასეთ სისტემებში უარების ნაკადების შესწავლა და სისტემის თვისებების განსაზღვრა ნებისმიერი ტიპის შემავალი ნაკადებისათვის არის რთული ამოცანა.

განვიხილავთ, უარების ნაკადის შესწავლასთან დაკავშირებულ ერთსერვერიანი სისტემის გამოკვლევის ზოგიერთ შედეგებს ცვლადი ინტენსივობის შემთხვევაში.

დავუშვათ, რომ N_1^1 არის პუასონის წერტილოვანი პროცესი, რომელიც ხასიათდება λ_1 ინტენსივობით, ხოლო N_1^2 ტიპის პუასონის წერტილოვანი პროცესის ინტენსიობაა μ_1 . N_1^1 არის t დროის განმავლობაში შემოსული მოთხოვნების რაოდენობა, რომელსაც მოცემული არხი t დროის განმავლობაში

მომსახურება, მაშინ უარების საშუალო რიცხვი ერთსერვერიანი სისტემისათვის იქნება:

$$MU_t = \int_0^t \lambda_s \left[e^{-\int_0^s (\lambda_u - \mu_u) du} \int_0^s \lambda_v e^{\int_0^v (\lambda_u - \mu_u) du} dv \right] ds \quad (4.4)$$

სადაც U_t არის $[0, t)$ დროის შუალედში უარების რაოდენობა.

მარტინგალის მეთოდით ამ ფორმულის გამოყვანა მოცემულია [28] ნაშრომში.

(4.4) ფორმულის პრაქტიკული გამოყენებისათვის ვსარგებლობთ პროცესის სტაციონარულობით, რაც დასაბუთებულია [28] ნაშრომში ბურკეს თეორემის საფუძველზე და შესაბამისად, როდესაც $\lambda_t = \lambda$ და $\mu_t = \mu$ გვექნება:

$$EU_t = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \lambda t. \quad (4.5)$$

სისტემის მომსახურების ხარისხი განისაზღვრება, როგორც t დროის განმავლობაში დაყოვნებული მოთხოვნების რაოდენობის ფარდობა ამავე დროის შუალედში შემოსული მოთხოვნების რიცხვთან. (4.4) გამოსახულებაში თუ გავითვალისწინებთ, რომ

$$EN_t^1 = \int_0^t \lambda_s ds$$

მივიღებთ ერთსერვერიანი სისტემისათვის დაყოვნებით მომსახურებული მოთხოვნებისათვის შემდეგ გამოსახულებას:

$$D_t = \frac{\int_0^t \lambda_s \left[e^{-\int_0^s (\lambda_u - \mu_u) du} \int_0^s \lambda_v e^{\int_0^v (\lambda_u + \mu_u) du} dv \right] ds}{\int_0^t \lambda_s ds} \quad (4.6)$$

4.3. ორი ფაზით მომსახურე სისტემა

განვიხილოთ ორი ფაზით მომსახურე სისტემა, როდესაც მომსახურე სერვერი წარმოადგენს ორ მიმდევრობით მომსახურების კვანძს და თუ რიგი ფაზებს შორის და პირველი სერვერის წინა დაკავებულია, მაშინ შემოსული ახალი მოთხოვნა დებულობს უარს და იკარგება.

დავუშვათ, რომ N_1^1 წარმოადგენს პუასონის ტიპის შემთხვევით პროცესს λ_1 ინტენსივობით და ის აღნიშნავს t დროის განმავლობაში შემოსული მოთხოვნების რაოდენობას, ხოლო N_1^2 არის პუასონის ტიპის წერტილოვანი პროცესი λ_2 ინტენსივობით და აღნიშნავს პირველ ან მეორე კვანძში მომსახურებული მოთხოვნების რაოდენობას. აღვნიშნოთ დროის t მომენტისათვის პირველი და მეორე კვანძების მდგომარეობა $Q_1(t)$ და $Q_2(t)$ შესაბამისად:

$$Q_i(t) = \begin{cases} 0 - \text{თუ კვანძი თავისუფალია} \\ 1 - \text{თუ კვანძი დაკავებულია} \end{cases}$$

კვანძები აღვწეროთ შემდეგი მდგომარეობებით:

$$Q_1(t) = \int_0^t [1 - Q_1(s-)] dN_s^{-1} - \int_0^t Q_1(s-) dN_s^{-2} \quad (4.7)$$

$$Q_2(t) = \int_0^t Q_1(s-) dN_s^{-2} - \int_0^t Q_2(s-) dN_s^{-2} \quad (4.8)$$

წერტილოვანი პროცესის თვისებების გათვალისწინებით, თუ აღვნიშნავთ, რომ:

$$EQ_1(t) = \pi_1(t), \quad EQ_2(t) = \pi_2(t),$$

მივიღებთ:

$$\pi_1(t) = \int_0^t \lambda_1 [1 - \pi_1(s)] ds - \int_0^t \mu_1 [1 - \pi_1(s)] ds \quad (4.9)$$

$$\pi_2(t) = \int_0^t \mu_s \pi_1(s) ds - \int_0^t \mu_s \pi_2(s) ds \quad (4.10)$$

(4.9)-დან ვღებულობთ, რომ $\pi_1(t) = \lambda_t - \lambda_t \pi(t) - \mu_t \pi(t)$. მაშინ

$$\pi_1(t) = e^{-\int_0^t (\lambda_s + \mu_s) ds} \int_0^t e^{\int_0^s (\lambda_u + \mu_u) du} \lambda_s ds \quad (4.11)$$

(4.10) თანაფარდობიდან გვექნება $\pi_2(t) = \pi_1(t) \mu_t - \mu_t \pi_2(t)$. აქედან კი

$$\pi_2(t) = e^{-\int_0^t (\lambda_s + \mu_s) ds} \int_0^t e^{\int_0^s (\lambda_u + \mu_u) du} \left[\int_0^s \lambda_u e^{-\int_0^u (\lambda_v + \mu_v) dv} \mu_u du \right] ds \quad (4.12)$$

ამრიგად, განსაზღვრულია იმის ალბათობა, რომ სისტემაში პირველი და მეორე ფაზა დაკავებულია. იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ ალბათობა ორივე ფაზის ერთდროულად დაკავებულობისა, გამოვიყენოთ ფორმულა:

$$Q_1(t) \cdot Q_2(t) = \int_0^t Q_1(s) - dQ_2(s) + \int_0^t Q_2(s-) - dQ_1(s) + \sum_{0 < s \leq t} \Delta Q_1(s-) \Delta Q_2(s-) + Q_1(0) + Q_2(0) \quad (4.13)$$

და გამოვითვლით მათემატიკურ მოლოდინს $E[Q_1(t) \cdot Q_2(t)]$.

t დროის განმავლობაში უარების მათემატიკური მოლოდინი ტოლია

$$EU_t = E \int_0^t Q_1(t) d_0 N_s^{-1}$$

აქედან

$$EU_t = E \int_0^t \pi_1(t) \lambda_s ds \quad (4.14)$$

თუ $\pi_1(t)$ მნიშვნელობას განვსაზღვრავთ, მაშინ უარების მათემატიკური მოლოდინი ცხადად არის განსაზღვრული [29].

4.4. ერთსერვერიანი სისტემა შეზღუდული რიგით

ზემოთგანხილული მეთოდი გამოვიყენოთ ერთსერვერიანი სისტემის აღწერისათვის შეზღუდული რიგით. სიმარტივისათვის განვიხილოთ ერთსერვერიანი სისტემა ლოდინის ერთი ადგილით, რაც იმას ნიშნავს, რომ თუ ლოდინის ეს ერთი ადგილი დაკავებულია, მაშინ შემოსული მოთხოვნა იკარგება.

ავღნიშნოთ t დროის მომენტისათვის სერვერის მდგომარეობა $Q_1(t)$, ხოლო ლოდინის ადგილის მდგომარეობა t დროის მომენტისათვის $Q_2(t)$, მაშინ:

$$Q_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{თუ სერვერი თავისუფალია,} \\ 1, & \text{თუ სერვერი დაკავებულია;} \end{cases}$$

$$Q_2(t) = \begin{cases} 0, & \text{თუ ლოდინის ადგილი თავისუფალია,} \\ 1, & \text{თუ ლოდინის ადგილი დაკავებულია.} \end{cases}$$

ასეთი სისტემა შეიძლება აღმოჩნდეს შემდეგ სამ შესაძლო მდგომარეობაში: $(0,0)$, $(0,1)$, $(1,1)$. თუ N_t^1 და N_t^2 არის იგივე შინაარსის შემთხვევითი პროცესები, როგორც წინათგანხილულ ამოცანებში, მაშინ

$$Q_1(t) = \int_0^t [1 - Q_1(s-)] dN_s^1 - \int_0^t Q_1(s-) [1 - Q_2(s-)] dN_s^2 \quad (4.15)$$

$$Q_2(t) = \int_0^t Q_1(s-) [1 - Q_2(s-)] dN_s^1 - \int_0^t Q_1(s-) Q_2(s-) dN_s^2 \quad (4.16)$$

თუ გამოვიყენებთ (4.10), შეიძლება განისაზღვროს თანაფარდობა

$$Q_1(t)Q_2(t) = \int_0^t [Q_1(s-) - Q_2(s-)] dN_s^1 - \int_0^t Q_1(s-)Q_2(s-) dN_s^2 \quad (4.17)$$

ავღნიშნოთ

$$EQ_1(t) = \pi_1(t), \quad EQ_2(t) = \pi_2(t), \quad E[Q_1(t) \cdot Q_2(t)] = \rho_{1,2}(t).$$

ცხადია, რომ უარების მათემატიკური მოლოდინის განსასაზღვრად უნდა ვიპოვოთ $p_{1,2}(t)$, ვინაიდან

$$EU_t = \int_0^t \lambda_s \rho_{1,2}(s) ds$$

ამას გარდა, (4.15), (4.16), (4.17) თანაფარდობებიდან ჩვენ ვღებულობთ დიფერენციალური განტოლებების შემდეგ სისტემებს:

$$\begin{aligned} \pi_1^1(t) &= \lambda(t) - [\lambda(t) + \mu(t)] \pi_1(t) + \mu(t) \rho_{1,2}(t) . \\ \pi_2^1(t) &= \lambda(t) \pi_1(t) - [\lambda(t) + \mu(t)] \rho_{1,2}(t) . \\ \rho_{1,2}^1(t) &= \lambda(t) \pi_1(t) + \lambda(t) \pi_2(t) - [2\lambda(t) + \mu(t)] \rho_{1,2}(t) . \end{aligned} \tag{4.18}$$

აქ საწყის პირობებს წარმოადგენს $\pi_1(0) = 0$, $\pi_2(0) = 0$, $\rho_{1,2}(0) = 0$.

4.5. სისტემა მოთხოვნათა არასტაციონარული ნაკადის მომსახურების რეჟიმში

კარგების რეჟიმში მოქმედი სისტემების თავისებურებათა შესწავლა არის ტელეტრაფიკის თეორიის ერთ-ერთი ურთულესი ამოცანა. მოთხოვნათა სტაციონარული ნაკადისათვის ეს პრობლემა შეიძლება გადაწყდეს ანალიზურად, ხოლო თუ მოთხოვნათა ნაკადი არასტაციონარულია, მაშინ წარმოდგენილი მეთოდი ხვდება დიდ სირთულეებს.

