Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет навчально-науковий центр заочної форми навчання
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Моделі і методи аналізу імовірнісних характеристик розподілених систем

(тема)

Виконав:
студент II курсу, групи КСМзм-20–1
Мазепа К.М.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність
123 – Комп’ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо–професійна або освітньо–наукова)

Освітня програма
Комп’ютерні системи та мережі
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Іванісенко І.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ _____ Коваленко А.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2021 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра електронних обчислювальних машин

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо–професійна або освітньо–наукова)

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(Підпис)
"____"_____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Мазепі Кирилу Миколайовичу
(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделі і методи аналізу імовірнісних характеристик розподілених систем.

затверджена наказом по університету від " 25 " жовтня 2021 р. № 169 Стз

2. Термін подання студентом роботи 10 грудня 2021 р.

3. Вхідні дані до роботи
Загальна структура обчислювальних систем, VBR структура досліджуваний трафіку, концепція створення мереж нового покоління (NGN), мережевий симулятор NS2, методи імітаційного моделювання систем масового обслуговування, структура інфокомунікаційних мереж спеціального призначення (МСП), самоподібні моделі мережевого трафіку, диференційоване обслуговування з WRED алгоритмом управління чергою.
.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
Вступ.
Аналіз літератури та особливості побудови мереж спеціального призначення.
Дослідження статистичних властивостей трафіка МСП.
Аналіз функціонування вузлу мсп в умовах неточного знання параметрів трафіка.
Дослідження характеристик вузлів мультисервісної мережі.
Висновки. Додаток.
.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

Презентація Powerpoint 15 слайдів.

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначку консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п./ п.	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою роботи	25.10.21–30.10.21	
2	Постановка мети та задач	31.10.21–02.11.21	
3	Концептуальні положення побудови МСП	03.11.21–12.11.21	
4	Дослідження властивостей трафіка МСП	13.11.21–18.11.21	
5	Аналіз функціонування вузлу МСП	19.11.21–24.11.21	
6	Експериментальна частина	25.11.21–29.11.21	
7	Розрахункова частина	30.11.21–02.12.21	
8	Підготовка пояснювальної записки	03.12.21–06.12.21	
9	Розробка презентації та доповіді	07.12.21–09.12.21	
10	Подача роботи у ЕК	10.12.21	

Дата видачі завдання 25.10. 2021 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Іванісенко І.М.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 110 с., 41 рисунків, 6 таблиць, 24 джерела.

ФРАКТАЛИ, САМОПОДІБНИЙ ТРАФІК, ПОКАЗНИК ХЕРСТА, МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ, NS2, СМО, КОМП’ЮТЕРНА МЕРЕЖА, СТАТИСТИЧНІ ВЛАСТИВОСТВІ ТРАФІКА

Мета кваліфікаційної роботи полягає у дослідженні імовірнісно-часових характеристик вузлів мереж спеціального призначення при обробці самоподібного трафіку.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проаналізовано існуючі моделі мережного трафіку та методи його обробки, заснованих на класичній теорії масового обслуговування, а також проаналізовані методи математичного моделювання трафіку з використанням самоподібних випадкових процесів.

Розроблено модель самоподібного трафіку на основі процесів відновлення, що враховують кореляційні характеристики часових інтервалів трафіку, та виконано аналіз параметрів систем масового обслуговування загального виду при обробці самоподібного трафіку шляхом імітаційного моделювання.

ABSTRACT

Master’s thesis: 110 pages, 41 figures, 6 tables, 24 sources.

FRACTALS, SELF-SIMILARY TRAFFIC, HERST INDEX, SPECIAL PURPOSE NETWORKS, NS2, QUEUING SYSTEMS, COMPUTER NETWORK, STATISTICAL PROPERTIES OF TRAFFIC

The goal of qualifying work is to study the probabilistic-temporal characteristics of nodes of special purpose networks in the processing of self-similar traffic.

During the qualifying work the existing models of network traffic and methods of its processing based on the classical theory of queuing were analyzed, as well as the methods of mathematical modeling of traffic using self-similar random processes were analyzed.

A model of self-similar traffic based on recovery processes that take into account the correlation characteristics of time intervals of traffic was developed, and the analysis of parameters of general-purpose queuing systems in the processing of self-similar traffic by simulation was performed.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ATM – асинхронний спосіб передачі даних (англ., Asynchronous Transfer Mode)

BGP – протокол граничного шлюзу (англ., Border Gateway Protocol)

BL – базовий рівень (англ., Base Layer)

CBR – постійний бітрейт (англ., Constant Bit Rate)

CBS – фіксований розмір буфера (англ., Committed Bust Size)

CIR – фіксована інформаційна швидкість (англ., Committed Information Rate)

CR-LDP – протокол розподілу міток маршрутизації, заснований на обмеженнях (англ., Constraint-based Routing Label Distribution Protocol)

DHCP – протокол динамічного налаштування вузла (англ., Dynamic Host Configuration Protocol)

FIFO – «першим прийшов – першим пішов» (обслуговування в порядку надходження) (англ., First In, First Out)

FR – ретрансляція кадрів (англ., Frame Relay)

GII – глобальна інформаційна інфраструктура (англ., Global Information Infrastructure)

IL – інфраструктурний рівень (англ., Infrastructure Layer)

IPSec– захист даних, що передаються через IP (англ., IP Security)

MPLS – багатопротокольна комутація за мітками (англ., Multiprotocol Label Switching)

MWL – проміжний рівень (англ., MidWay Layer)

NGN – мережі наступного покоління (англ., Next Generation Networks)

OSPF – протокол динамічної маршрутизації по найкоротшому шляху (англ., Open Shortest Path First)

QoS – якість обслуговування (англ., Quality of Service)

ВСТУП

Домінантним підходом розвитку сучасних мереж зв’язку є підхід, заснований на концепції створення мереж нового покоління (NGN), що базуються на мультисервісних мережах. Цілком очевидно, що телекомунікаційні системи крім завдання встановлення і підтримки комунікацій у соціумі, а також між різними державними та недержавними структурами, покликані вирішувати завдання управління, підтримуючи функціонування різних інформаційних систем. При цьому конвергенція сучасних інформаційних та телекомунікаційних технологій призводить до створення інфокомунікаційних мереж спеціального призначення.

Управління мережами спеціального призначення (МСП) з метою забезпечення високої якості надання послуг (QoS) вимагає розробки адекватних математичних моделей функціонування мережі. Ці моделі повинні бути динамічними і описувати основні процеси генерації повідомлень, що несуть певну інформацію від різноманітних джерел, процеси розподілу повідомлень (інформації) і процеси перенесення інформації між джерелом і одержувачами інформації. При цьому будь-які сучасні послуги, такі як передача голосу VoIP, широкосмуговий доступ в Інтернет, відео за запитом, телебачення, що реалізується технологією IPTV, конференцзв’язок та ін., формують так званий термінальний потік, що надходить на відповідний вузол МСП. Сукупність таких потоків утворює мережевий інформаційний потік, який завдяки впливу різних випадкових факторів має яскраво виражений стохастичний характер і може бути адекватно описаний методами теорії масового обслуговування. Такий потік, званий трафіком, обробляється (обслуговується) у вузлі МСП також випадковим чином, бо параметри трафіку та параметри стани вузла можуть бути відомі, як правило, на рівні завдання законів розподілу випадкових значень цих параметрів.

Проведені експерименти щодо аналізу структури потоків (трафіку) ін-

фо-комунікаційних систем нового покоління виявили, що досліджуваний трафік має чітку структуру типу VBR (variable bit rate), що призводить до високої пачечності. Пачечність, як відомо, породжується кореляційними зв’язками тимчасових характеристик трафіку. У свою чергу явно виражені кореляційні властивості трафіку змушують як його математичні моделі використовувати випадкові процеси, що володіють властивостями фракталів. У вітчизняній літературі дуже мало робіт, у яких аналіз мережевих вузлів МСП здійснюється з урахуванням фрактальних властивостей трафіку. У цій кваліфікаційній роботі робиться спроба заповнити цю прогалину, тому дослідження, проведені в ній, можна вважати дуже актуальними.

Інфокомунікаційні мережі зв’язку у складі галузі зв’язку та масових комунікацій являють собою багатовузлову систему, зі складною структурою та складом трафіку, що передається, а також системою управління та моніторингу. До таких мереж відносяться мережі передачі даних, широкосмугові бездротові мережі, відомчі мережі (зокрема мережі спеціального призначення (МСП). Усі перелічені інфокомунікаційні мережі зв’язку виконують функції обробки, зберігання, транспортування різних видів трафіку із застосуванням єдиної транспортної інфраструктури .

Еволюція мереж передачі голосових повідомлень і даних поступово призвела до розробки різних проектів модернізації МСП, спрямованих на обмін трафіком Triple Play, з можливістю конвергенції традиційних мереж зв’язку з сучасними мережами передачі даних, що використовують як транспортні технології Ethernet, SDH, ATM або бездротові технології передачі даних IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.16 (WiMAX).

Конвергенція трафіку і технологій його транспортування при використанні в мережах зв’язку дозволяє надавати користувачам широкий спектр послуг і додатків, дає можливість їх масштабування, створюючи згодом необхідні умови для побудови інфокомунікаційної основи МСП.

Особливістю будь-яких сучасних мереж зв’язку, у тому числі МСП є зростання і різнорідність інформації, що передається. Як показано в дослі-

дженнях [2,12,14] основними видами сучасного трафіку є мультимедійні програми - відеотрафік IPTV, трафік мережі internet, відео-і аудіоконференції, IP-телефонія, відео за запитом та інше.

Збільшення обсягів і типів переданої інформації обумовлює трансформацію диференційованих за типом переданого трафіку МСП в єдині інфокомунікаційні мережі, які надають широкий спектр інформаційних і телекомунікаційних послуг, що реалізуються за допомогою програмно-апаратних комплексів, що об’єднують у собі всілякі дроти комунікації та бездротові мережі.

При цьому значущою особливістю МСП є вимоги до показників надійності та живучості, що визначають вибір структури мережі, а саме: надмірність засобів резервування обладнання та каналів зв’язку. Зокрема структурна схема мережі повинна дозволяти приймати оперативні рішення щодо управління ресурсами під час навантажень та відмови.

Архітектура МСП базується на стандартній багаторівневій структурі, що включає мережу доступу, транспортну мережу, вузли управління послугами, вузли інформаційних та телекомунікаційних служб. Функціонування або-ентської та транспортної мереж передбачає реалізацію прозорої передачі інформації між робочими місцями без будь-якої обробки її змісту. Основними елементами МСП є: інформаційні пристрої (сервери, міжмережеві екрани), комунікаційна частина (обладнання комутації), трафік (транспортований контент), спецкористувачі (робочі місця).

У наші дні приділяється велика увага проблемі побудови мережі спеціального призначення, в якій складність полягає у виборі адекватної математичні моделі. Сучасний етап розвитку галузі інфокомунікацій має різні підходи до моделювання та проектування таких мереж. Існує трирівнева мережева модель [3], яка містить інфраструктурний, проміжний та базовий рівні, що становлять сукупність рівневих мереж.

В цілому, проведений аналіз ступеня розробленості теми дослідження демонструє перспективність та необхідність проведення статистичного аналі-

зу трафіку мереж спеціального призначення, а також виконання аналітичних розрахунків вузлів МСП та імітаційного моделювання мереж. У цьому випадку пріоритет можна віддати імітаційному моделюванню в комп'ютерних програмах-симуляторах, як швидшому способу вирішення питання без застосування реального обладнання. Аналіз існуючих досягнень в досліджуваній області показує скудність матеріалів, пов'язаних з дослідженням трафіка МСП , що робить даний напрямок більш перспективним у плані побудови методик формування впливів з управління трафіком і моніторингу об'єкта дослідження.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

1.1 Концептуальні положення побудови та розвитку мереж спеціального призначення

В останні роки в різних корпораціях і відомствах спеціального призначення, де широко використовуються процеси інформатизації для забезпечення роботи їх департаментів і підрозділів, вводять різні інформаційні та інформаційно-довідкові системи, що реалізують різні інформаційні технології. У зв’язку зі швидким зростанням інформатизації, корпоративні (або відомчі) інформаційні та інформаційно-довідкові системи стали трансформуватися в єдині інфокомунікаційні мережі спеціального призначення (МСП). Такі мережі надають широкий спектр інформаційних та телекомунікаційних послуг, що реалізуються за допомогою програмно-апаратних комплексів, що включають різні телекомунікаційні мережі. Таким чином забезпечується надання всім користувачам повного пакету послуг: обмін інформацією, її передача та доставка, обробка, зберігання та накопичення.