განვიხილოთ, დროის გარკვეულ მონაკვეთში მომსახურების გარეშე დარჩენილი მოთხოვნების განსაზღვრის შესაძლებლობა, როდესაც შემოსულ მოთხოვნათა და მომსახურების ინტენსიობები, დროზე დამოკიდებული სიდიდეებია. ასეთი ანგარიშის განხორციელება შესაძლებელია მარტინგალის მეთოდის საშუალებით [30].

დავუშვათ, რომ (Ω, Φ, P) არის ალბათური სივრცე, ხოლო $F = (F_t)_{t \geq 0}$ კი $F_t \subseteq F$ უზნებად-უწყვეტი მიუღვევადი სუბალგებრა, შევსებული P მაჩვენებლით. დავუშვათ, რომ N_t^i, F_t, P , $i=1,2$ არის ელემენტარული წერტილოვანი პროცესები

(ე.ი. პროცესები, რომლებიც იწყებიან ნულიდან და აქვთ $N_t^i=0$ or $+1$ ტრაექტორიები), სადაც $N_t^i = N_{t-}^i - N_{t-}^i$. ეს პროცესი წარმოადგენს ლოკალურ სუბმარტინგალს და დუბ-მეიერის ცნობილი თეორემის თანახმად, დასაშვებია $N_t^i = m_t^i + A_t^i$ გაფართოება, სადაც $m^i=(m_t^i, F_t, P)$ წარმოადგენს ლოკალურ მარტინგალს და $A^i=(A_t^i, F_t, P)$ არის კომპენსატორი - მიუღვევადი განსაზღვრებადი პროცესი, $A_0^i=0$.

იმ შემთხვევაში, როდესაც

$$A_t^i = \int_0^t \lambda^i(s, \omega) ds$$

სადაც $\lambda^i(s, \omega) \geq 0$, $\lambda^i(s, \omega) = F_s$ ინტენსიობები იზომება ყოველი $s > 0$ -თვის, N^i პროცესი ითვლება პუასონის ტიპად. თუ $\lambda^i(s, \omega)$ არის $\lambda^i(s)$ -ის დეტერმინირებული ფუნქცია, მაშინ N^i წარმოადგენს პუასონის პროცესს $\lambda^i(s)$ დეტერმინირებული ცვლადი ინტენსიობით.

დისერტაციაში N_t^1 წერტილოვანი პროცესი $\lambda^1(t, \omega)$ ინტენსიობით განხილულია, როგორც მოთხოვნის შემოსვლის პროცესი (N_t^1 არის t დროის განმავლობაში შემოსული მოთხოვნების რიცხვი), მაშინ როდესაც N_t^2 არის წერტილოვანი პროცესი $\lambda^2(t, \omega)$ სტოქასტური ინტენსიობით, როგორც მასობრივი მომსახურების შესაბამისი პროცესი (N_t^2 არის მოთხოვნათა რიცხვი, რომლებიც შეიძლება მომსახურებული იქნას t დროის განმავლობაში).

აქ განხილული ერთსერვერიანი მასობრივი მომსახურების სისტემა მოქმედებს შემდეგნაირად. შემოსული მოთხოვნა დაუყოვნებლივ სრულდება, თუ სერვერი თავისუფალია; წინააღმდეგ შემთხვევაში მოთხოვნა დებულობს უარს. ჩვენი მიზანია აღვწეროთ ეს სისტემა და განვსაზღვროთ $[0, t)$ დროის განმავლობაში U_t უარების რიცხვის მათემატიკური მოლოდინი EU_t , მარტინგალის მეთოდის გამოყენებით.

დავუშვათ, რომ U_t არის $[0, t)$ დროის შუალედში უარების რიცხვი; ψ_t არის t დროის მომენტში მოთხოვნის მომსახურე სისტემის მდგომარეობის დამახასიათებელი ფუნქცია:

$$\psi_t = \begin{cases} 1, & \text{სერვერი დაკავებულია,} \\ 0, & \text{სერვერი თავისუფალია.} \end{cases}$$

მაშინ სამართლიანია, რომ

$$I(\psi_t = 1) = N_t^1 - U_t - \int_0^t I(\psi_s = 1) dN_s^2, \quad (4.19)$$

$$U_t = \int_0^t I(\psi_s = 1) dN_s^1, \quad (4.20)$$

საიდანაც ვღებულობთ

$$EU_t = E \int_0^t I(\psi_s = 1) dN_s^1 \quad (4.21)$$

თუ $N_t^1 = m_s^1 + A_s^1$ არის დუბ-მეიერის დეკომპოზიცია, მაშინ

$$E \int_0^t I(\psi_{s-} = 1) dN_s^1 = E \int_0^t I(\psi_{s-} = 1) dA_s^1 \quad (4.22)$$

დაშვებით, რომ

$$dA_s^1 = \lambda^1(s, \omega) ds,$$

სადაც $\lambda^1(s, \omega) = \lambda_s$ დეტერმინირებული ფუნქციაა, (4.21)-დან, (4.22)-ის გათვალისწინებით, მივიღებთ

$$EU_t = E \int_0^t EI(\psi_{s-} = 1) \lambda_s ds. \quad (4.23)$$

თუ $dA_s^2 = \lambda^2(s, \omega) ds$, სადაც $\lambda^2(s, \omega) = \mu_s$ აგრეთვე დეტერმინირებული ფუნქციაა, მაშინ როდესაც $\alpha_t = EI(\psi_t = 1)$ (4.19)-დან მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \alpha_t &= EN_t^1 - EU_t - E \int_0^t I(\psi_{s-} = 1) dN_s^2 = \\ &= EN_t^1 - EU_t - \int_0^t EI(\psi_{s-} = 1) \mu_s ds = \int_0^t \lambda_s ds - \int_0^t \alpha_s (\lambda_s + \mu_s) ds. \end{aligned}$$

შესაბამისად

$$\alpha_t = \lambda_t - (\lambda_t + \mu_t) \alpha_t, \quad (4.24)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $\alpha_0=0$, გვექნება

$$\alpha_t = e^{-\int_0^t (\lambda_s + \mu_s) ds} \int_0^t \lambda_s e^{\int_0^s (\lambda_u + \mu_u) du} ds. \quad (4.25)$$

(4.23) და (4.25) გვაძლევს საშუალებას მივიღოთ შემდეგი შედეგი: U_t უარების რიცხვის მათემატიკური მოლოდინი განისაზღვრება ფორმულით

$$EU_t = \int_0^t \lambda_s \left[e^{-\int_0^s (\lambda_u + \mu_u) du} \int_0^s \lambda_v e^{\int_0^v (\lambda_u + \mu_u) dv} \right] ds. \quad (4.26)$$

4.6. ტრაფიკის მომსახურების ანალიზი დეიტაგრამული რეჟიმის სისტემებში

დევისის (Davies) [31] მიერ აღწერილია დეიტაგრამული გადაცემის სისტემებში მოთხოვნათა დიფერენცირებული ჩაგდებით რიგის კონტროლის მეთოდი. მეთოდის იდეა მდგომარეობს იმაში, რომ პირდაპირი კვანძის სივრცეში ტრაფიკის პაკეტები კომპუტაციის ყოველ წერტილში იკავებენ ბუფერის კვანძებს და მათი მომსახურება ხდება მაღალი პრიორიტეტით შემომავალი ნაკადის მოთხოვნებთან შედარებით.

კ.მეიერმა შეისწავლა, რიგის ალბათური მახასიათებლები, იმ შემთხვევისათვის, როდესაც მომსახურების ინტენსივობა დამოკიდებულია

რიგის სიგრძის გარკვეულ მნიშვნელობაზე და მას რიგთა თეორიაში შემოთავაზებული აქვს ორი კონცეპცია: “S-ის წესი” და “s,S-ის წესი” [32].

დავუშვათ, რომ N არის კომპუტაციის მოცემულ კვანძში ინფორმაციის საშუალოდ დამახსოვრებისათვის არსებული ბუფერული ზონების მოცულობა. შემომავალი დატვირთვის შეზღუდვის მექანიზმი მდგომარეობს იმაში, რომ რიგის მაკონტროლებელი (ტრაფიკის მაკონტროლებელი) დებულობს პირდაპირი ტრაფიკის პაკეტებს მანამ, სანამ არსებობს თავისუფალი ზონები ბუფერში. მომხმარებლისაგან კი ახალი პაკეტები მიიღება მანამ, სანამ არ შეივსება ბუფერი $S(s < N)$.

დავუშვათ, რომ პირდაპირი ტრაფიკისა და მომხმარებლის პაკეტების რიგები არის მარტივი, პარამეტრებით λ_1 და λ_2 და კვანძში მათი გავლის დრო განაწილებულია ექსპონენციალურად, პარამეტრით μ . დავუშვათ, რომ $P_k(t)$ არის k რაოდენობის პაკეტების არსებობის დროის ალბათობა გამოყოფილ კვანძში $t(k=0,1,2,\dots,N)$, მაშინ

$$\begin{aligned}
 P_0(t+\Delta t) &= P_0(t)(1-\lambda_1\Delta t - \lambda_2\Delta t) + \mu P_1(t) + 0(\Delta t); \\
 P_k(t+\Delta t) &= P_k(t)(1-\lambda_1\Delta t - \lambda_2\Delta t) - \mu\Delta t) + \\
 &+ (\lambda_1+\lambda_2)P_{k-1}(t) + \mu\Delta t P_{k+1}(t) + 0(\Delta t); \quad k = (1,2,\dots,s-1); \\
 P_s(t+\Delta t) &= P_s(t)(1-\lambda_1\Delta t - \mu\Delta t) + (\lambda_1+\lambda_2)P_{s-1}(t) + \mu P_{s+1}(t)+0(\Delta t); \\
 P_k(t+\Delta t) &= P_k(t)(1-\lambda_1\Delta t - \mu\Delta t) + \lambda_1 P_{k-1}(t) + \mu P_{k+1}(t)+0(\Delta t); \quad (k=s+1, s+2,\dots,N-1) \\
 P_N(t+\Delta t) &= P_N(t)(1- \mu\Delta t)+\lambda_1 P_{N-1}(t).
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

გარდაქმნებისა და $\Delta t \rightarrow 0$ ზღვარზე გადასვლით მივიღებთ დიფერენციალურ განტოლებათა შემდეგ სისტემას:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_0(t)}{dt} &= -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) + \mu P_1(t); \\
 \frac{dP_k(t)}{dt} &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu)P_k(t) + (\lambda_1 + \lambda_2)P_{k-1}(t) + \mu P_{k+1}(t); \quad (k = 1,2,\dots,S-1); \\
 \frac{dP_s(t)}{dt} &= -(\lambda_1 - \mu)P_s(t) + (\lambda_1 + \lambda_2)P_{s-1}(t) + \mu P_{s+1}(t);
 \end{aligned}
 \tag{4.28}$$

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \mu)P_k(t) + \lambda_1 P_{k-1}(t) + \mu P_{k+1}(t); \quad (k = S+1, S+2, \dots, N-1);$$

$$\frac{dP_N(t)}{dt} = -\mu P_N(t) + \lambda_1 P_{N-1}(t).$$

თუ გადავალთ ზღვარზე, როდესაც $t \rightarrow \infty$, გვექნება

$$(\lambda_1 + \lambda_2)P_0 - \mu P_1 = 0;$$

$$(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu)P_k - (\lambda_1 - \lambda_2)P_{k-1} - \mu P_{k+1} = 0; \quad (k=1, 2, \dots, S-a);$$

$$(\lambda_1 + \mu)P_S - (\lambda_1 + \lambda_2)P_{S-1} - \mu P_{S+1} = 0; \quad (4.29)$$

$$(\lambda_1 + \mu)P_k - \lambda_1 P_{k-1} - \mu P_{k+1} = 0; \quad (k = S+1, S+2, \dots, N-1);$$

$$\mu P_N - \lambda_1 P_{N-1} = 0.$$

დავუშვათ, რომ $\sum_{k=0}^N P_k(t) = 1$, მაშინ (4.29) გვაძლევს შემდეგ რეკურენტულ

თანაფარდობებს:

$$P_k = \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu} \right)^k P_0, \quad (k = 1, 2, \dots, S);$$

$$P_k = \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu} \right)^S \left(\frac{\lambda_1}{\mu} \right)^{k-S} P; \quad (4.30)$$

$$P_0 = \frac{\left(1 - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu} \right) \left(1 - \frac{\lambda_1}{\mu} \right)}{\left(1 - \frac{\lambda_1}{\mu} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu} \right)^S \right] + \frac{\lambda_1}{\mu} \left(1 - \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{\lambda_1}{\mu} \right)^{N-S} \right]}.$$

შემოვიტანოთ აღნიშვნები $\frac{\lambda_1}{\mu} = \rho_1$ და $\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu} = \rho_2$, ($\rho_1 < \rho_2 < 1$),

მივიღებთ:

$$P_k = \frac{\rho_2^k (1 - \rho_1)(1 - \rho_2)}{(1 - \rho_1)(1 - \rho_2^S) + \rho_1(1 - \rho_2)(1 - \rho_1^{N-S})}, \quad (k = 1, 2, \dots, S) \quad (4.31)$$

$$P_k = \frac{\rho_2^S \rho_1^{k-S} (1 - \rho_1)(1 - \rho_2)}{(1 - \rho_1)(1 - \rho_2^S) + \rho_1(1 - \rho_2)(1 - \rho_1^{N-S})}, \quad (k = S+1, S+2, \dots, N-1) \quad (4.32)$$

დავუშვათ, რომ ისევე როგორც წინა შემთხვევაში N არის ბუფერის პულის მოცულობა. დავუშვათ აგრეთვე, რომ შემომავალი ნაკადების

შემზღვეველ მექანიზმს წარმოადგენს ის ფაქტი, რომ პირდაპირი ტრაფიკის პაკეტები მეორდებიან (ხდება მიღება) მანამ, სანამ ბუფერი თავისუფალია. ახალი სააბონენტო პაკეტები აღიქმება კომუტაციის წერტილში მანამ, სანამ დაკავებული ბუფერების რაოდენობა მიაღწევს $S(s < N)$ და ამის შემდეგ მათი მიღება აღდგება, თუ თავისუფალი ბუფერების რიცხვი შეადგენს $N-s$ ($s < S$).

დავუშვათ, რომ $P_k^{(1)}(t)$ არის იმის ალბათობა, რომ საკომუტაციო კვანძში გარკვეულ t დროში k რაოდენობის ბუფერების შევსება მიმდინარეობს ($k=1,2,\dots,S-1$) პირდაპირი ტრაფიკის და სააბონენტო პაკეტებით, ხოლო $P_k^{(2)}(t)$ არის იმის ალბათობა, რომ კომუტაციის კვანძში k ($k=S+1, S+2, \dots, N$) ბუფერები ივსება დროის გამოყოფილ ინტერვალში (კვანტში) მხოლოდ პირდაპირი ტრაფიკის პაკეტებით.

თუ პირდაპირი ტრაფიკი და შემავალი ნაკადები არის მარტივი λ_1 და λ_2 პარამეტრებით, ხოლო მათი “საკომუტაციო სისტემაში” არსებობის დროის ხანგრძლიობა განაწილებულია ექსპონენციალური კანონით, პარამეტრით μ , მაშინ სისტემა შეიძლება აღწერილი იქნას დიფერენციალური განტოლებების სისტემით:

$$\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= \mu P_1^{(1)}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2) P_0(t); \\ \frac{dP_k^{(1)}(t)}{dt} &= \mu P_{k+1}^{(1)}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) P_k^{(1)}(t) + (\lambda_1 + \lambda_2) P_{k-1}^{(1)}(t); \quad (k=1,2,\dots,S-1); \\ \frac{dP_s^{(1)}(t)}{dt} &= \mu P_{s+1}^{(1)}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) P_s^{(1)}(t) + (\lambda_1 + \lambda_2) P_{k-1}^{(1)}(t); \\ \frac{dP_k^{(1)}(t)}{dt} &= \mu P_{k+1}^{(1)}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) P_k^{(1)}(t) + (\lambda_1 + \lambda_2) P_{k-1}^{(1)}(t); \quad (k=s+1,\dots, S-2); \\ \frac{dP_{S-1}^{(1)}(t)}{dt} &= (\lambda_1 + \lambda_2) P_{S-2}^{(1)}(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) P_{S-1}^{(1)}(t); \\ \frac{dP_{S+1}^{(1)}(t)}{dt} &= \mu P_{S+2}^{(2)}(t) - (\lambda_2 + \mu) P_{S+1}^{(2)}(t); \end{aligned} \tag{4.33}$$

$$\frac{dP_k^{(1)}(t)}{dt} = \mu P_{k+1}^{(2)}(t) - (\lambda_2 + \mu)P_{k1}^{(2)}(t) + \lambda_2 P_{k-1}^{(2)}(t); \quad (k=s+2, \dots, S-1; S+2, \dots, N-1);$$

$$\frac{dP_s^{(1)}(t)}{dt} = \mu P_{s+1}^{(2)}(t) - (\lambda_2 + \mu)P_s^{(2)}(t) + (\lambda_1 + \lambda_2)P_{s-1}^{(1)}(t) + \lambda_2 P_{s-1}^{(2)}(t);$$

$$\frac{dP_N^{(2)}(t)}{dt} = \lambda_2 P_{N-1}^{(2)}(t) - \mu P_{N1}^{(2)}(t).$$

გადავიდეთ (4.33) სისტემაში $t \rightarrow \infty$ ზღვარზე, მაშინ დამყარებული რეჟიმის ალბათური მახასიათებლები მიიღებენ შემდეგ სახეს:

$$\begin{aligned} P_1^{(1)} &= \rho_2 P_0; \\ (1 + \rho_2)P_k^{(1)} &= \rho_2 P_{k-1}^{(1)} + P_{k+1}^{(1)}, \quad (k = 1, 2, \dots, s-1; s+1, \dots, S-2); \\ (1 + \rho_2)P_s^{(1)} &= \rho_2 P_{s-1}^{(1)} + P_{s+1}^{(1)} + P_{s+1}^{(2)}; \\ (1 + \rho_2)P_{s-1}^{(1)} &= \rho_2 P_{s-2}^{(1)}; \\ (1 + \rho_1)P_{s+1}^{(2)} &= P_{s+2}^{(2)} \\ (1 + \rho_1)P_k^{(2)} &= \rho_1 P_{k-1}^{(2)} + P_{k+1}^{(2)}, \quad (k = s+2, \dots, S-1; S+1, \dots, N-1); \\ (1 + \rho_1)P_s^{(2)} &= \rho_2 P_{s-1}^{(1)} + \rho_1 P_{s-1}^{(2)} + P_{s+1}^{(2)}; \\ P_N^{(2)} &= \rho_1 P_{N-1}^{(2)}. \end{aligned} \tag{4.34}$$

როგორც წინა შემთხვევაში შემოვიტანოთ აღნიშვნები $\rho_2 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu}$, $\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu}$ წრფივი ალგებრული განტოლებების სისტემის

ამოხსნის მიზნით შემოვიტანოთ მაწარმოებელი ფუნქციები:

$$F^{(1)}(Z) = \sum_{k=1}^{S-1} P_k^{(1)} Z^k, \quad F^{(2)}(Z) = \sum_{k=S+1}^N P_k^{(2)} Z^k.$$

(4.34)-დან მაწარმოებელი ფუნქციებისათვის გვექნება:

$$F^{(1)}(Z)(1-Z)(1-\rho_2 Z) = \rho_2 Z(1-Z)P_0 - P_{s+1}^{(2)} Z^{s+1} + \rho_2 \rho_{s-1}^{(1)} Z^{s+1}. \tag{4.35}$$

$$F^{(2)}(Z)(1-Z)(1-\rho_1 Z) = \rho_1 Z^{N+1} P_N^{(2)} (1+Z) - P_{s+1}^{(2)} Z^{s+1} + \rho_2 \rho_{s-1}^{(1)} Z^{s+1}. \tag{4.36}$$

თუ შევცვლით $Z=1$ და $Z=1/\rho_2$, მივიღებთ:

$$P_{s+1}^{(2)} = \rho_2 P_{s-1}^{(1)}. \tag{4.37}$$

$$P_{s-1}^{(1)} = \rho_2^{s-1} \frac{1-\rho_2}{1-\rho_2^{s-1}} P_0. \quad (4.38)$$

იგივე გამოთვლები $Z=1/\rho_1$ -თვის გვაძლევს შემდეგ გამოსახულებას

$$P_N^{(2)} = \rho_2^s \rho_1^{N-s} \frac{(1-\rho_1^{s-s})(1-\rho_2)}{(1-\rho_2^{s-s})(1-\rho_1)} P_0 \quad (4.39)$$

თუ ჩავსვამთ (4.37) და (4.38)-ს (4.35) და (4.36)-ში, გარკვეული გარდაქმნების შემდეგ, რომელიც შემოთავაზებულია კ.მეიერის [33] მიერ, ვსაზღვრავთ:

$$P_k^{(1)} = \rho_2^k P_0, \quad (k = 1, 2, \dots, s); \quad (4.40)$$

$$P_k^{(1)} = \rho_2^k \frac{1-\rho_2^{s-k}}{1-\rho_2^{s-s}}, \quad (k = s+1, \dots, S-1); \quad (4.41)$$

$$P_s^{(2)} = \rho_2^s \rho_1^{n-s} \frac{(1-\rho_1^{s-s})(1-\rho_2)}{(1-\rho_2^{s-s})(1-\rho_1)} P_0. \quad (4.42)$$

ნორმირების პირობის თანახმად:

$$\sum_{k=0}^{S-1} P_k^{(1)} + \sum_{k=S}^N P_k = 1$$

განისაზღვრება P_0 -ის მნიშვნელობა

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=1}^s \rho_2^k + \sum_{k=s+1}^{S-1} \rho_2^k \frac{(1-\rho_2^{s-k})}{1-\rho_2^{s-s}} + \sum_{k=S}^N \rho_2^s \rho_1^{n-s} \frac{(1-\rho_1)^{s-s} (1-\rho_2)}{(1-\rho_2^{s-s})(1-\rho_1)}}. \quad (4.43)$$

დეიტაგრამული რეჟიმის უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელია კვანძში ტრანზიტული პაკეტების მომსახურებაზე უარების ალბათობა, განსაზღვრული (4.39) ფორმულით. თუ განვიხილავთ "s" და "s,S" წესების შესაბამისი რიგის სიგრძის მათემატიკური მოლოდინის მნიშვნელობებს, აღმოჩნდება, რომ მეორე შემთხვევაში რიგის სიგრძე უფრო ნაკლებია.