Існують різні мережі спеціального призначення, які відрізняються одна від одної потребами в ресурсах, розмахом, структурою, можливостями, реальною пропускною здатністю, безпекою та стійкістю.

З розвитком корпоративних мереж передачі мови та даних, у різні роки були створені проекти зі створення сучасних телекомунікаційних мереж, спрямованих на обмін даними та мовленням, що інтегрують різні мережі передачі даних, документального обміну, телефонні та телеграфні мережі та призначені для об’єднання існуючих мереж на основі технологій ISDN, FR, IP та MPLS поверх SDH або ATM.

Поєднання цих технологій при використанні в мережах зв’язку дозволяє надавати користувачам широкий спектр послуг, дає можливість нарощу-

вати послуги та розширювати підтримувані мережеві технології, створюючи таким чином необхідні умови для побудови телекомунікаційної основи мереж спеціального призначення.

Однак, в даний час при побудові МСП на основі концепцій мереж зв'язку наступного покоління (NGN) і глобальної інформаційної інфраструктури (GII), залежно від особливостей їх застосування, від вимог щодо забезпечення безпеки, такі мережі значно відрізняються від загального виду перспективної мережі зв'язку загального користування.

Під мережами спеціального призначення розумітимемо комплекс інфокомунікаційних систем, що надають широкий набір інформаційних та телекомунікаційних послуг з гнучким управлінням, створення та персоналізацію нових послуг за допомогою стандартизації інформаційних та мережевих рішень, що використовують універсальну транспортну мережу з розподіленою комутацією, надання інформаційних та телекомунікаційних систем послуг у віконні мережні вузли та об'єднання з традиційними та існуючими мережами зв'язку [4].

Зазвичай у концепції побудови та еволюції будь-якої великої мережі електрозв'язку викладені рішення щодо формально ідентичних положень [8]:

- призначення (основні функціональні завдання);
- структура (на всіх рівнях ієрархії);
- рекомендований комплекс технічних засобів (що передбачає вибір технологій передачі, комутації та обробки інформації);
- перелік послуг, що підтримуються;
- показники якості обслуговування трафіку;
- принципи сигналізації, синхронізації, тарифікації та технічної експлуатації;
- основні напрями еволюції на тривалу перспективу.

Жорсткі вимоги до показників надійності і живучості МСП визначають вибір структури мережі. Наприклад, на рівні транзитного фрагмента МСП між вузлами комутації можна створювати кілька (не менше двох) неза-

лежних шляхів обміну інформацією. При цьому на рівні доступу, де часто використовується деревоподібна топологія, такий підхід навряд чи реалізуємо. Структура МСП повинна забезпечувати функцію мобільності абонентів, що може бути реалізовано на основі системи супутникового зв'язку. Крім того, структура мережі повинна бути орієнтована на оперативне розв'язання задач управління ресурсами при перевантаженнях і відмови.

Мережа спеціального призначення, як і будь-яка мережа зв'язку, у технічному відношенні повинна базуватися на певній сукупності апаратно-програмних засобів та лінійних споруд, що існують на даний момент у розпорядженні проектувальників. З урахуванням оголошеної концепції імпортозаміщення очевидно, що для побудови МСП повинні використовуватися виключно вітчизняні технічні засоби, хоча галузь зв'язку навряд чи на даному етапі може реалізувати цю концепцію повністю. Вимога забезпечення максимально можливої (у межі - абсолютної) інформаційної безпеки може змусити розробників при проектуванні МСП використовувати «старі» технології передачі інформації.

1.2 Технології для побудови мереж спеціального призначення

1.2.1 Технології VPN та MPLS

VPN (Virtual Private Network) - це технологія побудови приватної мережі, що забезпечує захищений зв'язок логічної мережі поверх приватної або публічної при використанні високошвидкісного Інтернету [5].

Технологія VPN будується на «віртуальному» з'єднанні, що маршрутизується через Інтернет з приватної мережі організації до віддаленого вузла або співробітника. Така організація технології передбачає встановлення з'єднання з особливим сервером на базі мережі загального доступу за допомогою спеціальних програм. При цьому в існуючому з'єднанні з'являється закритий від сторонніх канал обміну інформацією, створений за рахунок сучасних ал-

горитмів шифрування.

VPN – це з’єднання за схемою «крапка-крапка» всередині незахищеної мережі або поверх неї, яке організується за допомогою захищеного тунелю для обміну інформацією між користувачами та сервером.

Використовуючи метод тунелювання пакети даних передаються через загальнодоступну мережу як по звичайному двоточковому з’єднанню. Між кожною парою «відправник-одержувач даних» встановлюється певний тунель – безпечне логічне з’єднання, що дозволяє інкапсулювати дані одного протоколу пакети іншого (рисунок 1.1)

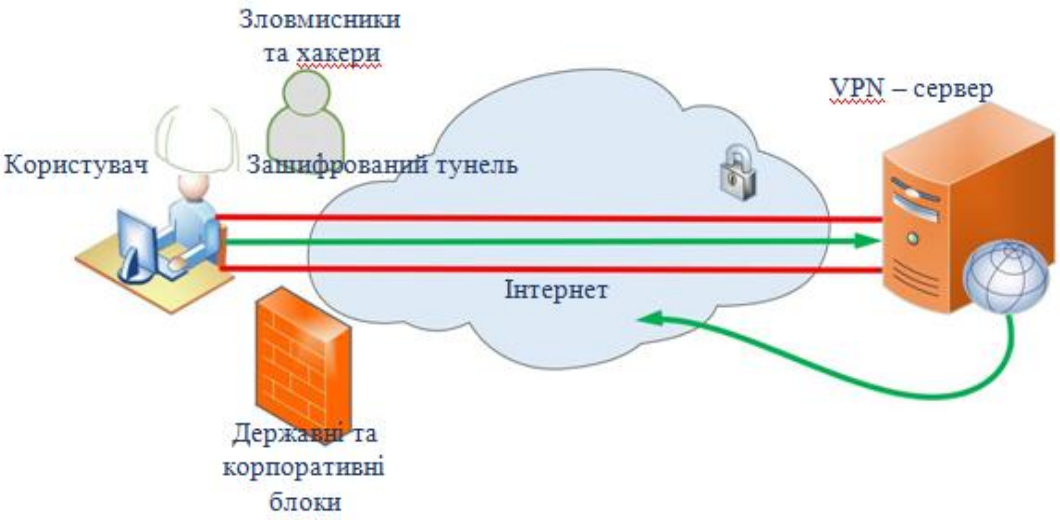

Рисунок 1.1 – Організація VPN мережі

Існує кілька видів VPN, які характеризуються на основі застосовуваних протоколів:

- PPTP – тунельний протокол формату «точка-точка», за допомогою якого захищений канал накладається поверх звичайної мережі. З’єднання встановлюється за допомогою двох мережевих сесій: дані передаються через PPP за протоколом GRE, з’єднання ініціалізується та керується через порт TCP. Таке з’єднання важко налагодити у мобільних мережах. На даний момент VPN-мережа, що використовує такий вид протоколу, є найменш надій-

ною. Тому використовувати таку організацію VPN для мереж, де інформація має бути надійно захищена, не рекомендується.

- L2TP – тунелювання 2-го рівня. Ця технологія є поліпшеним варіантом, розробленим на основі протоколу PPTP і L2F. Такий тип тунелювання здійснюється за допомогою алгоритму шифрування IPSec, а також при об'єднанні основного та керуючого каналів у єдину сесію UDP. Застосування такої технології є набагато безпечнішим.

- SSTP – безпечне тунелювання сокетів на базі SSL. За підсумками цього протоколу створюються надійні зв'язку через HTTPS. Для працездатності протокола потрібно відкритий 443 порт, що дозволяє налагоджувати зв'язок з будь-якої точки, навіть виходить за межі проксі [7].

VPN технологія представляє такі можливості:

- використовуючи VPN, реальний IP користувач змінюється на підставний, наприклад, що знаходиться за кордоном, і при використанні VPN цей користувач у мережі практично невидимий. Так, при заході на сайт або при передачі даних, видно, що IP-адреса, наприклад, не з Росії, а з Фінляндії. Тому такому користувачеві не страшні жодні блокування сайтів та обміну даними.

- VPN використовує зашифроване з'єднання, при цьому ні провайдер, ні системний адміністратор мережі не дізнається, з ким з'єднувався користувач. Наприклад, якщо виходити в мережу без VPN, то вся історія серфінгу по сайтах, на які заходить користувач, буде видно системному адміністратору і (або) провайдеру. При використанні VPN видно тільки те, що користувач дійсно підключений через VPN, а більше нічого не відомо. При цьому хакери при перехопленні даних не зможуть розпізнати їх через шифрування [9].

Застосовуючи разом шифрування трафіку і заміну IP користувач стає повністю анонімним, а дані конфіденційними.

Технологія MPLS. Технологія MPLS (Multiprotocol Label Switching) являє собою механізм передачі даних, який включає різні властивості мереж з комутацією каналів поверх мереж з комутацією пакетів. Принцип технології

полягає у спробі прискорити пересування IP-пакетів, зберігаючи гнучкість IP мереж. З використанням MPLS з'являється більше можливостей надання додаткових послуг [6].

MPLS може керувати трафіком на канальному рівні, а на мережному рівні має властивості масштабованості та гнучкості протоколів, і тому MPLS зазвичай називають протоколом канально-мережевого рівня. Він був створений для багатофункціональної передачі даних користувачами мереж з комутацією каналів і мереж з комутацією пакетів.

Використання MPLS дає такі можливості:

- об'єднання ATM та Frame Relay с IP;
- побудова віртуальних приватних мереж (VPN);
- прискорене транспортування пакетів усередині мережі за найкоротшими стандартними маршрутами;
- вибір та пошук шляхів з урахуванням даних, що передаються (Traffic Engineering).

В основі роботи технології MPLS лежить передача трафіку по мережі з користуванням інформації, що міститься в мітках, які приєднуються до IP пакетів. При передачі застосовуються технологи другого рівня, які характеризуються передачею фреймів, при цьому мітки розташовуються між заголовками другого і третього рівня. А якщо використовувати такі технології, як ATM, засновані на передачі осередків, тоді позначки будуть знаходитися в полях ідентифікатора віртуального маршруту VPI та ідентифікатора віртуального каналу VCI.

Використання таких позначок дозволяє маршрутизаторам та комутаторам, що підтримують технологію MPLS, вибрати наступний крок у маршруті пакета без виконання процедури пошуку адреси.

Технологія MPLS застосовна до будь-якого протоколу мережного рівня, тобто. MPLS є інкапсулюючим протоколом, за допомогою якого можна транспортувати інформацію безлічі протоколів нижчих рівнів моделі OSI (рис. 1.2).

З рисунку 1.2 слід, що площина пересилання даних MPLS представлена у вигляді неповного рівня, що розташовується в мережі IP, ATM або Frame Relay між другим і третім рівнями моделі OSI, але при цьому не підпорядковується цим рівням. Таким чином, при організації MPLS одночасно на мережному рівні та на рівні ланки даних створюється додатковий рівень, який можна назвати рівень 2.5, на якому відбувається комутація за мітками [19].

Технологія Metro Ethernet. Metro Ethernet – функціональна мережа величезних розмірів. Ця технологія заснована на базі 1-10 гігабіт Ethernet і на мережевій архітектурі, що надає швидке зростання сервісів, що вимагають великої смуги пропускання, таких як відео по IP і мультимедійні програми.