ფორმულები (4.40-4.43) იძლევიან საშუალებას მივიღოთ ცხადი სახით $F^{(1)}(Z)$ და $F^{(2)}(Z)$ მაწარმოებელი ფუნქციების გამოსახულებები და შესაბამისად გამოვთვალოთ შესაბამისი ოპერაციული მახასიათებლები.

4.7. მრავალსერვერიანი სისტემა რიგებითა და ცვლადი ინტენსიობის ტრაფიკით

ვთქვათ მრავალსერვერიანი სისტემა შეიცავს n სერვერს და სერვერები დანომრილია ციფრებით $1, \dots, n$ და ახლადშემოსულ მოთხოვნას ემსახურება თავისუფალი სერვერი უმცირესი ნომრით. თუ ყველა სერვერი დაკავებულია, მაშინ შემოსული მოთხოვნა იღებს უარს მომსახურებაზე. შემოსულ მოთხოვნათა ინტენსიობა არის მოთხოვნის შემოსვლის დროის მომენტისა და მომსახურების სისტემის თავისუფალი სერვერების რიცხვის ფუნქცია.

აღვნიშნოთ $Q_i(t)$ -თი i -ური სერვერის მდგომარეობა, $i=1, \dots, n$ t მომენტში. მაშინ:

$$Q_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{ე.წ. თუ სერვერი თავისუფალია} \\ 1, & \text{ე.წ. თუ სერვერი დაკავებულია} \end{cases}$$

სისტემის მდგომარეობა რიგის გათვალისწინებით შეიძლება აღწერილი იქნას შემდეგი გამოსახულებით:

$$Q_1(t) = \int_0^t [1 - Q_1(s-)] [n - \sum_{i=1}^n Q_i(s-)] dN_s^1 - \int_0^t Q_1(s-) dN_s^2,$$

$$Q_k(t) = \int_0^t \prod_{i=1}^{k-1} Q_i(s-) [1 - Q_k(s-)] [n - \sum_{i=1}^n Q_i(s-)] dN_s^1 - \int_0^t Q_k(s-) dN_s^2, \quad (4.44)$$

($k = 1, 2, \dots, n$)

ჩვენი მიზანია - გამოვთვალოთ $[0, t]$ ინტერვალში U_t უარების რიცხვის მათემატიკური მოლოდინი EU_t

$$EU_t = E \int_0^t \prod_{i=1}^n Q_i(s-) dN_s^1. \quad (4.45)$$

წარმოვიდგინოთ უარების რიცხვის მათემატიკური მოლოდინის ანგარიში $n=2$ შემთხვევისათვის

$$Q_1(t) = \int_0^t [1 - Q_1(s-)] [2 - \sum_{i=1}^2 Q_1(s-)] dN_s^1 - \int_0^t Q_1(s-) dN_s^2; \quad (4.46)$$

$$Q_2(t) = \int_0^t [Q_1(s-)] [1 - Q_2(s-)] dN_s^1 - \int_0^t Q_2(s-) dN_s^2. \quad (4.47)$$

ცნობილია [34], თუ A_t და B_t , $t \geq 0$ არის სასაზღვრო ვარიაციის უწყვეტი ფუნქციები, შეიძლება გამოვიყენოთ სტილტესის შემდეგი ფორმულა

$$A_t \cdot B_t = A_0 B_0 + \int_0^t A_{s-} dB_s + \int_0^t B_{s-} dA_s + \sum_{s \leq t} (A_s - A_{s-})(B_s - B_{s-}). \quad (4.48)$$

თუ $Q_1(t)$ და $Q_2(t)$ აგრეთვე არის სასაზღვრო ვარიაციის უწყვეტი ფუნქციები, მაშინ (4.48)-ის გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\begin{aligned} Q_1(t)Q_2(t) &= Q_1(0) + Q_2(0) + \int_0^t Q_1(s-) dQ_2(s) + \\ &+ \int_0^t Q_2(s-) dQ_1(s) + \sum_{0 < s \leq t} \Delta Q_1(s) \Delta Q_2(s), \end{aligned} \quad (4.49)$$

სადაც $\Delta Q_i(s) = Q_i(s) - Q_i(s-)$, ($i=1,2$).

დავუშვათ, რომ საწყის მიმენტში სისტემაში არ არსებობს მოთხოვნები, ანუ $Q_1(0) = Q_2(0)$. ამის შემდეგ, თუ გავითვალისწინებთ, რომ მოთხოვნათა შემოსვლის პროცესი არის პუასონის ტიპის, მაშინ ნებისმიერი $t \geq 0$, გვექნება

$$P\left(\sum_{0 < s \leq t} \Delta Q_1(s) \Delta Q_2(s) = 0\right) = 1. \quad (4.50)$$

რომელიც (4.49)-ის გათვალისწინებით ღებულობს შემდეგ სახეს:

$$Q_1(t)Q_2(t) = \int_0^t Q_1(s-) dQ_2(s) + \int_0^t Q_2(s-) dQ_1(s). \quad (4.51)$$

თუ გავითვალისწინებთ (4.46) და (4.47), მაშინ (4.51)-დან ვღებულობთ:

$$Q_1(t)Q_2(t) = \int_0^t Q_1(s-) [1 - Q_2(s-)] dN_s^1 + \int_0^t Q_2(s-) [1 - Q_1(s-)] \times$$

$$\begin{aligned} & \times [2 - \sum_{i=1}^2 Q_i(s-)] dN_s^1 - 2 - \int_0^t Q_1(s-) Q_2(s-) dN_s^1 = \quad (4.52) \\ & = \int_0^t [Q_1(s-) - 2Q_1(s-) + Q_2(s-)] dN_s^1 - 2 \int_0^t Q_1(s-) Q_2(s-) dN_s^2. \end{aligned}$$

აღვნიშნოთ

$$E[Q_1(t)Q_2(t)] = \rho_{12}(t), \quad (4.53)$$

$$EQ_1(t) = \pi_1(t), \quad EQ_2(t) = \pi_2(t). \quad (4.54)$$

(აქ $\pi_1(t)$ და $\pi_2(t)$ იმის ალბათობებია, რომ დროის t მომენტში ყველა სერვერი დაკავებულია).

დავუშვათ, რომ

$$A_t^1 = \int_0^t \lambda_s ds, \quad A_t^2 = \int_0^t \mu_s ds,$$

სადაც λ_s და μ_s არის დეტერმინირებული ფუნქციები. თუ (4.52)-ში ჩავსვამთ მათემატიკურ მოლოდინს, მივიღებთ

$$\rho_{12}(t) = \int_0^t \lambda_s [\pi_1(s-) + \pi_2(s-)] ds - 2 \int_0^t \rho_{12}(s-) (\lambda_s + \mu_s) ds. \quad (4.55)$$

$\pi_1(t)$ და $\pi_2(t)$ ალბათობები შეიძლება განისაზღვროს (4.46) და (4.47)-დან:

$$\begin{aligned} \pi_1(t) &= 2 \int_0^t \lambda_s ds - 2 \int_0^t \pi_1(s-) \lambda_s ds - \int_0^t \pi_2(s-) \lambda_s ds + \\ &+ \int_0^t \rho_{12}(s-) \lambda_s ds - \int_0^t \pi_1(s-) \mu_s ds; \quad (4.56) \end{aligned}$$

$$\pi_2(t) = \int_0^t \pi_1(s-) \lambda_s ds - \int_0^t \rho_{12}(s-) \lambda_s ds - \int_0^t \pi_2(s-) \mu_s ds. \quad (4.57)$$

აღვნიშნოთ $\pi_1(t) + \pi_2(t) = \alpha(t)$. მაშინ, შევკრიბოთ (4.56) და (4.57), გვექნება:

$$\alpha(t) = 2 \int_0^t \lambda_s ds - \int_0^t \alpha(s) (\lambda_s + \mu_s) ds, \quad (4.58)$$

შესაბამისად ვღებულობთ:

$$\alpha'(t) = 2\lambda_t - \alpha(t)(\lambda_t + \mu_t), \quad \alpha(0) = 0. \quad (4.59)$$

(4.59)-ის ამოხსნის შედეგად, გვაქვს:

$$\alpha(t) = 2 \int_0^t \lambda_s e^{\int_0^s (\lambda_u + \mu_u) du} ds e^{-\int_0^t (\lambda_s + \mu_s) ds}. \quad (4.60)$$

(4.55)-დან ცხადია, რომ

$$\rho_{12}(t) = \alpha(t)\lambda_t - 2(\lambda_t + \mu_t)\rho_{12}(t), \quad \rho_{12}(0) = 0. \quad (4.61)$$

აღვნიშნოთ

$$\xi_t = e^{\int_0^t (\lambda_s + \mu_s) ds}$$

(4.61) განტოლების ამოხსნა გვაძლევს:

$$\rho_{12}(t) = \xi_t^{-2} \int_0^t \alpha(s) \lambda_s \xi_s^2 ds. \quad (4.62)$$

(4.45)-დან, მოცემული ამოცანის პირობებში გვექნება:

$$EU_t = E \int_0^t Q_1(s-) Q_2(s-) dN_s^1 = E \int_0^t Q_1(s-) Q_2(s-) \lambda_s ds.$$

შესაბამისად, $[0, t]$ დროის შუალედში უარების მათემატიკური მოლოდინისათვის საბოლოოდ ვღებულობთ ფორმულას:

$$EU_t = 2 \int_0^t \lambda_s \xi_s^{-2} \left\{ \int_0^s \lambda_u \xi_u e^{\int_0^u (\lambda_v + \mu_v) dv} du \right\} ds \quad (4.63)$$

(4.58)-ში $\alpha(t)$ არის იმის ალბათობა, რომ ერთ-ერთი სერვერი თავისუფალია, ხოლო ρ_{12} არის უარის ალბათობა. აღსანიშნავია, რომ დასმულ ამოცანაში, თუ გავითვალისწინებთ სისტემაში სტაციონარულ პირობებს, როდესაც $\lambda_s = \lambda$ და $\mu_s = \mu$, ფორმულა (4.62) დადის ერლანგის ფორმულაზე [35].

ტრაფიკის არსებული არხებით მომსახურების პროცესი აღიწერება მე-
(4.37) განტოლებებით და ამ შემთხვევისათვის სამართლიანია მტკიცება, რომ:

$$EU_t = \int_0^t I_n(s) \lambda_s ds,$$

გამოვიყენოთ შემდეგი რეკურენტულ განტოლებათა სისტემები:

$$I_n(t) = \frac{n-k+1}{\xi_t^k} \int_0^t I_{k-1}(s) \lambda_s \xi_s^{k+1} ds,$$

$1 \leq k \leq n$ და $I_0=1$.

აღვნიშნოთ, რომ

$$I_1(t) = E[Q_1(t) + Q_2(t) + \dots + Q_n(t)]$$

და

$$I_k(t) = \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n} \rho_{i_1 i_2 \dots i_k},$$

სადაც

$$\rho_{i_1 i_2 \dots i_k}(t) = E[Q_{i_1}(t) \dots Q_{i_k}(t)].$$

4.8. სატელეკომუნიკაციო ქსელში მომსახურების სახეობათა მოთხოვნებზე დაყოვნებების წარმოქმნა

განვიხილოთ ისეთი სატელეკომუნიკაციო ქსელის შემთხვევა, რომელიც შეიცავს მხოლოდ ერთ კვანძს SSP - ფუქციონალური შესაძლებლობებით. ინტელექტუალურ მომსახურებაზე მოთხოვნები SSP-ს მიეწოდება ქსელის ყველა კვანძებიდან, წინასწარ დადგენილი მარშრუტებით. ნახ.9-ზე მოცემულია ასეთი ქსელის ფრაგმენტი შესაბამისი კვანძებით (სატელეფონო სადგურებით), ხოლო შემაერთებული ხაზები, შეესაბამება კვანძებიდან SSP-მდე სიგნალების მიწოდების მარშრუტებს. (აქ სიგნალების მიწოდების შესაძლო შემოვლითი გზები აღნიშნული არ არის).

ჩავთვალოთ, რომ SSP განთავსებულია Y_0 საკვანძო სადგურში, ხოლო დანარჩენი კვანძები $Y_i (i \neq 0)$ წარმოადგენენ დამაბოლოებელ სადგურებს, ანუ ყოველი მათგანი ქმნის ინტელექტუალურ მომსახურებაზე მოთხოვნების დატვირთვას.

ავლნიშნოთ: λ_0 -ით ინტელექტუალურ მომსახურებაზე მოთხოვნების საშუალო რიცხვი ერთი მომხმარებლისაგან, დროის ერთეულში;

N_i არის i -ური კვანძის მომხმარებელთა რიცხვი;

ამ შემთხვევაში, ყოველი კვანძიდან შემოსული მოთხოვნების საშუალო რიცხვი ინტელექტუალურ მომსახურებაზე იქნება:

$$\lambda_i = \lambda_0 \cdot N_i,$$

ხოლო SSP -ზე შემოსული ჯამური მოთხოვნები ყველა კვანძიდან:

$$\lambda = \sum_{i=1}^K \lambda_i,$$

სადაც K არის SSP-ზე მიერთებული კვანძების საერთო რიცხვი.

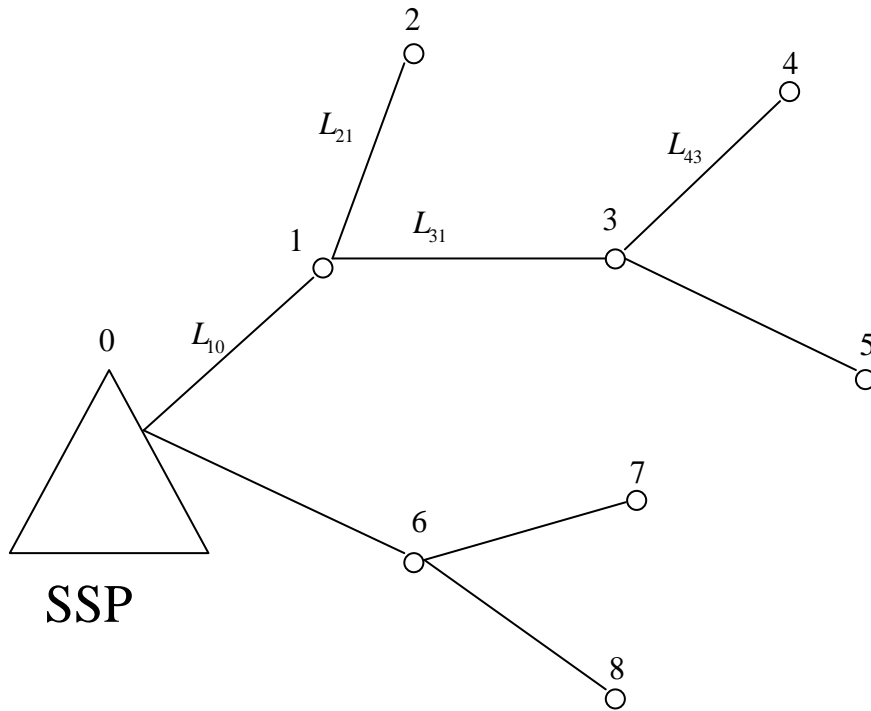
ავლნიშნოთ V_{ij} -ით მონაკვეთი, რომელიც აერთებს ქსელის Y_i და Y_j კვანძებს. ავლნიშნოთ ქსელის უბანი, რომელიც შეიცავს Y_i კვანძიდან საკვანძო სადგურამდე მარშრუტის ყველა მონაკვეთებს B_i -ით. მაგალითად, ნახ.1-ზე Y_4 კვანძისათვის B_4 მარშრუტი შეიცავს მონაკვეთებს V_{01}, V_{13} და V_{14} .

ავლნიშნოთ V_{ij} მონაკვეთის შესაბამისი გზის სიგრძე L_{ij} -ით, ხოლო ქსელის B_i მონაკვეთის სიგრძე, რომელიც შეიცავს ყველა მარშრუტებს Y_i კვანძიდან საკვანძო სადგურამდე L_i -ით:

$$L_i = \sum_{Y_{ij} \in B_i} L_{ij}.$$

მაგალითად, ნახ.9-თვის გვექნება:

$$L_4 = L_{43} + L_{31} + L_{10}, \quad L_3 = L_{31} + L_{10}, \quad L_2 = L_{21} + L_{10} \text{ და ა.შ.}$$



ნახ.9. სატელეფონო კვანძებიდან SSP-კენ შესაძლო მარშრუტები.

ინტელექტუალურ მომსახურებაზე B_i მარშრუტით მოთხოვნის გავლის ალბათობა არის i -ური სატელეფონო კვანძიდან მოთხოვნათა ინტენსიობის პროპორციული:

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda}$$

გზის საშუალო სიგრძე $L_{ს.შ.}$ რომლის გავლასაც საჭიროებს მოთხოვნის შემოსვლის შესახებ ინფორმაციის სიგნალი, სატელეფონო კვანძიდან SSP-მდე, განისაზღვრება თანაფარდობით:

$$L_{ს.შ.} = \sum_{i=1}^K P_i \cdot L_i$$

ასეთივე მსჯელობით განისაზღვრება იმ სატელეფონო კვანძების საშუალო რიცხვი, რომელთა გავლაც მოუხდება B_i მარშრუტით მოთხოვნის შესახებ ინფორმაციის სიგნალს:

$$K_{\text{საშ.}} = \sum_{i=1}^K P_i \cdot K_i,$$

სადაც K_i არის B_i მარშრუტის კუთვნილი სატელეფონო კვანძების რიცხვი. თუ ჩავთვლით, რომ ქსელში ხაზის უბანზე სიგნალის გავრცელების დრო შეადგენს $V_{\text{სიგნ.}}$, მაშინ ქსელის ხაზებში სიგნალის გავრცელების დროის შესაბამისად, სიგნალის დაყოვნების საშუალო მნიშვნელობა იქნება:

$$\tau_L = \frac{L_{\text{საშ.}}}{V_{\text{საშ.}}}.$$

როდესაც სატელეფონო კვანძი მიიღებს მომხმარებლის მოთხოვნას და ეს მოთხოვნა გაივლის ყველა ტრანზიტულ კვანძს, ცხადია ყველგან მოხდება დროში დაყოვნებები. თუ ჩავთვლით, რომ ყოველ კვანძში დაყოვნებების მნიშვნელობები ერთნაირია და ავლნიშნავთ მას $\tau_{\text{დაყოვნ.}}$, შეტყობინების ჯამური დაყოვნება, მარშრუტის შესაბამისად ყველა კვანძების გავლის შემდეგ, იქნება:

$$\tau_K = K_{\text{სიგნ.}} \cdot \tau_{\text{დაყოვნ.}}$$

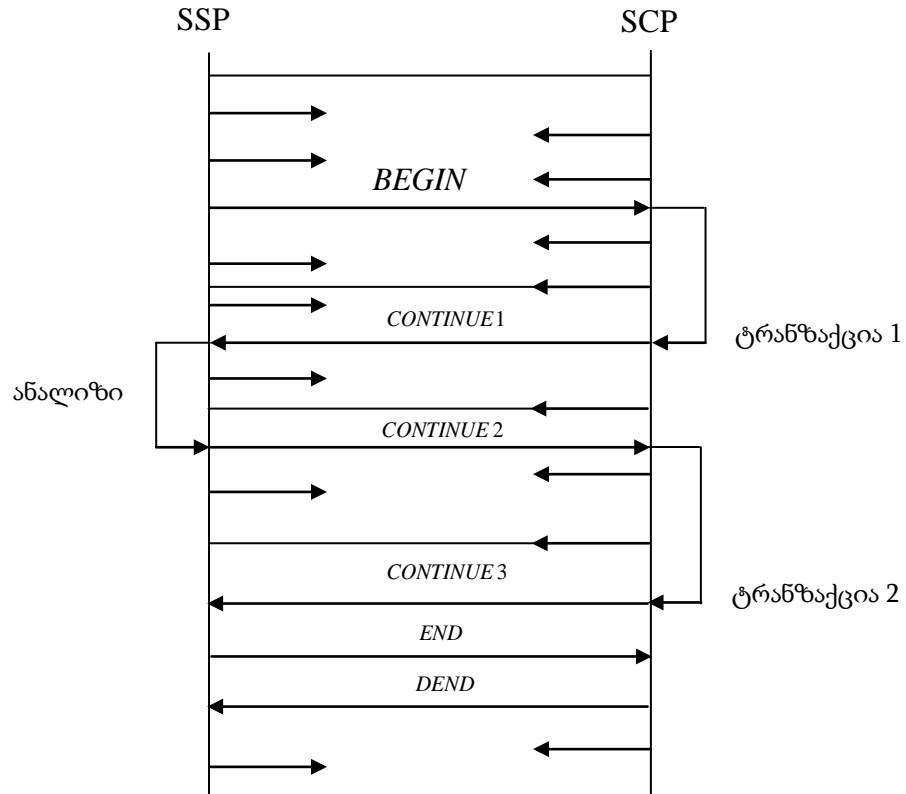
ამრიგად, დროში დაყოვნებების თვალსაზრისით, განშტოებული ქსელი შეიძლება პირობითად ჩანაცვლდეს ექვივალენტური განუშტოებელი უბნით, რომელიც ხასიათდება ხაზებში სიგნალის გავრცელების იგივე დაყოვნებით და ქსელის კვანძებში შეტყობინების იმავე, საშუალო ჯამური დაყოვნებით.