Рисунок 1.2 – Площини MPLS

На даний час існують різні постачальники технології Metro Ethernet, що пропонують широкий спектр послуг. Тисячі абонентів користуються послугами Ethernet, і їхня кількість з кожним днем зростає. Цих абонентів залуча-

ють переваги послуг Ethernet, у тому числі:

- простота використання;
- мінімальні витрати;
- гнучкість.

При розробці мереж Metro Ethernet в основі побудови лежить багаторівнева архітектура, що характеризується такими властивостями:

- ієрархічність – уявлення мережі декількома рівнями, кожен рівень відповідає за конкретні функції;
- модульність - рівні будуються на основі модулів, кожен модуль - це повноцінна функціональна одиниця, що виконує функції відповідного рівня.

Можна виділити такі рівні архітектури мережі Metro Ethernet:

- ядро мережі - центральна частина, відповідає за високошвидкісну комутацію трафіку;
- рівень агрегації - відповідає за сполучну функцію та функцію агрегації трафіку абонентів;
- рівень доступу – це функції підключення абонентів до мережі провайдера [7].

Мережі Metro Ethernet, що реалізуються у вигляді багаторівневої архітектури, забезпечують високу надійність функціонування, масштабованість і високу продуктивність.

Провайдери Metro Ethernet надають численні послуги для своїх клієнтів. Ця технологія пропонує великі можливості для впровадження нових послуг при появі «свіжих» сервісів, надає можливість швидко вводити їх у використання.

Корпоративні клієнти даної технології можуть отримати ряд послуг, таких як: високошвидкісний доступ в інтернет, відеоспостереження, відеоконференції, послуги IP-телефонії, віртуальні приватні мережі, віддалене навчання та ін.

Так як клієнтами можуть бути державні та приватні організації, для них головним фактором у виборі технології мережі є забезпечення безпеки та

конфіденційності мережі. Тому при будівництві та організації мережі Metro Ethernet провайдер повинен максимально використовувати всі засоби захисту. У сучасних пристроях для цього можуть бути використані такі способи захисту:

- всілякі списки доступу;
- використання стандарту 802.1x для автентифікації користувачів;
- використання функції Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) snooping, яка дозволяє запобігти несанкціонованому доступу до мережі стороннього DHCP сервера;
- застосування численних способів для запобігання підробці MAC-адрес;
- використання різних комплексів для захисту, розроблені виробниками (наприклад, розширення 802.1x компанії Cisco Systems і багато інших) [15].

1.3 Архітектура мереж спеціального призначення

Мережа спеціального призначення включає 4 елементи:

- інформаційні пристрої, що виконують функції зберігання та обробки даних, надають доступ до інформації;
- комунікаційна частина, що відповідає за транспортування інформації між віддаленими пристроями, може бути реалізована у вигляді транспортної мережі мереж доступу;
- власна інформація, представлена відеоінформацією, промовою, даними, прикладним програмним забезпеченням, за допомогою якого можна перетворювати повідомлення вихідного виду (зображення, мова, відео) в електронний вигляд, який буде доступний для інших користувачів;
- спецкористувачі - джерела та передавачі інформації [18].

Взаємодія перелічених елементів можна так, як показано на рисунку 1.3.

Платформа підтримки додатків є обчислювальні засоби, що працюють спільно з операційними системами і прикладним програмним забезпеченням, професійні процесори і кодеки.

На основі побудови архітектури мережі лежать транспортна мережа (зазвичай дворівнева), мережі доступу, вузли управління послугами, вузли інформаційних та телекомунікаційних служб.

У сучасних МСП дворівнева транспортна мережа є мультипротокольною і дає можливість перенесення різних видів інформації із застосуванням різних протоколів передачі (ATM, FR, IP-MPLS over ATM), тобто надає універсальну послугу переносу, яка реалізує прозорість пере надання інформації користувачів між мережними закінченнями (мережами доступу) без будь-якого аналізу або обробки її змісту.

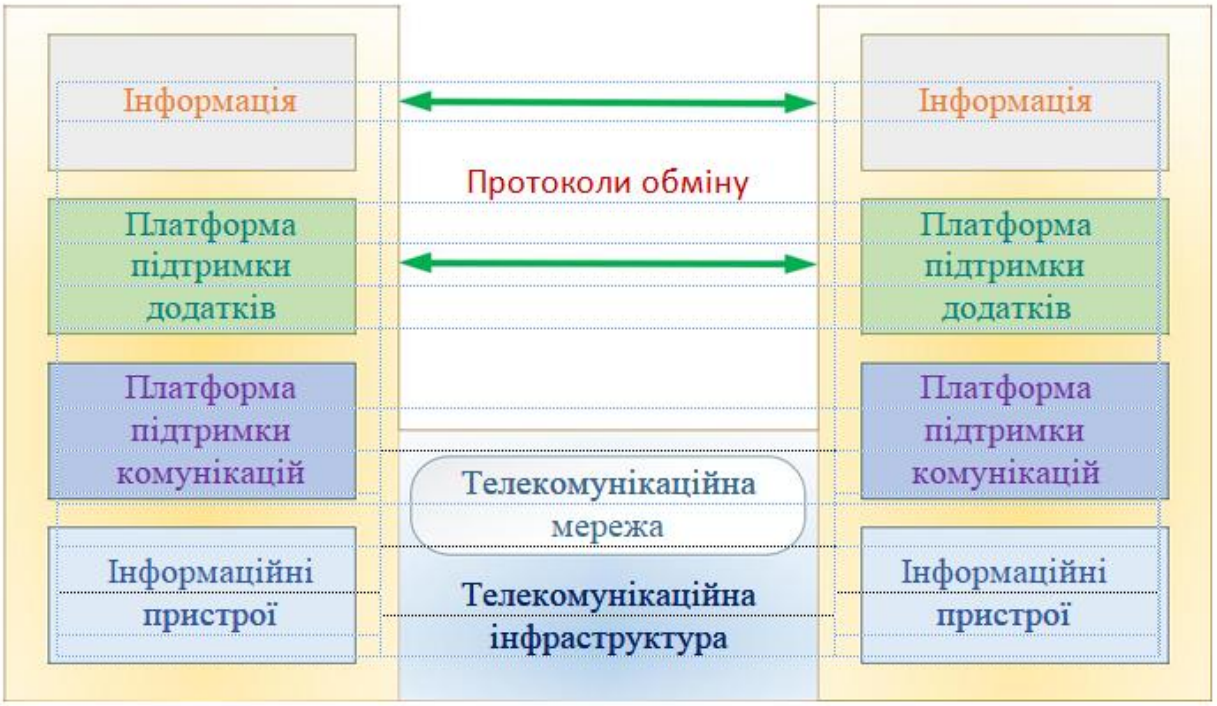

Рисунок 1.3 – Взаємодія основних елементів мережі спеціального призначення

У мережах спеціального призначення застосовується велика кількість

програмно-апаратних засобів, необхідних для надання інформаційних та телекомунікаційних послуг. Ці кошти дають можливість обмінюватися даними, промовою, відео, здійснювати надання інформаційних послуг у будь-який час і із заданою якістю. За допомогою цих засобів можна також організувати міжмережеву взаємодію з користувачами інших мереж.

У мережах спеціального призначення при запиті/активізації послуги спец-користувачем, всі послуги характеризуються транзакціями. При санкціонованому доступі спеціаліст може отримати повне право на використання цієї послуги.

Отримати доступ до послуг користувач може безпосередньо або за допомогою програм користувача. Програми повинні підтримуватися мережею, так само, як і послуги, зазвичай вони об’єднуються в пакети, щоб мати можливість надати для конкретного користувача потрібну послугу або надати доступ до програми Сучасні мережі спеціального призначення надають великий спектр послуг, що може активно трансформуватися разом із зміною доступних ресурсів. Для цього необхідно класифікувати певні компоненти послуг, але при цьому кожен компонент послуги залежить від ресурсу, що використовується для її підтримки.

Взагалом, МСП є поєднанням баз даних, засобів обробки інформації взаємодіючих мереж зв’язку і безліч терміналів користувачів. При цьому доступ до інформаційних ресурсів МСП надається послугами нового типу, що отримали назву інфокомунікаційних послуг.

Інфокомунікаційні послуги МСП від послуг традиційних мереж зв’язку технологічним побудовою. Можна перерахувати такі технологічні особливості:

- інфокомунікаційні послуги відносяться до верхніх рівнів моделі взаємодії відкритих систем (ВОС), на відміну від послуг традиційних мереж, що надаються на мережевому, транспортному, сеансовому та представницькому рівнях;

- інфокомунікаційні послуги припускають передачу мультимедійної

інформації, для якої необхідна висока швидкість передачі і несиметричність вхідного та вихідного інформаційних потоків;

- більшість інфокомунікаційних послуг передбачає наявність клієнтської частини та серверної; клієнтська частина реалізується в устаткуванні користувача, а серверна - у спеціально призначеному вузлі мережі, що називається вузлом служб;

- для інфокомунікаційних послуг властива різноманітність прикладних протоколів та можливості управління послугами з боку користувача;

- з метою надання інфокомунікаційних послуг часто необхідні складні багатоточкові зміни мережних з'єднань;

- для розпізнавання абонентів інфокомунікаційних послуг, переважно застосовується додаткова адресація у межах даної інфокомунікаційної послуги [14].

Більшість інфокомунікаційних послуг є «додатками», тобто. їх працездатність розподілена серед обладнання «постачальника» послуги та термінальним обладнанням користувача. Тому функції термінального обладнання повинні бути частиною інфокомунікаційної послуги, що слід брати до уваги при їх регламентації.

Узагальнена інформаційна архітектура перспективної інфокомунікаційної мережі спеціального призначення представлена рисунку 1.4.

У її основі лежить універсальна транспортна мережа та мережі доступу, які функціонують на транспортному рівні та рівні управління комутацією та передачею.

Транспортна мережа містить:

- транзитні вузли, необхідні для перенесення інформації та комутації;

- кінцеві вузли, які дозволяють абонентам користуватися послугами транспортної мережі;

- контролери сигналізації, за допомогою яких відбувається обробка інформації сигналізації, регулювання викликами та з'єднаннями;

- шлюзи, необхідні підключення традиційних мереж зв'язку;

- гнучкі багатопротокольні комутатори (softswitch).

Кінцеві вузли транспортної мережі спеціального призначення можуть відігравати роль службових вузлів, таким чином вузли можуть мати розширені функції, що включають надання найпростіших телекомунікаційних послуг.