4.9. SSP-SCP მონაკვეთზე დაყოვნების წარმოქმნის ანალიზი

SSP-სა და SCP შორის ურთიერთქმედება იწყება, SSP-ს შემცველ კვანძში მომსახურების სახეობის შესახებ კოდისა და სახეობის ნომრის შემოსვლისთანავე. SSP გააანალიზებს მიღებულ ინფორმაციას, წამოიწყებს მომსახურების სახეობაზე მოთხოვნას IDP (Initial Detection Point - შემჩნევის საწყისი წერტილი) შეტყობინების სახით და გადასცემს მას INAP (Intelligent

Network Application Protocol - ინტელექტუალური ქსელის გამოყენებითი პროტოკოლი) პროტოკოლის მეშვეობით, №7 სიგნალიზაციის სისტემის არხით, როგორც BEGIN ბრძანება სატელეფონო კვანძიდან.

SSP-ში მიღებული შეტყობინება გაანალიზდება, დამუშავდება კომპიუტერებით და შედეგად, SSP ღებულობს პასუხს SCP-დან, რომელიც შეიცავს ინფორმაციას თუ როგორ შესრულდეს მომსახურება. საზოგადოდ, ასეთი დიალოგი შეიძლება შედგებოდეს რამოდენიმე ტრანზაქციისაგან (ქმედებებისაგან), ანუ კითხვა-პასუხების რამოდენიმე ციკლისაგან, რამაც უნდა უზრუნველყოს მოთხოვნილი მომსახურება. ნახ.10-ზე წარმოდგენილია ორი ტრანზაქციის შემცველი დიალოგი. ნახაზიდან ჩანს, რომ №7 სიგნალიზაციის არხი მოქმედებს დუპლექსურ რეჟიმში. მოკლე ისრებით მონიშნულია ის შეტყობინებები, რომლებიც არსებობს არხში სხვა მოთხოვნების მომსახურებისათვის და მათ კავშირი არა აქვთ განხილულ ტრანზაქციასთან. ისინი შეიძლება წარმოადგენდნენ სხვა ტრანზაქციების შეტყობინებებს, ან ფუნქციონირებისათვის აუცილებელ სასიგნალო ერთეულებს, ან სიგნალიზაციის არხის სინქრონიზაციისათვის საჭირო ცარიელ სასიგნალო ერთეულებს.



ნახ.10. №7 სიგნალიზაციის ქსელით განხორციელებული დიალოგი SSP-სა და SCP-ს შორის.

BEGIN შეტყობინების მიღების შემდეგ, რომელიც შეესაბამება ინტელექტუალური მომსახურების წამოწყებას, SCP გადაამუშავებს ამ მოთხოვნას, ამის შემდგომ SSP-საკენ გადასცემს შეტყობინებას CONTINUE და სხვა, იმ აუცილებელ ინფორმაციას, რომელიც საჭიროა მოთხოვნილი მომსახურების სახეობის კომპუტაციისა და მომსახურებისათვის. ამ ინფორმაციის მიღების შემდეგ SSP გადასცემს SCP-ს END შეტყობინებას, ინფორმაციის მიმოცვლის დასრულების თაობაზე, ხოლო SCP შეტყობინებით DEND ადასტურებს, რომ ინფორმაციის მიმოცვლა არ შეიცავს შეცდომებს და ინფორმაციის მიმოცვლა დასრულებულია.

SSP-SCP მონაკვეთზე დროში დაყოვნებები დაკავშირებულია ორივე მიმართულებით გადაცემების განხორციელების ხანგრძლიობებთან და SCP-ს

პროცესორში მოთხოვნის დამუშავებისათვის საჭირო დროსთან. ამიტომ, SCP-ს გამოთვლითი სისტემა შექმნილია მრავალპროცესორიანი სახით.

შეტყობინება მოთხოვნილი მომსახურების სახეობაზე, რომელიც SSP-ს მიეწოდება ქსელიდან, №7 სიგნალიზაციის ქსელში გადაცემამდე, გაანალიზდება SSP-ს გამოთვლით სისტემაში. გაანალიზებულმა შეტყობინებებმა შესაძლოა შექმნან რიგი, №7 სიგნალიზაციის არხის განთავისუფლების მოლოდინში SCP-საკენ. №7 სიგნალიზაციის არხით SSP-დან SCP-საკენ შეტყობინების გადაცემის შემდეგ, მათ შეიძლება ისევ შექმნან რიგი SCP-ს პროცესორების განთავისუფლებამდე, სადაც უნდა მოხდეს მათი დამუშავება. მომსახურების სახეობაზე მოთხოვნის დამუშავების შედეგის გადაცემამ SCP-დან SSP-ში შეიძლება კვლავ შექმნან რიგი №7 სიგნალიზაციის არხის განთავისუფლების მოლოდინში.

რადგან ეს შეტყობინებები ჩნდებიან დროის შემთხვევით მომენტებში, მათი დამუშავებისა და გადაცემის პროცესები განიხილება, როგორც ტელეტრაფიკის (მასობრივი მომსახურების) პროცესები, ხოლო SSP და SCP გამოთვლითი სისტემები და №7 სიგნალიზაციის არხი - როგორც ტელეტრაფიკის (მასობრივი მომსახურების) სისტემა.

SSP-ში, ყოველი ტრანზაქციის შედეგად შემოსული ინფორმაცია გაანალიზდება SSP-ს პროცესორში t_{SSP} - საშუალო დროის ხანგრძლიობის შუალედში. ისევე, როგორც SCP შემთხვევაში, დროს ეს შუალედი შეიცავს არა მარტო ანალიზისათვის საჭირო დროის ხანგრძლიობას, არამედ SSP-ს რიგში ლოდინის დროსაც.

SCP-საგან განსხვავებით, SSP-ს რიგში დაყოვნება მცირედად არის დამოკიდებული ინტელექტუალურ მოთხოვნებზე λ ინტენსიობისაგან, ვინაიდან ეს დაყოვნებები განისაზღვრება სატელეფონო კვადის ტრაფიკით, რომელზეც გათვლილია SSP-ს ფუნქციონირება.

საერთო დასკვნები

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული კვლევებისა და მიღებული შედეგების სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

1. ქსელის რესურსების შეუზღუდავი რაოდენობისა და ტრაფიკის ურთიერთდამოუკიდებელი წყაროების შემთხვევაში ფრაქტალურობა (თვით მსგავსება) წარმოიქმნება ცალკეული, აქტიურ/პასიური (ON/OFF) წყაროების სიმრავლეთა გაერთიანების შედეგად. წყაროს აქტიური და პასიური პერიოდების განაწილება ხასიათდება მძიმე წაგრძელებებით და აქვს უსასრულო დისპერსია. აქტიურ/პასიური წყაროების სიმრავლის ზედდება ავლენს უსასრულო დისპერსიის მიდრეკილებას და ქსელში ჩამოყალიბებული გაერთიანებული ტრაფიკი არის თვითმსგავსი, რომლის სახეც მიისწრაფის ბროუნის მოძრაობის ტიპის ფრაქტალურობისაკენ. აქ ძირითადია აქტიურ/პასიური წყაროების მოქმედების მაღალცვალებადი ქცევა, ისევე როგორც მომხმარებელ/სერვერი არქიტექტურის შემთხვევაში. ასეთ მსჯელობას გააჩნია მნიშვნელოვანი ცდომილებების წყაროები, მაგალითად, ქსელის რესურსების შეუზღუდავი რაოდენობა იწვევს ინფორმაციის წყაროებს შორის მკვეთრად გამოხატულ ურთიერთდამოკიდებულებას. ასევე, მართვის მექანიზმებიც, როგორებიცაა დაგეგმარების ალგორითმი (Operating System), გადაცემის მართვის პროტოკოლი (Transmission Control Protocol), Ethernet, ქსელის გადატვირთულობის შემთხვევაში იძლევიან მიმდინარე პროცესების დამატებით დამახინჯებებს.

2. ქსელის ტრაფიკის თვითმსგავსზე დაყვანის სირთულის ძირითადი მიზეზია ის, რომ არ არსებობს მკაფიოდ გამოკვეთილი, თვითმსგავსების გამომწვევი მიზეზობრივი ფაქტორები. ქსელის თვითმსგავს ტრაფიკში არსებული სხვადასხვა კორელაციები, შეიძლება წარმოიქმნან განსხვავებული მიზეზებით და მახასიათებლებში გამოვლიდნენ კონკრეტულ დროით

მასშტაბებში. ეს შეიძლება იყოს ინფორმაციისა და ძეხვის სტრუქტურა (მაგალითად მეხსიერების ელემენტი და მასში არსებული პროგრამები), მომხმარებლის მხრიდან „მოფიქრების დროის ხანგრძლივობა“ და ფაილების გადაცემის უპირატესობები, საშუალოდ ბუფერების ეფექტი (ქეშირება), გადაცემის მართვის პროტოკოლი (TCP), Ethernet და ATM-მექანიზმების მართვა (მიერთების მართვა, გადატვირთულობების მართვა და სხვა).

3. სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული შედეგების საფუძველზე დადგენილია, რომ ქსელის ტრაფიკში ხანგრძლივი დამოკიდებულების წარმოქმნის ძირითადი ფაქტორებია:

- მომხმარებლის ქცევა;
- მონაცემთა გენერაცია, სტრუქტურა და მოძიება;
- ტრაფიკის გაერთიანება;
- ქსელის მართვის საშუალებები;
- უკუკავშირზე დაფუძნებული მართვის მექანიზმები;
- ქსელის განვითარება.

4. მასობრივი მომსახურების სისტემების ანალიზისათვის გავრცელებულია განაწილების ორი ალბათური მახასიათებლის გამოყენება - მეზობელ მოთხოვნებს შორის დროის ინტერვალების განაწილება და მოთხოვნათა მომსახურების ხანგრძლივობათა განაწილება. ნაკადების კლასიკური თეორიის გამოყენებას ზღუდავს ის, რომ არსებული თეორია პასუხობს წმინდად შემთხვევითი ნაკადების პროცესებს, სადაც მოთხოვნათა შორის ინტერვალები განაწილებულია ექსპონენციალურად და არაკორელირებულია. მაშინ, როდესაც მოთხოვნებს შორის ინტერვალები ურთიერთკორელირებულია, მოთხოვნათა ნაკადების არსებული თეორიის გამოყენება იძლევა მნიშვნელოვან ცდომილებებს, მაშინაც კი, როდესაც ექსპონენციალური განაწილება არსებობს. სადისერტაციო ნაშრომში შემოთავაზებულია ტრაფიკის რიგების საშუალო სიდიდეების გამოთვლის

მეთოდი, ტრაფიკის ტრასებზე კორელაციისა და დისპერსიის ექსპერიმენტულად განსაზღვრის საფუძველზე.