Для організації кінцевих вузлів можна застосувати технологію гнучкої комутації (softswitch), що дозволяє об’єднувати різні системи сигналізації

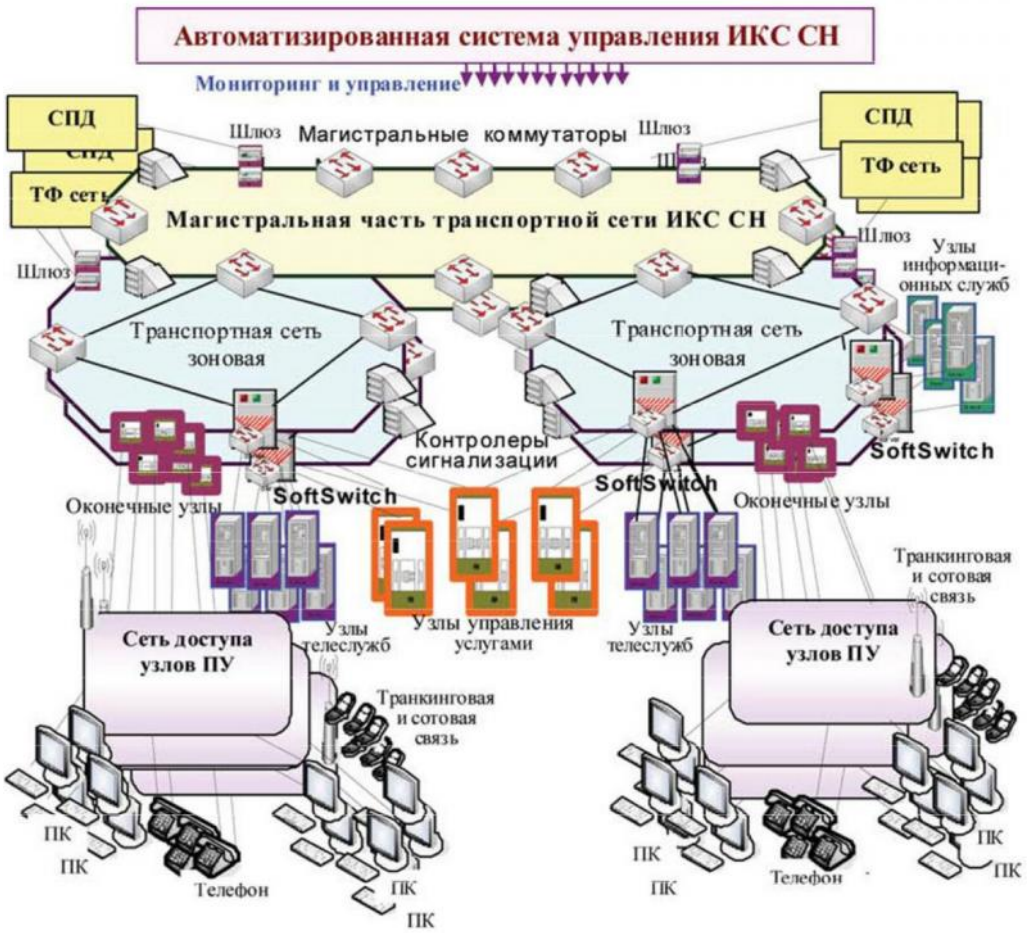

Рисунок 1.4 – Узагальнена інформаційна архітектура перспективної інфокомунікаційної мережі спеціального призначення

1.4 Модель мережі спеціального призначення

На сучасному етапі проблемі побудови МСП приділяється велика увага. Проблема полягає у виборі адекватної моделі мережі спеціального приз-

начення. На даному етапі розвитку інфокомунікацій існують різні підходи до побудови та моделювання таких мереж.

У [3] представлено трирівневу мережеву модель (рисунок 1.5). Дана модель містить інфраструктурний, проміжний і базовий рівні, які є сукупністю рівневих мереж.

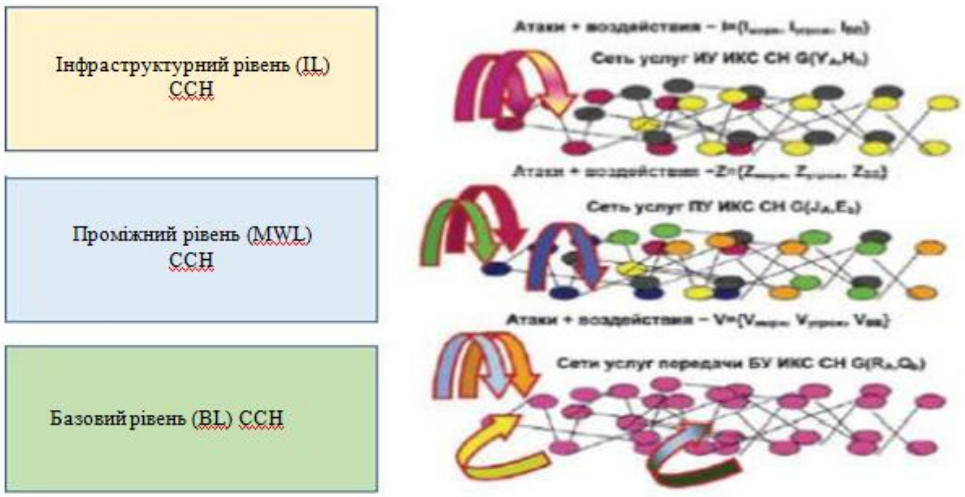

Рисунок 1.5 – Трирівнева мережева модель МСП

Базовий рівень, по суті, поєднує транспортну мережу, мережу доступу та мережі традиційного зв’язку (телефонну мережу, мережу передачі даних тощо), тому цей рівень є простою частиною мережевої моделі.

Проміжний рівень включає сервери, які відповідають за послуги безпеки, пошуку, аутентифікації. Сервера пов’язані з віртуальним каналом із певною пропускною здатністю.

За допомогою цього рівня організовується міжмережева взаємодія та поєднання компонентів послуг базового рівня, а також наявність бази для надання всього комплекту послуг.

Інфраструктурний рівень включає пакет мережевих послуг, які може забезпечити цей рівень, а також здатність швидко перебудовуватися при появі нових ресурсів і функцій [18].

Кожен рівень повинен виконувати основні завдання управління, які слід враховувати розробки математичного описи МСП як об’єкта управління. До таких завдань належать:

1) Управління продуктивністю рівня.

2) Управління безпекою.

3) Управління структурою та адресацією.

4) Управління ресурсами рівня.

5) Управління порушеннями.

До складу моделі входять компоненти (IL, MWL, BL) інфраструктурного, проміжного та базового рівня.

Інфраструктурний рівень можна надати у вигляді мереж прикладних та інформаційних послуг та описати за допомогою графа:

$$G(Y_A, H_b), \qquad (1.1)$$

де $Y_A = \{ Y_{Ai} \}$ - безліч вузлів надання послуг інфраструктурного рівня;

$H_b = \{ H_{bi} \}$ - безліч віртуальних каналів певної пропускної здатності.

У склад проміжного рівня входить комплекс мереж послуг middleware (послуги безпеки, білінгу, аутентифікації, пошуку, адресування), представлений у вигляді графа:

$$G(J_A, E_b), \qquad (1.2)$$

де $J_A = \{ J_{Ai} \}$ - безліч вузлів надання послуг проміжного рівня;

$E_b = \{ E_{bi} \}$ - безліч віртуальних каналів певної пропускної здатності.

Базовий рівень є сукупністю транспортної мережі, мереж доступу, об’єктів та абонентських мереж, можна представити у вигляді графа:

$$G(R_A, Q_b), \qquad (1.3)$$

де $R_A = \{ R_{Ai} \}$ - безліч вузлів надання послуг базового рівня;

$Q_b = \{ Q_{bi} \}$ - безліч віртуальних каналів певної пропускної здатності.

Формалізована структура МСП як об'єкта управління представлена на рисунку 1.6. До мережі надходить потік запитів отримання відповідних послуг з інтенсивністю Λ_{ICN} , ці потоки є запитами на послуги інфраструктурного, проміжного та базового рівня з інтенсивностями Λ_{IL} , Λ_{MWL} , Λ_{BL}. На виході мережі отримуємо потік оброблених запитів з інтенсивністю B_{ICN} , які включає оброблені запити кожного рівня з інтенсивностями B_{IL} , B_{MWL} , B_{BL} .

Потік запитів, що надходять кожний рівень, можна як об'єднану двухполюсную віртуальну мережу (рисунок 1.7). До представленого двополюсного елементу мережі входять два рівневі вузли надання послуг (ВНП), які з'єднані між собою віртуальним каналом. Загальну кількість користувачів двополюсного елемента мережі можна визначити таким чином:

$$N = N_1 + N_2 , \qquad (1.4)$$

де N_1, N_2 - кількість користувачів, підключених відповідно до ВНП 1 та ВНП 2.

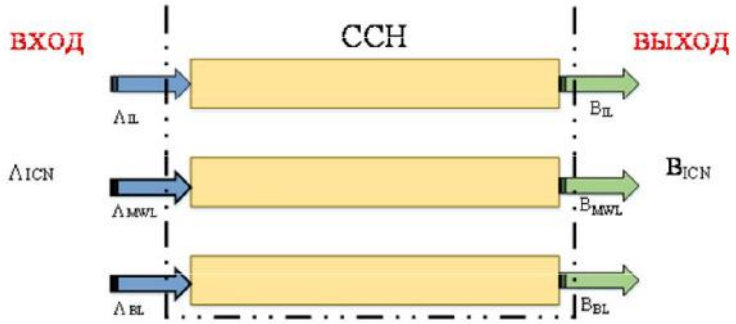

Рисунок 1.6 – Формалізована структура МСП

Рисунок 1.7 – Двополюсний елемент рівневого компонента МСП

Вважатимемо, що сумарна середня інтенсивність потоку запитів (заявок) на обслуговування протягом інтервалу часу розгляду визначається величиною λ, яка залежить від загальної кількості користувачів N. Також будемо припускати постійну середню інтенсивність обслуговування запитів.

Припустимо, що обидва ВНП «ідеальні», тобто продуктивність обслуговуючих пристроїв прагне до нескінченності, і обидва ВНП мають абсолютну стійкість, тобто коефіцієнт готовності за всіма показниками стійкості (надійність, живучість, завадостійкість, інфостійкість тощо) прагне одиниці ($k_Г \rightarrow 1$). Тоді модель двополюсного елемента МСП можна зобразити так (рисунок 1.8).

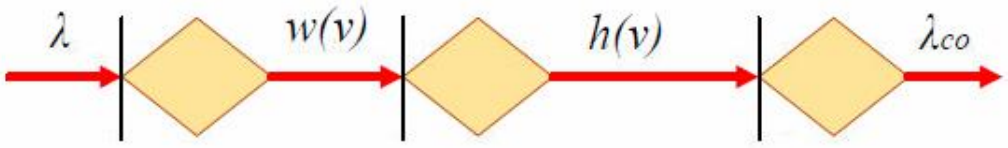

Рисунок 1.8 – Перетворена модель двополюсного елемента МСП

У реальній мережі зв’язку спеціального призначення існують та інші процеси, пов’язані з відмовими. Процеси, що відбуваються у віртуальному каналі, вважатимемо перерахованими деякі еквіваленти.

Проаналізуємо процес відновлення віртуального каналу, що вийшов з ладу.

Якщо віртуальний канал звільниться в якийсь момент часу t і за інтервал τ запити не надходять, тоді канал може вийти з ладу з ймовірністю $P(\tau) < 1$ у проміжку $(t, t+\tau)$. Припустимо, $P(\tau) = 1 - e^{-\alpha\tau}$, де α - Інтенсивність справної роботи за відсутності навантаження, та $\alpha = 1/T0$ (де T0 - середній час T0 справної роботи). Можна вважати, що $P(\tau) = C(\tau) = 1 - e^{-c\tau}$.

Час відновлення віртуального каналу є випадковим. Припустимо, що функція розподілу часу відновлення має вигляд:

$$F(\tau) = 1 - e^{-\phi\tau}, \tag{1.10}$$

Визначимо тепер перетворення Лапласа від використовуваних у цьому розгляді функцій розподілу, тобто. від розподілу часу справної роботи, розподілу часу відновлення за відсутності навантаження і розподілу часу справної роботи мережі (при інтенсивності вхідного потоку λ). З урахуванням (1.5) запишемо.

$$\gamma(\nu) = \int_0^\infty e^{-\nu\tau} dC(\tau) = \frac{c}{\nu + c}, \tag{1.11}$$

$$\theta(\nu) = \int_0^\infty e^{-\nu\tau} dD(\tau) = \frac{d}{\nu + d}, \tag{1.12}$$

$$\psi(\nu) = \int_0^\infty e^{-\nu\tau} dC_\lambda(\tau) = \frac{\lambda}{\nu + \lambda}, \tag{1.13}$$

де $C_\lambda(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}$.