5. როდესაც, გადაცემის მაღალი სიჩქარეების გამო იზრდება არხების ფართოზოლოვნება, ქსელის რესურსების რაოდენობა და შესაბამისად მცირდება დაყოვნებები, რიგები, პაკეტების ნაკადის სტატისტიკურ მახასიათებლებზე და სტრუქტურაზე მათი გავლენა, ტელეტრაფიკის თეორიის არსებული მათემატიკური ბაზა, სამართლიანი იქნება თანამედროვე მულტისერვისული ქსელების პროექტირების ამოცანებისათვის, შესაძლო პრობლემების წყაროებისა და მიზეზების შესწავლის საფუძველზე.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Корнышкв Ю.Н., Фань Г.Л. Теория распределения информации, Москва, «Радио и связь», 1985 г. стр.17-20.
2. მარდალეიშვილი ზ., გელხვიძე პ., კოპლატაძე მ. მოთხოვნათა ნაკადების თვისებები და მახასიათებლები მულტისერვისულ ქსელში. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის „მდგრადი ენერგეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“ მოხსენებათა კრებული. ქუთაისი, 18 ივნისი, 2015. გვ. 137-141.
3. Crovella M.E. and Bestavros A. Explaining World Wide Web Traffic Self-Similarity, Technical Report: TR-95-015, Computer Science Department, Boston University, 1995.
4. Crovella M.E. and Bestavros A. Self-Similarity in world Wide Web Traffic: evidence and possible causes. In Proceedings of the 1996 ACM SIGMET-RICS. International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems, May 1996.
5. Iagerman D.L. and Melamed B. “ The Transition and Autocorrelation structure of TES Processes Part I: General Theory” , Stochastic Models 8:2(1992), 193-219.
6. Шелухин О.И., Тенякщев А.М., Осин А.В., Фрактальные процессы в телекоммуникациях. Монография. Москва.: Радиотехника, 2003.
7. Erramilli A., Narayan O. and Willinger W. Experimental queueing analysis with long-range dependent packet traffic. IEEE/ACM Transactions on Networking, 4:209-233, 1996.
8. Iena A.K., Pruthi P. and Popescu A. Modeling and Evaluation of Network Applications and Services, Proceedings of the RVK 99 Conference, Ronned, Sweden, June 1999.
9. Park K., Kim G.T. and Crovella M.E. On the Relationship Between File Sizes, Transport Protocols, and Self-Similar Network Traffic, preprint, Boston University, 1996.
10. Erramilli A., Willinger W. and Wang I.L. Modeling and Management of Self-Similar Traffic Flows in High-Speed Networks, Network Systems Design, Gordon and Breach Science Publishers, 1999.
11. Li G.L. and Dowd W.D. An Analysis of Network Performance Degradation Induced by Work-load Fluctuations, IEEE/ACM Transactions in Networking, Vol. 3, No. 4, August 1995.
12. Feldman A., Gilbert A.C., Williger W. and Kurtz T.G. The changing Nature of Network Traffic: Scaling Phenomena, Computer communications Review, Vol.28, №2, April 1998.

13. Gusella R. Characterizing the variability of arrival processes with indices of dispersion. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 9(2): 968-981, 1991.
14. Турко С.А., Фомин Л.А., Будко П.А., Гахова Н.Н., Ватага А.И. Об оптимальном использовании сглаживающего влияния буфкров на параметры трафика Ш-ЦСИС. // Электросвязь, №10, 2002, стр.26-29.
15. Клейнрок Л. Принципы и уроки пакетной связи // ТИИЭР. 1978. т.66ю - №11. – стр.30-42.
16. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями, изд. «Мир», 1979 г. стр.32.
17. Лихтциндер Б.Я. Корреляционные связи в пачечных потоках систем массового обслуживания. Телекоммуникации, №9, 2015 г. стр, 8-12.
18. Лихтциндер Б.Я. Интегральный метод анализа трафика мультисервисных сетей. //Приложение к журналу «Инфокоммуникационные технологии», 2008, вып.86 стр, 104-152.
19. მარდალეიშვილი ზ., გელხვიძე პ., კოპლატაძე მ., კუპატაძე თ. ტრაფიკის ახალი სახეობები და სატელეკომუნიკაციო ქსელში მომსახურების ხარისხისადმი მოთხოვნების ევოლუცია. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. ქუთაისი, 24.10-25.10 2015, მოხსენებათა კრებული, გვ. 138-141.
20. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Аль-Наггар Я.М. Сети связи с малыми задержками //Электросвязь. Ежемесячный научно-технический журнал, 2013, №12, с.15-19.
21. Recommendation Y.1541. Network Performance Objectives for IP-based services, 2006.
22. Recommendation G.1011. Reference Guide to Quality of Experience Assessment Methodologies. ITU-T, Geneva. may 2013.
23. Гольдштейн Б.С., Гольшко А.В. Виртуальный завет. // Вестник связи, №5, 2015, стр. 22-28.
24. კოპლატაძე მ., გელხვიძე პ., მარდალეიშვილი ზ., მულტისერვისული ქსელის საარხო რესურსის განსაზღვრის საკითხისათვის, მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის მოხსენებითი კრებული, ქუთაისი, 25-26 მაისი, 2013
25. Степанов С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей. Москва: ЭКОТRENД3, 2010-388 გვ.
26. Савостицкий Ю.А. Простые формулы для оценки требуемого числа каналов и вероятности потери вызова. // Электросвязь. Ежемесячный научно-технический журнал, 2001. №8, გვ.16-17.
27. Крамер Г. Математические методы статистики. Москва: Мир, 1975-314 გვ.
28. Arsenishvili G.L. On queueing systems with variable intensities (Martingale approach), Stochastics, v.15, 2, (149-157), 1985.

29. Коплатадзе М.Р., Купатадзе Т.Г. Вероятностный анализ некоторых специфических моделей массового обслуживания. *Georgian Engineering News*, 3, 2003.
30. Г.Л.Арсенишвили. Однострочная система очередей с интенсивностью ввода, зависящей от длины очереди. *Бюл. Академии Наук ГССР*, 76, 2, 1974.
31. Девис Д.У. Контроль перегрузки в сетях с коммутацией пакетов. *Материалы 2-го Симп. АСМ-IEEE. Optimiz. Data Commun: Syst.Palo Alto, CA, Oct.,1971.*
32. К.Н.Ф. Meyer. *Wartesysteme mit variabler Bearbeitungstrate*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New-York, 1971.
33. К.Н.Ф. Meyer. *Wartesysteme mit variabler Bearbeitungstrate*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New-York, 1971.
34. Palm, C. Intensitatsschwankungen im fersprechverkehr. *Ericson technics*, 44, 1943.
35. Potter, R.M. Explicit formulae for alt overflow traffic moments of the Kosten and brockmeyer systems with renewal input. *Austral.Telecomm.Res.*13,(39-49), 1980.
36. Duffy D.E., Mcintosh A.A., Rosenstein M. and Willinger W. Statistical analysis of CCSN/SS7 traffic data from working CCS subnetworks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 12:544-551,1994
37. Klivansky S., Mukherjee A. and Song C Factors contributing to self-similarity over nsfnets Preprint, Georgia Institute of Technology, 1994
38. Kurtz T.G. Limit theorems for workload input models. This volume, 1996
39. Leland W.E., Taqqu M.S., Willinger W. and' Wilson D.V. On the self- Ethernet traffic (Extended version). *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2:1-15, 1994
40. Park K., Kim G. and Crovella M. On the cause and effect of self-similar network traffic. Boston University preprint, 1996
41. Paxon V. and Floyd S. Wide-area traffic: The failure of poisson modeling. In *Proceedings of the ACM Sigcomm '94*, pages 257-268, London, UK, 1994
42. Willinger W. Traffic modeling for high-speed networks: theory versus practice. In F. P. Kelly and R. J. Williams, editors, *Stochastic Networks*, volume 71, pages 395-409. Springer Verlag, 1995. IMA Volume in Mathematics and its Applications
43. Willinger W., Taqqu M.S., Leland W.E. and Wilson V. Self-similarity in high-speed packet traffic: analysis and modeling of Ethernet traffic measurements. *Statistical Science*, 10:67-85,1995
44. Willinger W., Taqqu M.S., Shennan R. and Wilson D.V. Self-similarity through high- variability: statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level (Extended Version). Preprint. The paper also contains the mathematical proof that the superposition of strictly alternating ON/OFF sources converges to fractional Brownian motion, 1995
45. Addie R.G. and Zuckerman M. A Gaussian traffic model for a B-ISDN statistical multiplexer. In *Proceedings of the IEEE Globecom '92*, 1992
46. Duffield N.G., Lewis J.T., O'Connell N., Russell R. and Toomey F. Entropy of ATM traffic streams: a tool for estimating QoS parameters. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13:981-990,1995

47. Elwalid A., Heyman DP., Lakshman T.V., Mitra D. and Weiss A. Fundamental bounds and approximations for ATM multiplexers with applications to video teleconferencing. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13:1004-1016, 1995
48. Fendick K.W., Saksena V.R. and Whitt W. Dependence in packet queues. *IEEE Transactions on Communications*, 37:1173-1183, 1989
49. Fendick K.W., Saksena V.R. and Whitt W. Investigating dependence in packet queues with the index of dispersion for work. *IEEE Transactions on Communications*, 39:1231- 1244,1991
50. Hwang C.L. and Li S. Q. On input state space reduction and buffer noneffective region. In *Proceedings of IEEE Infocom '94*, pages 1018-1028, 1994
51. Konstantopoulos T. and Anantharam V. Optimal flow control schemes that regulate the burstiness of traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3:423-432, 1995
52. Li S.Q., Chong S. and Hwang C.L. Link capacity allocation and network control by filtered input rate in high-speed networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3:10-25, 1995
53. Li S.Q. and Hwang C.L. Queue response to input correlation functions continuous spectral analysis. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1:678-692, 1993.
54. Livny M., Melamed B. and Tsiolis A.K. The impact of autocorrelation on queueing systems. *Management Science*, 39:322-339, 1993
55. Ramaswami V. and Willinger W. Efficient traffic performance strategies for packet multiplexers. *Computer Networks and ISDN Systems*, 20:401-407, 1990
56. Sriram K. and Whitt W. Characterizing superposition arrival processes in packet multiplexers for voice and data. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 4:833-846, 1989
57. Tse D.N.C., Gallager R.G. and Tsitsiklis J.N. Statistical multiplexing of i Markov streams. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13
58. Duffield N.G. Exponential bounds for queues with markovian arrivals. Preprint, 1993
59. Glynn P.W. and Whitt W. Logarithmic asymptotics for steady-state tail probabilities in a single-server queue. *Journal of Applied Probability*, 31:131-156, 1994
60. Hurvich C.M., Deo R. and Brodsky J. The mean squared error of Geweke and Porter-Hudak's estimator of the memory parameter of a long memory time series. Preprint, 1995
61. Latouche G. and Ramaswami V. A logarithmic reduction algorithm for qu processes. *Journal of Applied Probability*, 30:650-674, 1993
62. Neuts M.F. *Structured Stochastic Matrices of M/G/I Type and Their Applications*. Marcel Dekker, New York, 1989