Тепер, як показано в [4], з урахуванням схеми на рисунку 1.6 здійснюючи ряд перетворень, можна отримати

$$h(\nu) = \frac{\mu(\nu + d)}{(\nu + d)(\nu + \mu) + c\nu}, \tag{1.14}$$

$$w(\nu) = \frac{(1 - \lambda h(\nu))\left\{1 - \left(1 - \frac{\nu}{\lambda}\right)[1 - \psi(\nu)] - \psi(\nu)\theta(\nu)\right\}}{\left[h(\nu) - 1 + \frac{\nu}{\lambda}\right][1 - \psi(\nu) + \lambda\psi(\nu)\theta(\nu)]}. \tag{1.15}$$

Вирази (1.14) і (1.15) дозволяють з урахуванням (1.7) отримати перетворення Лапласа ймовірності своєчасного обслуговування вимог для будь-якого елемента рівневого компонента [13]:

$$Q_{L\,elem}(\nu) = \frac{\mu - \lambda}{\mu - \lambda + \nu\left(1 + \frac{\mu}{\nu + d}\right)}. \tag{1.16}$$

Використовуючи відомі результати з теорії масового обслуговування для марківських систем [12], можна отримати значення середнього часу обслуговування заявок та середнього часу очікування у черзі у вигляді [3]:

$$T_\mu = \frac{1}{\mu_э - \lambda}\left(1 + \frac{\mu_э}{d}\right), \tag{1.17}$$

$$T_w = \frac{\rho_э + \mu_э T_0}{\mu_э - \lambda}, \tag{1.18}$$

де μе- середня інтенсивність обслуговування, розрахована під час обліку процесу відновлення після «поломки» віртуального каналу. Як показано в наведеному нижче розділі, ця інтенсивність може бути отримана усереднен-

ням номінальної інтенсивності μ за розподілом $C_\lambda(\tau)$.

Для якісної роботи МСП обслуговування всіх запитів має відбуватися з деякою ймовірністю Q, яка задовольняє граничну умову Qгр < Q ≤1. При виконанні умови простої вкладеності та незалежності процесів функціонування рівнів можна записати:

$$Q_{ICN} = \left(\prod_{i=1}^{N_{IL}} Q_{IL}(i)\right)\left(\prod_{j=1}^{N_{MWL}} Q_{MWL}(j)\right)\left(\prod_{k=1}^{N_{BL}} Q_{BL}(k)\right), \quad (1.19)$$

де Q_{IL} (i), Q_{MWL} (j), Q_{BL} (k) - ймовірність своєчасного обслуговування і -х запитів інфраструктурного рівня МСП , -их запитів проміжного рівня МСП , -их запитів базового рівня МСП .

Відповідно, середній час обслуговування запитів визначиться:

$$T_{ICN} = \frac{\eta_{IL}}{N_{IL}}\sum_{i=1}^{N_{IL}} T_{IL}(i) + \frac{\eta_{MWL}}{N_{MVL}}\sum_{j=1}^{N_{MWL}} T_{MWL}(j) + \frac{\eta_{BL}}{N_{BL}}\sum_{i=1}^{N_{BL}} T_{BL}(k), \quad (1.20)$$

де частки запитів за рівнями задовольняють умові $\eta_{IL} + \eta_{MWL} + \eta_{BL} = 1$,

N_{IL} , N_{MWL} , N_{BL} - загальна кількість запитів на обслуговування для інфраструктурного рівня МСП , проміжного рівня МСП , базового рівня МСП за певний період роботи МСП .

Значення T_{IL} , T_{MWL} , T_{BL} можуть бути визначені при вибраних показових розподілах, що визначають статистику функціонування рівнів, згідно з виразом (1.17):

$$T_{IL}(i) = \frac{1}{\mu_{эIL}(i) - \lambda_{IL}(i)}\left(1 + \frac{\mu_{эIL}(i)}{d_{IL}}\right), \quad (1.21)$$

$$T_{MWL}(j)=\frac{1}{\mu_{эMWL}(j)-\lambda_{MWL}(j)}\left(1+\frac{\mu_{эMWL}(j)}{d_{MWL}}\right), \quad (1.22)$$

$$T_{BL}(k)=\frac{1}{\mu_{эBL}(k)-\lambda_{BL}(k)}\left(1+\frac{\mu_{эBL}(k)}{d_{BL}}\right), \quad (1.23)$$

де T_{IL} (i), T_{MWL} (j), T_{BL} (k) - середній час обслуговування і-го запиту інфраструктурного рівня МСП , -го запиту проміжного рівня МСП , -го запиту базового рівня МСП .

Описана модель мережі спеціального призначення дозволяє при відомих (або виміряних) розподілах випадкових параметрів, що визначають характер функціонування всіх рівнів мережі, розрахувати імовірнісно-тимчасові характеристики вузлів мережі для реалізації сталого управління мережею в реальному масштабі часу.

- Дослідження параметрів трафіку сучасних мультисервісних мереж (включаючи трафік всіх рівнів МСП) [9, 6, 8, 3, 18] показує, що припущення щодо справедливості марківських властивостей процесів надходження та обслуговування трафіку можуть реалізовуватися на практиці лише при малих навантаженнях, при малому числі користувачів і невисоких швидкостях передачі повідомлень (як правило за відсутності медіатрафіку). Причини невідповідності властивостей реального трафіку гіпотетичним марківським властивостям досить докладно описані в роботах багатьох авторів [5, 6, 7], де показано, що трафік сучасних мереж має фрактальні властивості, зумовлені в першу чергу кореляційними зв’язками параметрів трафіку і хвостами розподілів, що описують статистику тимчасових параметрів заявок на обслуговування на кожному рівні мережі. Звідси випливає, що актуальними завданнями для дослідження та моделювання роботи мереж зв’язку спеціального призначення є:

- моніторинг роботи мережі на інфраструктурному, проміжному та базовому рівні моделі МСП ,

- аналіз трафіку на кожному рівні, що враховує фрактальний характер [68, 73] трафіку,

- синтез методів розрахунку імовірнісно-часових параметрів вузлів МСП при обробці фрактального трафіку з метою побудови адекватного прогнозу значень імовірнісно-часових параметрів для вироблення керуючих впливів на режим функціонування мережі в реальному масштабі часу.

1.5 Мета й задачі роботи

Під мережами спеціального призначення розуміється комплекс інфокомунікаційних систем, що надають великий набір інформаційних та телекомунікаційних послуг з гнучким управлінням, створення та персоналізацію нових послуг за допомогою стандартизації інформаційних та мережевих рішень, що використовують універсальну транспортну мережу з розподіленою комутацією, надання інформаційних та телекомунікаційних послуг у кінцеві мережні вузли та об’єднання з традиційними та існуючими мережами зв’язку.

Головна мета роботи полягає у дослідженні імовірнісно-часових характеристик вузлів мереж спеціального призначення при обробці самоподібного трафіку.

Мета кваліфікаційної роботи досягається послідовним вирішенням наступних задач:

- аналіз існуючих моделей трафіку та методів його обробки, заснованих на класичній теорії масового обслуговування,

- аналіз методів математичного моделювання трафіку з використанням самоподібних випадкових процесів,

- розробка моделей самоподібного трафіку на основі процесів відновлення, що враховують кореляційні характеристики часових інтервалів трафіку,

- розробка методів аналізу систем масового обслуговування загального виду при обробці самоподібного трафіку,

- аналіз параметрів систем масового обслуговування загального виду при обробці самоподібного трафіку шляхом імітаційного моделювання.

Розробка модифікованих методів аналізу імовірнісно-часових характеристик вузлів МСП з урахуванням фрактального характеру процесів, що характеризують функціонування мережі, є актуальною проблемою, вирішенню якої присвячений матеріал інших розділів кваліфікаційної роботи.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАФІКА МСП

2.1 Самоподібність у системах масового обслуговування

З розвитком високошвидкісних мереж зв’язку, все більший вплив на якість обслуговування надає так звану властивість самоподібності потоків. З практичної точки зору це можна пояснити високою мінливістю інтенсивності трафіку і, як наслідок, високою пачечністю надходження пакетів у вузол мережі при високій швидкості передачі даних, що призводить через обмеженість буфера до втрат пакетів.

Тривалий час вважалося, що трафік локальної мережі описується класичним розподілом Пуасонівським. Телефонні мережі спочатку будувалися за принципом комутації каналів, а основі комп’ютерних мереж, зазвичай, лежить принцип комутації пакетів, але методики розрахунків залишилися майже тими самими. Пакети при високій швидкості руху по мережі надходять на вузол не окремо, а цілою пачкою. Трафік у таких мережах має пульсації, що підвищує ймовірність перевантажень у вузлах мережі, які ведуть до переповнення буферів та викликають втрати та/або затримки [26].

Пульсації призводять до перепадів швидкості інформаційних потоків, у яких відношення максимального значення мінімальної швидкості становить десятки раз. При цьому виявилося, що в мультисервісних мережах кількість подій на заданому інтервалі часу залежить від колишніх, дуже віддалених подій. Це означає, що з великих масштабах мультисервісної мережі трафік має властивість самоподібності, тобто. виглядає якісно однаково за будь-яких досить великих масштабів тимчасової осі.

Термін "фрактал" походить від латинського слова fractus (зламаний, розбитий), від якого походять і терміни fraction, fractional - дріб, дробовий. З математичної точки зору фрактал - це безліч із дробовою розмірністю. Фрактал за першим визначенням Мандельброта – це безліч, хаусдорфова розмір-

ність якого перевищує його топологічну розмірність. За другим визначенням фрактал це геометрична структура, частини фрагменти якої певною мірою подібнісамий структуру. Можна також сказати, що математичне поняття фракталу виділяє об’єкти, які мають структурами різних масштабів, як великих, і малих, і, в такий спосіб, відбиває ієрархічний принцип організації матерії у природі. В основі цього поняття міститься одна важлива ідеалізація дійсності: фрактальні об’єкти самоподібні, тобто їхній вид не зазнає істотних змін при розгляданні їх у мікроскоп із будь-яким збільшенням. При цьому лінія має один вимір, поверхня двовимірна, а просторова фігура тривимірна. Фрактал же – це не лінія і поверхня, а щось середнє.

Розмірність об’єкта (показник ступеня) показує, яким законом зростає його внутрішня область. Аналогічним чином із зростанням розмірів зростає ”об’єм” фракталу, та його розмірність - величина не ціла, а дробова. Тому межа фрактальної фігури не лінія: при великому збільшенні стає видно, що вона розмита вся складається зі спіралей та завитків, що повторюють у малому масштабі саму фігуру.

В умовах самоподібного трафіку, методи розрахунку комп’ютерної мережі (пропускної спроможності каналів, ємності буферів та ін.) засновані на марківських моделях та формулах Ерланга, які з успіхом використовуються при проектуванні телефонних мереж, дають невиправдано оптимістичні рішення та призводять до недооцінки навантаження [27, 28] .

З цього часу зріс інтерес до прояву фрактальних властивостей процесів телекомунікаціях. За кордоном даному напрямку присвячено велику кількість досліджень, що демонструє, що трафік для більшості видів сервісів є самоподібним. Проблемі дослідження різних типів мережного трафіку на самоподібність присвячено багато робіт. У цих роботах доводять те, що мережевий трафік є самоподібним (self-similar) або фрактальним (fractal) за своєю природою, тобто в ньому є так звані спалахи або пачки (burst) даних, що спостерігаються в різних часових інтервалах (від мілісекунд до хвилин) або навіть годинника) і кореляція між пакетами. Встановлено, що трафік даних ви-

сокошвидкісних мереж має самоподібні або фрактальні властивості. Тому розраховувати мережі з пакетною комутацією методами.

Самоподібний трафік має особливу структуру, що зберігається за багаторазового масштабування, тобто. у реалізації присутня деяка кількість викидів при відносно невеликому середньому рівні трафіку. Це погіршує характеристики під час проходження самоподібного трафіку через вузли мережі. Самоподібні моделі можуть виявляти властивість довготривалої залежності, що означає прояв залежності між подіями через великі проміжки часу.

Аналіз сучасних технологій і мереж передачі інформації показує, що необхідно розглядати вектор абонентського навантаження, що складається з декількох компонент, кожна з яких повинна відображати властивості трафіку деяких груп абонентів з однаковими інтегральними характеристиками. Так як кожна з них описує трафік принципово різного походження: наприклад, одна – голосовий трафік, друга – трафік даних, третя – відео в режимі реального часу тощо, можна вважати ці компоненти статистично незалежними [29].

У зв'язку з цим трафік X, що обслуговується, повинен розглядатися як сума декількох компонент:

$$X = \sum_{i=1}^{n} X_i = \sum_{i=1}^{n} \left(\lambda_i t + \sqrt{a_i \lambda_i} Z_t^{(i)} \right) = \left(\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \right) t + \sum_{i=1}^{n} \sqrt{a_i \lambda_i} Z_t^{(i)},$$

де X_i - деякий стандартний процес, що описує і-у компоненту трафіку, та процеси Хі статистично незалежні;

$Z_t^{(i)}$ - фрактальний броунівський рух зі значенням параметра Херста H_i.