63. Weiss A. An introduction to large deviations for communication networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13:938-952, 1995
64. Cheng C.S. and Thomas J.A. Effective bandwidth in high-speed digital-networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13:1091-1100, 1995
65. Choudhury G.L., Lucantoni D.M. and Whitt W. On the effectiveness of effective bandwidth for admission control in ATM networks. In J. La-betoulle and J.W. Roberts (eds), *Fundamental Role of Teletraffic in The Evolution of Telecommunications* (Proceedings of ITC-14, Antibes Juan-les-Pins, France, June 1994), pages 411-414, 1994. Elsevier
66. de Veciana G., Kesidis G. and Walrand J. Resource management in wide-area ATM networks using effective bandwidths. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13:1081-1090, 1995
67. Elwalid A.I. and Mitra D. Effective bandwidth of general Markovian traffic sources and admission control of high-speed networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1(3):329-343, 1993
68. Gibbens R.J. The statistical analysis of broadband traffic. This volume, 1996
69. Gibbens R.J. and Hunt P.J. Effective bandwidths for the multi-type GTS channel. *Queueing System* 9:17-28, 1991
70. Guerin R., Admadi H. and Naghshineh M. Equivalent capacity and its application to bandwidth allocation in high-speed networks. *IEEE Journal on Selected Area Communication*, 9:968-981, 1991
71. Kelly F.P. Effective bandwidths at multi-class queues. *Queueing Systems*, 9:5-15, 1991
72. Kelly F.P. Notes on effective bandwidths. This volume, 1996
73. Kesidis G., Walrand J. and Chang C.S. Effective bandwidths for multi-class Markov fluids and other ATM sources. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1:424-428, 1993
74. Whitt W. Tail probabilities with statistical multiplexing and effective bandwidths in multiclass queues. *Telecommunication Systems*, 2:71-107, 1993
75. Adas A. and Mukherjee A. On resource management and QoS guarantees for long-range dependent traffic. Preprint, 1994
76. Addie R., Zuckerman M. and Neame T. Fractal traffic: Measurements modelling and performance. Preprint, 1994
77. Duffield N.G. Economies of scale in queues with sources having power-law large deviation scalings. Preprint, Dublin Institute of Advanced Studies, Dublin, Ireland, DLAS-APG-94-27, 1994
78. Duffield N.G. and O'Connell N. Large deviation and overflow probabilities for the general single-server queue, with applications. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 118:363-375, 1995
79. Erramilli A., Gordon J. and Willinger W. Applications of fractals in engineering for realistic traffic processes. In J. Labetoulle and J.W. Roberts, editors, *The Fundamental Role of Teletraffic in The Evolution of Telecommunications*

- Networks (Proceedings of ITC-14, Antibes Juan-les-Pins, France, June 1994), pages 35-44, Amsterdam, 1994. Elsevier
80. Erramilli A., Gosby D.D. and Willinger W. Engineering for realistic traffic: A fractal analysis of burstiness. In Proceedings of the Bangalore Regional ITC Seminar, Bangalore, India, 1993
 81. Erramilli A, Narayan O. and Willinger W. Experimental queueing analysis with long-range dependent packet traffic. IEEE/ACM Transactions on Networking, 4:209-223,1996
 82. Erramilli A. and Wang J. Monitoring packet traffic levels. In Proceedings of the IEEE Globe.com '94, pages 274-280, San Francisco, CA, 1994
 83. Erramilli A. and Willinger W. Fractal properties in packet traffic measurements. In Proceedings of the St Petersburg Regional ITC Seminar, St Petersburg, Russia, pages 144-158,1993
 84. Fowler I.J. and Leland W.E. Local area network traffic characteristics with implications for broadband network congestion management. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 9:139-149, 1991
 85. Garrett M.W. and Willinger W. Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic. In Proceedings of the ACM Sigcomm '94, London, UK, pages 269-280, 1994
 86. Heyde C.C. Some results on inference for stationary processes and queueing systems. In U. N.Bhatt and I. V. Basawa, editors, Queueing and Related Models, pages 337-345, Oxford, UK, 1992, Oxford University Press (Clarendon Press)
 87. Huang C., Devetsikiotis M., Lambadaris I. and Kaye A.R. Modeling and simulation of self-similar variable bit rate compressed video: A unified approach. Computer Communications Review, 25:114-125,1995. Proceedings of the ACM/SIGCOMM'95, Cambridge, MA, August 1995
 88. Noitso I. A storage model with self-similar input. Queueing Systems And Their Applications 16:387-396. 1994.
 89. Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 13:953-962, 1995
 90. Norros I., Simonian A., Veitch D. and Virtamo J. A Benes formula for the fractional Brownian storage. Technical Report TD(95)004v2, COST 242, 1995
 91. Parulekar M. and Makowski A.M. Buffer overflow probabilities for a multiplexer with selfsimilar traffic. Preprint, University of Maryland, College Park, MD, 1995
 92. Paxson V. and Floyd S. Wide area traffic: The failure of poisson modeling. IEEE/ACM Transactions on Networking, 3:226-244, 1995
 93. Resnick S.I. and Samorodnitsky G. Performance decay in a single server exponential queueing model with long range dependence. Operations Research, 1995

94. Abate J., Choudhury G.L. and Whitt W. Calculation of the GI/G/1 waiting time distribution and its cumulants from pollaczek's formulas. *Archiv fur Elektronik und Ubertra-nuimstechnik*, 47:311-321, 1993
95. Abate J., Choudhury G.L. and Whitt W. Waiting-time tail probabilities in queues with long- tail service-time distributions. *Queueing Systems*. 16:311-338, 1994
96. Choudhury G.L. and Whitt W. Long-tail buffer-content distributions in broad Preprint, 1995
97. Cohen J.W. Some results on regular variation for distributions in queueing and fluctuation theory. *Journal of Applied Probability*, 10:343-353, 1973
98. elenkovic P.R. and Lazar A. A. Subexponential asymptotics of a network multiplexer. Preprint, CTR, Columbia University, New York, 1995
99. Pakes A.G. On the tails of waiting-time distributions. *Journal of Applied Probability*, 12:555-564, 1975
100. Willekens E. and Teugels J.L. Asymptotic expansion for waiting time probabilities in an M/G/1 queue with long-tailed service time. *Queueing Systems*, 10:295-312, 1992
101. Anantharam V. On the sojourn time of sessions at an ATM buffer with long-range dependent input traffic. Preprint, University of California, Berkeley, 1995
102. Brichet F., Roberts J.W., Simonian A. and Veitch D. Heavy traffic analysis of a fluid queue fed by On/Off with long-range dependence. Technical Report TD(95)03v1, COST 242, 1995
103. Brichet F., Roberts J.W., Simonian A. and Veitch D. Heavy traffic analysis of a storage model with long-range dependent On/Off sources. Preprint, 1995
104. Likhanov N., Tsybakov B. and Georganas N.D. Analysis of an ATM buffer with selfsimilar ("fractal") input traffic. In *Proceedings of the IEEE Infocom '95*, pages 985-992, Boston, MA, 1995
105. Nowicka J. and Weron A. Numerical approximation of dependence structure for symmetric stable AR(2) processes. Preprint, 1995
106. Pruthi P. and Erramilli A. Heavy-tailed on/off source behavior and self-similar traflic. In *Proceedings of the ICC' '95*, pages 445-450, Seattle, WA, 1995
107. Resnick S.I Heavy tail modeling and teletraffic data. Preprint, School of ORIE, Cornell University, Ithaca, NY, 1995
108. Fama E. Mandelbrot and the stable Paretian hypothesis. *Journal of Business*, 36:420-429, 1963. Reprinted in *The Random Character of Stock Market Prices*, P. Cootner editor, MIT Press, 1964, pages 297-306
109. Fama E. and Roll R. Some properties of symmetric stable distributions. *Journal of the American Statistical Association*, 63:817-836, 1968
110. Feller W. *An Introduction to Probability Theory and its Applications*, volume 2. Wiley, New York, 2nd edition, 1971

111. Zolotarev V.M. Odnomernye ustoychivye raspredeleniya. Nauka, Moscow, 1983. Subsequently translated as "One-dimensional Stable Distributions", American Mathematical Society, 1986
112. Fama E. The behavior of stock market prices. *Journal of Business*, 38:34-105, 1965
113. Mandelbrot B.B. The Pareto-Levy law and the distribution of income. *Economic Review*, 1:79-106, 1960
114. Mandelbrot B.B. The variation of certain speculative prices. *Journal of Business* 1963. Reprinted in *The Random Character of Stock Market Prices*, Princeton Press, 1964, pages 307-332
115. McCulloch D.H. Financial applications of stable distributions. In G. S. Maddala and C. R. Rao, editors. *Statistical Methods in Finance*. Volume 14 of *Handbook of Statistics*. Elsevier Science. 1996
116. Mittnik S. and Rachev S.T. Stable distributions for asset returns. *Applied Financial Economics*, 2:301-304, 1989
117. Mittnik S. and Rachev S.T. Alternative multivariate stable distributions and their application to financial modeling. In S. Cambanis, G. Samorodnitsky, and M. S. Taqqu, *Stochastic Processes and Related Topics*, volume 25 of *Progress in Probability*, Birkhäuser, Boston, 1991
118. Mittnik S. and Rachev S.T. Modeling asset returns with alternative stable distributions. *Econometric Review*, 12:261-330, 1993
119. Rachev S.T. and Samorodnitsky G. Option pricing formulae for speculative prices modeled by subordinated stochastic processes. *Stochastics*, 19:175-190, 1993
120. Samorodnitsky G. A class of shot noise models for financial applications. Preprint, 1995
121. Cambanis S. and Soltani A.R. Prediction of stable processes: spectral and moving average representation. *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und verwandte Gebiete*, 66:593-612, 1984
122. Casdagli M. Chaos and deterministic versus stochastic non-linear modeling. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 54:303-328, 1991
123. Cioczek-Georges R and Taqqu M.S. Does asymptotic linearity of the regression extend to stable domains of attraction? *Journal of Multivariate Analysis*, 48:70-86, 1994
124. Cioczek-Georges R and Taqqu M.S. How do conditional moments of stable vectors depend on the spectral measure? *Stochastic Processes and their Applications*, 54:95-111, 1994
125. Cioczek-Georges R. and Taqqu M.S. Sufficient conditions for the existence of conditional moments of stable random variables. Preprint, 1994
126. Cioczek-Georges R. and Taqqu M.S. Form of the conditional variance for symmetric stable random variables. *Statistica Sinica*, 5:351-361, 1995

127. Cioczek-Georges R and Taqqu M.S. Necessary conditions for the existence of conditional moments of stable random variables. *Stochastic Processes and their Applications*, 56:233-246, 1995
128. Fotopoulos S B. and Cambanis S. Conditional variance for stable random vectors. Technical Report 426, Center for Stochastic Processes at the University of North Carolina, Chapel Hill. 1994
129. Fotopoulos S.B. and Form L He. of the conditional variance-covariance matrix for α -stable scale mixtures of normal distributions. Preprint, 1995
130. Samorodnitsky G. and Taqqu M.S. *Stable Non-Gaussian Processes: Stochastic Models with Infinite Variance*. Chapman and Hall, New York, London, 1994