Отже, трафік, що надходить, складається з суміші декількох процесів з різними значеннями параметра Херста і має складну природу і важко досліджувати його властивості. Тому найважливішим є з'ясувати, наскільки суттєво залежать його властивості від значень параметра Херста його компонента. Зі зростанням параметра Херста такі статистичні властивості процесу, як передбачуваність, розмах значень тощо. лише погіршуються. Точне визначення

значення параметра Херста важко у тому випадку, коли є лише одна компонента.

Самоподібний трафік має особливу структуру, що зберігається при багаторазовому масштабуванні, тобто в реалізації є певна кількість викидів при відносно невеликому середньому рівні трафіку.

Найбільш точною властивістю самоподібних процесів є те, що функція автокореляції не вироджується при $m \to 0$, на відміну від стохастичних процесів, де при $R(k, X) \to 0$ при $n \to 0$.

Дослідники відзначили однаковість розподілів вихідного та агрегованого процесів, виміряли параметр H та вияви, що для мережевого трафіку показник H знаходиться в інтервалі (0,5; 1). На якісному рівні такий трафік має високу пачечність (burstness) на багатьох масштабах тимчасової осі. Коефіцієнт пачечності - відношення пікової інтенсивності процесу надходження заявок на обслуговування до його середнього значенню.

Параметр Херста $H \in (0,5; 1)$ визначає ступінь самоподібності. При H=0,5 самоподібність відсутня. Чим ближче цей параметр до одиниці, тим яскравіше виявляються фрактальні властивості або догочасна залежність (long-range dependent, LRD) у процесі. Це означає, що якщо LRD процес має тенденцію до збільшення (або зменшення) у минулому, то з великою ймовірністю він матиме тенденцію до збільшення (або зменшення) у майбутньому.

2.2 Методи аналізу статистичних властивостей трафіку

Вирішення більшості завдань управління МСП , що забезпечують необхідний рівень якості функціонування інфокомунікаційної мережі, що надає комплекс необхідних інформаційних та телекомунікаційних послуг різним користувачам мережі в обов’язковому порядку вимагає формування досить суворого формалізованого опису самої МСП і процесів, що протікають у ній [17]. При цьому опис основних процесів, що відбуваються в мережі, що викликають зміну її станів, має бути досить суворим і враховувати динаміку

процесів.

Очевидно, основними процесами, що протікають у мережі, є процеси надходження, розподілу та перенесення інформації. Вимоги в сукупності з самою інформацією (повідомлення, дані, мова, відео-інформація, мультимедіа-інформація), що надходять від користувачів мережі на відповідні вузли МСП , утворюють термінальний потік, званий трафіком, а вся сукупність цих потоків визначає особливості мережевих інформаційних потоків в МСП , які в силу впливу цілого ряду випадкових факторів, носять явно виражений стохастичний характер.

При організації поточного управління мережі важливо вміти прогнозувати потоки керуючої інформації та, зокрема, одну із складових цих потоків – потоки інформації про стан МСП та її елементів (вузлів, трактів мережі, обладнання вузлів тощо). При цьому як математична модель трафіку та вузли мережі успішно використовуються відповідні моделі систем масового обслуговування. [10-12]. Обслуговування трафіку при цьому визначається відповідними параметрами, як правило, заздалегідь відомими хоча б приблизно в частині законів розподілу випадкових значень цих параметрів.

На рисунку 2.1 зображено фрагмент трафіку, що відображається послідовністю пакетів, що надходять на вхід деякого мережевого вузла,

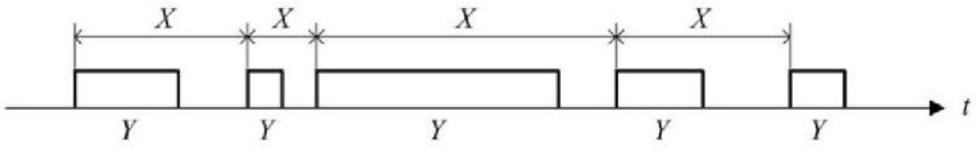

Рисунок 2.1 – Фрагмент трафіку

де X та Y – випадкові величини (з функціями розподілу W (x) та W (y)), що позначають інтервали часу між надходженнями пакетів на вхід мережного вузла, та тривалість пакета відповідно.

З позиції теорії масового обслуговування розподілу W (x) і W (y) ви-

значають характеристики вузла мережі та методи розрахунку цих характеристик, серед яких найбільш важливими є середній час затримки пакета в пристрої та ймовірність блокування пристрою. Слід зазначити, що класична теорія масового обслуговування передбачає незалежність елементів у послідовностях X і Y. [9, 12]

Природно, що найпростіший спосіб аналізу трафіку полягає в оцінці кількості пакетів, що прийшли на вхід обробного пристрою, послідовно фіксовані однакові проміжки часу. Якщо ці вимірювання відобразити в координатах «число пакетів - відліки часу», то отримана залежність буде випадковим тимчасовим рядом (рисунок 2.2), який іноді називають трасою [7].

Чим менше вибрані для аналізу трафіку проміжки часу, тим ближче тимчасовий ряд, що отримується, буде до реалізації деякої випадкової функції.

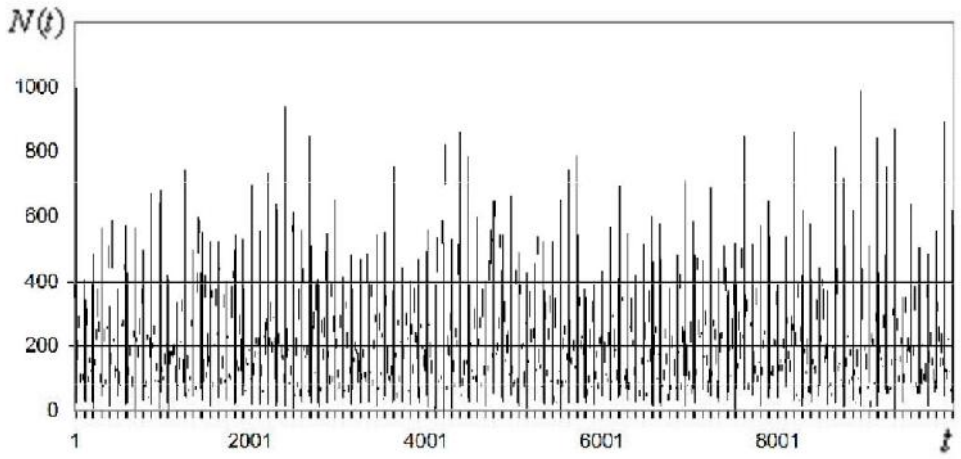

Рисунок 2.2 – Випадковий часовий ряд

З розвитком мережевих технологій характеристики трафіку ускладнювалися, і марківські моделі перестали бути адекватним описом реального трафіку, тому що стали виявлятися кореляційні зв’язки інтервалів часу між пакетами, тобто. коефіцієнти кореляції для сусідніх та поруч розташованих інтервалів часу між пакетами ставали відмінними від нуля. Аналогічні властивості стали виявлятися і інтервалів часу обробки пакетів.

Більше того, на досить великому інтервалі часу часто відзначається деяка візуальна схожість траси з періодичним процесом. Не вдаючись у фізичні причини такої поведінки трафіку (від абсолютно випадкових на вигляд реалізацій до майже періодичних), можна сказати, що найбільш адекватною математичною теорією, що описує реалізацію трафіку, є теорія фракталів [6, 7].

Термін фрактал (від латинського слова fractus – дробовий) був запропонований американським математиком Бенуа Мандельбротом у 1975 році для позначення нерегулярних самоподібних математичних структур.

Безліч називається самоподібним, якщо воно складається з декількох компонент, подібних до всієї цієї множини. Проте самоподібність – це хоч і необхідне, але не достатня властивість фракталів.

Головна особливість фракталів полягає в тому, що їх розмірність не укладається у звичні геометричні уявлення, засновані на поняттях топологічної розмірності. Фракталам характерна геометрична «вирізаність». Тому використовується спеціальне поняття фрактальної розмірності, запроваджене Хаусдорфом і Безікович [6].

Розмірність фрактальних об’єктів не є цілим числом, характерним для звичних геометричних об’єктів, і в більшості випадків фрактали нагадують об’єкти, що щільно займають реальний простір, але не використовують його повністю.

Фрактальну розмірність D зазвичай пов’язують з деяким параметром, що характеризує аналізовану реалізацію часового ряду, і званим параметром Херста (позначається як H)

$$H = 2 - D . \qquad (2.1)$$

Для гаусовських реалізацій часового низки співвідношення (2.1) точне, інших розподілів – наближене.

Розрахунок показника Херста можна зробити за формулою, запропонованою Мандельбротом [6]

$$R/S = (aN)^H. \quad (2.2)$$

Звідки

$$H = \frac{\log(R/S}{\log(aN)}, \quad (2.3)$$

де R - розмах накопиченого відхилення,

S - Середньоквадратичне відхилення низки спостережень,

N - Число інтервалів спостережень, (передбачається

a - Деяка константа, a > 0(Херст емпірично розрахував цю константу для порівняно короткострокових тимчасових рядів природних явищ у вигляді ≈ 0,5).

$$S = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Y_i - \overline{Y})^2}\,. \quad (2.4)$$

Тут Y - середнє арифметичне ряду спостережень за N періодів,

$$\overline{Y} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} Y_i\,. \quad (2.5)$$

Розмах накопиченого відхилення є найважливішим елементом показника Херста. Він обчислюється так

$$R = \max_{1\le k\le N}(\Delta Y_k) - \min_{1\le k\le N}(\Delta Y_k), \quad (2.6)$$

де ΔY_k - накопичене відхилення ряду Y від середнього значення

$$\Delta Y_k = \sum_{i=1}^{k} (Y_i - \overline{Y}) . \qquad (2.7)$$

Відношення R/S Херст назвав нормованим розмахом. З (2.3) при заданому N слідує:

$$\log R/S \approx H \log N + \log a . \qquad (2.8)$$

Тому параметр H (а заразом і невідому для розглянутого ряду константу а) можна оцінити, зобразивши графік залежності log R/S від log N, і, використовуючи отримані точки, підібрати за методом найменших квадратів пряму лінію з нахилом H. Перетин отриманої прямої з віссю ординат визначить значення log a. Інші методи оцінки параметра Херста наведені у [3].

Величина показника Херста, який, в принципі, може приймати значення з інтервалу [0,1] говорить про наступне [9]:

1. Якщо $H = 0{,}5$, то тимчасовий ряд, що вивчається, є «броунівським рухом», спостереження незалежні і мають гауссівський розподіл. Можна сказати, що в цьому випадку попередні відліки тимчасового ряду не впливають на майбутні.

2. Якщо $0 < H < 0{,}5$, виявляється тенденція «повернення до середнього». Тобто кожен наступний відлік прагне бути протилежним до попереднього. При цьому вважається, що тимчасовий ряд дуже зашумлений.

3. Якщо $H > 0{,}5$, то спостереження є незалежними. Минулі відліки впливають на майбутні тим сильніше, чим далі H від 0,5. Виникає довготривала пам’ять, коли він простежується сильний вплив відліків друг на друга.

Отже, тимчасовий ряд типу рисунку 2.2, що характеризує трафік мережі, може мати фрактальні властивості.

Для використання методів класичної теорії масового обслуговування в

аналізі характеристик мережевих вузлів необхідно встановити зв'язок самоподібних властивостей випадкового процесу з характеристиками випадкових тимчасових інтервалів, зображених на рис.2.1.

Розглянемо випадковий часовий ряд X (t), що вимірюється в пакетах або у байтах у момент часу t (вважаємо для простоти значення t цілими). Ряд X(t) вважатимемо стаціонарним у широкому сенсі з кореляційною функцією $B(\tau) = B(t_1 - t_2)$, де

$$B(t_1, t_2) = E\left([X(t_1) - m] \cdot [X(t_2) - m]\right), \qquad (2.9)$$

де m = E(X(t)),

$$\sigma^2 = B(0) = E\left(X(t) - m\right)^2.$$

Випадковий процес X (t) є строго самоподібним другого порядку з показником Херста H (0,5 < H < 1), якщо:

$$B(k) = \frac{\sigma^2}{2}\left((k-1)^{2H} - 2k^{2H} + (k+1)^{2H}\right). \qquad (2.10)$$

Самоподібність другого порядку означає, що кореляційна функція зберігає свій вигляд і при об'єднанні (агрегуванні [32]) часового ряду. При цьому вихідний і агрегований тимчасові ряди мають однакові кінцеві розподіли ймовірностей.

Тепер можна охарактеризувати властивості самоподібного часового ряду [Г2].

1. Якщо $H > 1/2$, то відліки часового ряду взаємозалежні, що породжує пам'ять процесу. При цьому кореляційна функція стає повільно затухає і апроксимацією для неї може служити вираз

$$B(k) \cong k^{(2H-2)} L(k), \tag{2.11}$$

де L(k) - функція, що повільно змінюється. Кореляційна функція стає сумовною, що визначає довготривалу залежність самоподібного часового ряду.

Можна показати [8], що довготривала залежність є причиною піковості трафіку, коли протягом тривалого часу швидкість надходження пакетів на мережевий вузол дорівнює пропускній здатності каналу. Це може призвести до переповнення буфера пристрою, втрати пакетів і збільшення затримки пакета всередині пристрою обробки.

2. Дисперсія вибіркового середнього згасає повільніше, ніж величина, зворотна розміру вибірки n .

Для звичайного (не самоподібного) процесу Z(t) дисперсія вибірки розміром n визначається як $\sigma^2(Z_i^{(n)}) = \sigma^2 n^{-1}$ для будь-кого i , де σ^2 - Дисперсія процесу Z(t).

Для вибірки із самоподібного процесу Y(t) дисперсія $\sigma^2(Y_i^{(n)})$ пропорційна $n^{(2H-2)}$ при $n \to \infty$. Це говорить про те, що статистичні характеристики (середнє і дисперсія) будь-якої вибірки будуть сходитися тим повільніше, чим буде ближче до 1 параметра.H .

3. Енергетичний спектр самоподібного випадкового процесу має ступеневий характер зміни поблизу нуля. Якщо визначити енергетичний спектр як:

$$\Psi(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} B(k) e^{-ik\omega}, \tag{2.12}$$

то для самоподібного процесу буде характерна апроксимація виду:

$$\Psi(\omega) \approx \omega^{-\gamma} L(\omega), \tag{2.13}$$

де L(ω) - повільно змінюється функція поблизу 0, ($0 < \gamma < 1$).

Довготривала залежність в результаті передбачає, що $\Psi(0) \to \infty$, у той час як для процесів, що не володіють властивістю самоподібності, при $\omega = 0$ енергетичний спектр має кінцеве значення.

4. Самоподібні процеси, що мають довготривалу залежність, як правило, характеризуються одномірними розподілами з «важкими хвостами».

За визначенням випадкова величина X має розподіл із важким хвостом, якщо для ймовірності перевищення порога x справедливо:

$$P(X > x) \cong cx^{-\alpha}, \quad x \to \infty, \tag{2.14}$$

де $0 < \alpha < 2$ називають параметром форми, з - деяка позитивна константа.

Оскільки інтегральний розподіл може бути записаний як:

$$F(x) = 1 - P(X > x),$$

то, з (2.14) слід, що хвіст розподілу згасає за гіперболічним законом. Такі розподіли як, наприклад, показове і гаусовське, мають екс-потенційно спадаючий хвіст і тому називаються розподілами з легкими хвостами.

Головна особливість розподілів з важкими хвостами полягає в тому, що при $0 < \alpha < 2$ їхня дисперсія нескінченна, а якщо до того ж $0 < \alpha \le 1$, Те й середнє значення теж нескінченно.

Як приклад наведемо розподіл, що часто використовується, з важким хвостом – розподіл Парето, представлений на рисунку 2.3. Щільність ймовірності даного розподілу має вигляд

$$w(x) = \frac{\alpha \beta^{\alpha}}{x^{\alpha+1}}; \ \alpha > 0, \ \beta > 0, \ x > 0, \tag{2.15}$$

де α - Параметр форми,

β– параметр, що визначає мінімальне значення випадкової змінної x .

Інтегральна функція розподілу Парето записується як

$$W(x) = 1 - \left(\frac{\beta}{x}\right)^{\alpha}.$$

При дослідженні мережного трафіку найчастіше використовується випадок $1 < \alpha < 2$ (3 кінцевим середнім, рівним $m = \alpha\beta/(\alpha - 1)$).

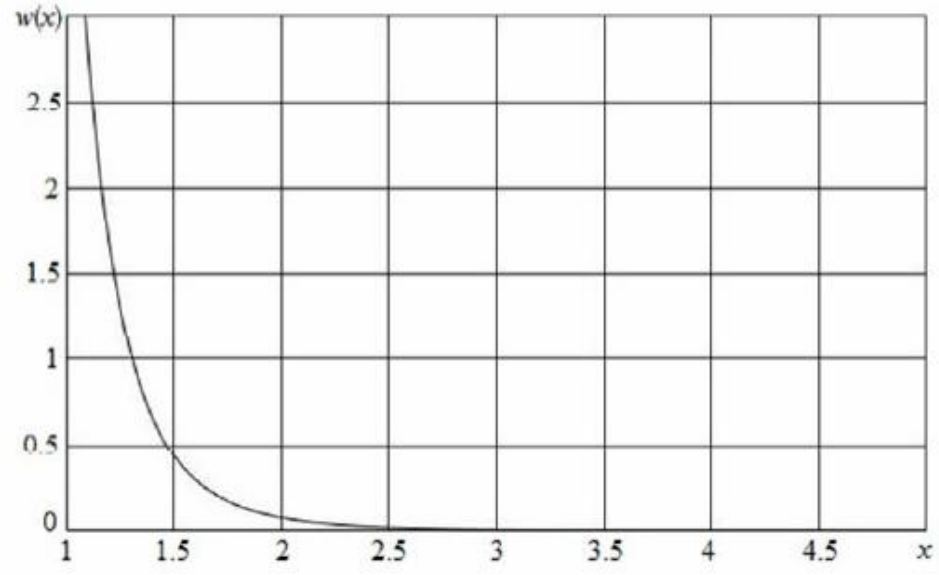

Рисунок 2.3 – Розподіл Парето із параметрами α = 5, β = 1

У практичних дослідженнях індекси дисперсії використовуються шляхом оцінки їх значень за реальними спостереженнями і подальшим підбором підходящої моделі трафіку, яка узгоджується з індексом дисперсії, що спостерігається.

2.2 Аналіз часу очікування заявки у черзі для системи масового обслуговування загального виду

Система масового обслуговування загального виду з одним обслуговуючим приладом у позначенні Кендала представляється як G/G/1, причому перша позиція G характеризує розподіл інтервалів часу між заявками, поступаючими на обслуговування, а друга позиція G визначає розподіл інтервалів часу обслуговування заявок. Для систем загального виду обидва розподіли довільні, включаючи розподіли з «важкими» хвостами. Єдине обмеження, яке накладає класична теорія масового обслуговування полягає в тому, що елементи як тієї, так і іншої послідовності інтервалів часу повинні бути незалежними між собою і «всередині» кожної послідовності.

При цьому одна з найважливіших характеристик системи, а саме, середній час перебування заявки в черзі, може бути визначена з вирішення рівняння Ліндлі [12], яке можна записати у вигляді:

$$W(x) = \int_0^{\infty} K(x-y)dW(y)\,. \tag{2.16}$$

У цьому записі W (x) - Інтегральна функція розподілу часу очікування заявки в черзі, функція K (x-y) – ядро рівняння, яке записується як

$$K(z) = \int_0^{\infty} B(z+x)a(x)dx\,, \tag{2.17}$$

де B(z+x) - інтегральна функція розподілу інтервалів часу обслуговування, а (x) – диференціальна функція розподілу (щільність ймовірностей) інтервалів часу між вступниками обслуговування заявок.

Найчастіше при аналізі характеристик системи G/G/1 використовується апроксимація H2 /H2 /1, що дозволяє досить просто вирішувати рівняння Ліндлі спектральним способом.

При аналізі трафіку (і системи G/G/1) з явно вираженими кореляційни-

ми ними властивостями послідовностей інтервалів часу обслуговування та інтервалів між заявками, що надходять, апроксимація H_2 /H_2 /1 також може бути використана, проте апроксимуючі послідовності з гіперекспоненціальними розподілами H_2 повинні володіти статистичними характеристиками, що враховують кореляційні властивості вихідних послідовностей таким чином, щоб залишилися справедливими умови застосування інтегрального рівняння Ліндлі для аналізу системи масового обслуговування.

2.4 Аналіз часу очікування заявки у черзі під час обробки корельованого трафіку

Як зазначено в кінці попереднього розділу, аналіз корелированного трафіка, що обробляється системою масового обслуговування G/G/1 можна провести використанням інтегрального рівняння Ліндлі, якщо підібрати відповідні статистичні апроксимації потоків інтервалів часу між заявками та інтервалів часу обслуговування заявок. Апроксимуючі потоки в роботах іноземних авторів часто називають оновлюючими потоками [7-8, 9]. Зазвичай використовують оновлюючі потоки з гіперекспоненціальним розподілом миттєвих значень інтервалів часу (H_2) та потоки Ерланга.

2.4.1 Потоки з розподілом Ерланга

Для побудови оновлюючого процесу можна вибрати суміш не тільки двох пуассонівських процесів, що призводить до використання гіперекспоненціального розподілу (H_2) с щільністю (2.17), а й суміш процесів, миттєві значення яких підпорядковуються розподілу Ерланга [7]. У роботі [8] показано, що необхідність такої апроксимації виникає тоді, коли для корелюваного потокуX_i , i= 1,2,... значення індексу дисперсії може бути менше 0,5 (I_x < 0,5) і відповідно, C_H^2< 0,5 .

Розподіл Ерланга записується як

$$w(x) = \frac{\lambda(\lambda x)^{k-1}}{(k-1)!}, \quad x \geq 0, \tag{2.18}$$

параметри розподілу мають значення: $m_x = k/\lambda$, $\sigma_x^2 = k/\lambda_2$. Розподіл Ерланга характеризує суму k незалежних випадкових величин, кожна з котрих рих має експоненційний розподіл із параметром λ. Графіки розподілу Ерланга наведені на рисунку 2.4. Зауважимо, що розподіл Ерланга збігається з гама-розподілом при виборі значення параметра гамма-розподілу у вигляді цілого числа.

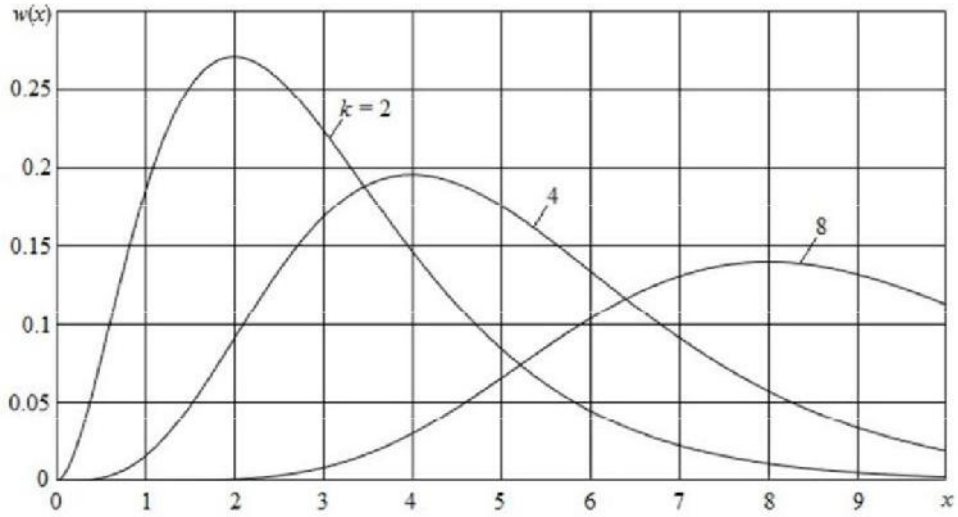

Рисунок 2.5 – Графіки розподілу Ерланга

Розглянемо потік корельованих інтервалів часу X_i , $i = 1,2,...$ з параметрами: кінцевим середнім m_x , кінцевою дисперсією $\sigma_x^2 = Var\{X_n\}$, коефіцієнтом кореляції $R(k)$, $k = 0,1, ...$, коефіцієнтом варіації $C_x^2 = \sigma_x^2 / m_x^2$ та індексом дисперсії $I_x = C^2(X)\left(1 + 2\sum_{j=1}^{\infty} R_x(j)\right)$.

Тут будемо вважати, що інтервали часу в оновлюючому процесі H мають розподіл, який визначається сумішшю розподілу Ерланга по рядку k і експоненціального розподілу з параметром λ. Ваговим параметром при реалізації суміші є параметр, що позначається θ. Перетворення Лапласа від такої густини ймовірностей має вигляд

$$w_H(s) = \theta\left(\frac{\lambda}{\lambda+s}\right)^k + (1-\theta)\frac{\lambda}{\lambda+s}. \tag{2.19}$$

Якщо прирівняти m_x до m_H та розрахувати m_2 (другий момент для X), то для фіксованого k можна записати

$$m_H = m_x = \frac{\theta k + (1-\theta)}{\lambda}, \tag{2.20}$$

$$m_2 = m_x^2(I_x + 1) = \frac{\theta k(k+1) + 2(1-\theta)}{\lambda^2}. \tag{2.21}$$

Тепер можна отримати два рівняння з двома невідомими для визначення λ і θ.

$$\lambda = \lambda_x\left(\theta k + (1-\theta)\right), \tag{2.22}$$

$$\theta = \frac{-\left(2(I_x+1) - k(k+1) + 2\right) + \sqrt{\left(2(I_x+1) - k(k+1) + 2\right)^2 - 4(I_x^2 - 1)(k-1)^2}}{2(I_x+1)(k-1)^2}, \tag{2.23}$$

з яких видно, що $\lambda \neq \lambda_H = \lambda_x$.

Якщо значення k невідомо, його вибір, як показано в [7], може бути

здійснений шляхом вирішення задачі мінімізації середньоквадратичного відхилення $I_x(N)$ від I_H , де $I_x(N)$ - Індекс дисперсії, визначений за вибіркою кінцевого розміру N для послідовності X_i ,i=1, N. Розв'язання задачі мінімізації здійснюється підбором параметрів λ і θ, Після чого із співвідношення (2.23) може бути визначено значення k. При $N \to \infty$ вибір значення k достатньо довільний, і обране значення впливає тільки на точність апроксимації істинного розподілу миттєвих значень X_i , i = 1, 2, K розподілом Ерланга.

Як зазначалося вище, використання розглянутої в даному підрозділі апроксимації найбільш доцільно при $I_x < 0,5$ і при декомпозиції коре-лованих потоків [7].

2.5 Розрахунок часу очікування заявки в черзі при обробці корельованого трафіку у вузлі мережі типу G/G/1

Нагадаємо, класична теорія масового обслуговування при аналізі роботи вузла мережі, що моделюється системою G/G/1, передбачає, що інтервали часу між надходять на обслуговування заявками утворюють послідовність незалежних випадкових величин. Однак численні виміри, проведені на сучасних мультисервісних мережах, численні посилання на які можна знайти в роботах [4,5,7] та ін, говорять про те, що припущення про незалежність зазначених послідовностей не виконується, і дані послідовності можуть мати яскраво виражені кореляційні властивості. Крім того, розподіли даних інтервалів часу часто належать класу розподілів з «важкими хвостами». У сукупності із зазначеними кореляційними властивостями це змушує, як було показано вище, розглядати випадкові послідовності обговорюваних інтервалів як послідовності, що мають самоподібні властивості.

У підрозділі 2.2 показано, що наявність явно виражених кореляційних властивостей у послідовності інтервалів часу між заявками призводить до виникнення ефекту «пачечності», що спричиняє порушення нормальної роботи вузла мережі.

2.5.1 Моніторинг трафіку мультисервісної мережі

Будемо використовувати дані про статистику трафіку IPTV, зареєстрованого згідно зі схемою, зображеною на рисунку 2.6, на рівні доступу та рівні агрегації [5, 10, 11].

На рисунку 2.6 реєстрація трафіку проводиться у двох точках, що визначають функціонування мережі на різних рівнях: у точці ТМ 1 (точка моніторингу) – реєстрація на рівні агрегації, у точці ТМ 2 – на рівні доступу. Так можна порівняти статистичні властивості агрегованого трафіку та трафіку, що надходить до окремих абонентів.

Істотну частину загального потоку трафіку від рівня ядра до рівня доступу сучасної телекомунікаційної мережі становить IPTV-трафік. Тому проаналізуємо агрегований в каналі передачі трафік і виділений із загального потоку відеотрафік IPTV. Потік перенаправляється методом дзеркалювання швидкості передачі 1 Гбіт/с в точку ТМ 1, де реєструється згідно схеми за допомогою програми WireShark. Кількість членів сумарного ряду складає 100000 пакетів.

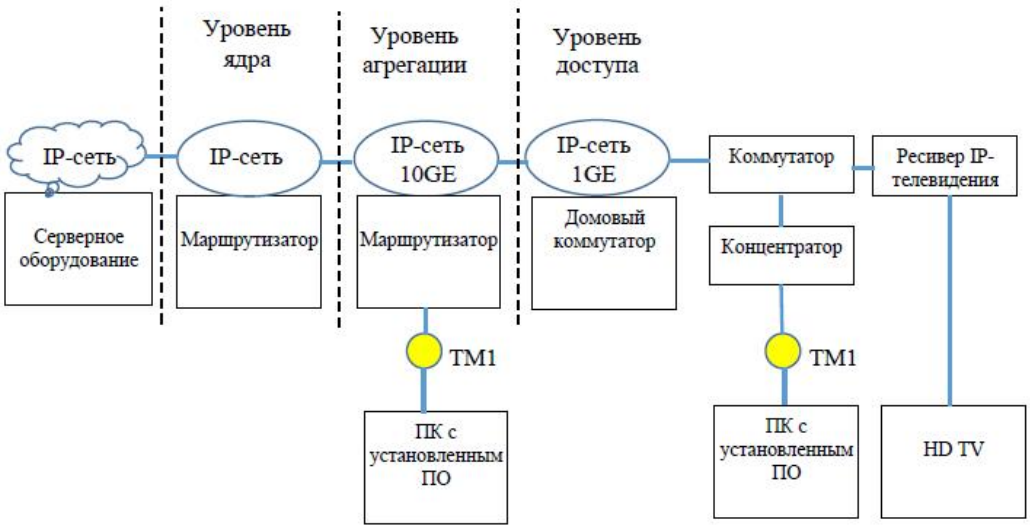

Рисунок 2.6 – Схема реєстрації трафіку в мультисервісній мережі

Реалізації трафіку IPTV для рівня агрегації та рівня доступу наведені у вигляді інтенсивності трафіку на рисунках 2.7 і 2.8 відповідно де X (t) - кількість пакетів в одиницю часу.

Трафік рівня агрегації має більш нестабільну структуру порівняно з трафіком IPTV рівня доступу, оскільки останній передається користувачеві виділеного каналу і службова керуюча інформація надходить лише моменти запитів користувача, наприклад, у разі перемикання каналів (інтервал між 135 і 170 секундами, рисунок 2.7).

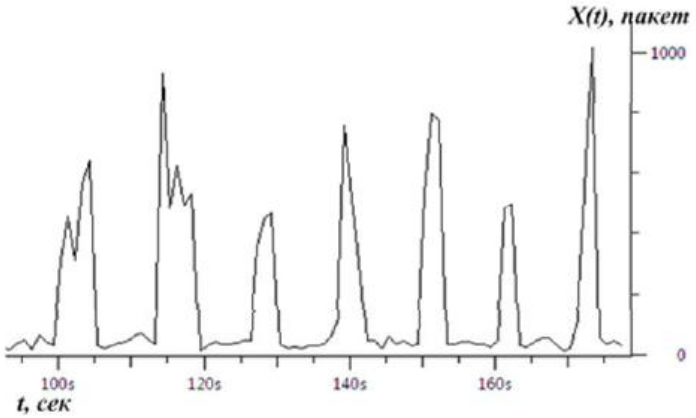

Рисунок 2.7 – Трафік рівня агрегації

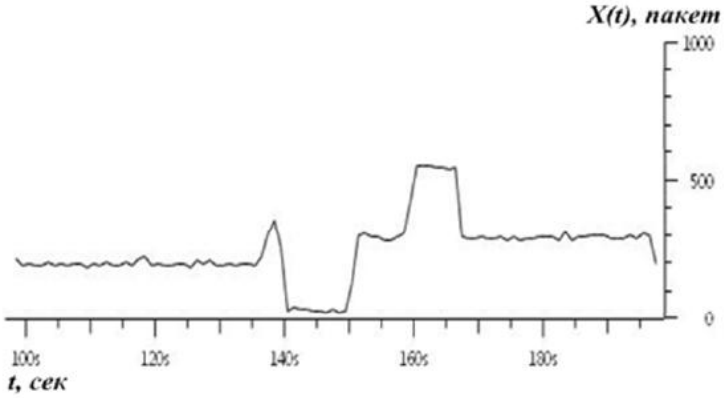

Рисунок 2.8 – Трафік рівня доступу

Для трафіку рівня агрегації характерно регулярне надходження служ-

бових пакетів поруч із інформаційними, трафік передається у загальному потоці коїться з іншими видами трафіку Internet, що потребує постійного управління та контролю.

Коефіцієнти кореляції інтервалів часу між пакетами, що надходять, і розмірів пакетів (що еквівалентно тривалості пакетів) для рівня доступу наведені на рисунках 2.9 та 2.10. Для порівняння на рисунку 2.11 наведено графік коефіцієнта кореляції, побудований за формулою (2.10) при значенні коефіцієнта Херста H = 0,65. Цей графік характеризує кореляційні властивості строго самоподібного випадкового процесу другого порядку.

Порівняння графіків рисунок 2.9, рисунок 2.10 і рисунку 2.11 дозволяє стверджувати, що послідовності інтервалів часу між пакетами і інтервалів часу довжин пакетів мають самоподібні властивості.

Статистичні властивості інтервалів часу між пакетами характеризуються гістограмою, представленою на рисунку 2.12.

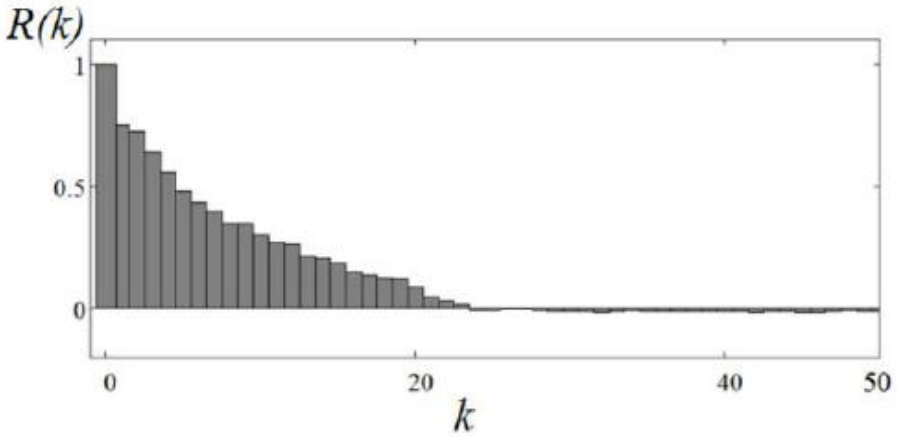

Рисунок 2.9 – Послідовність коефіцієнтів кореляції інтервалів часу між пакетами для рівня доступу

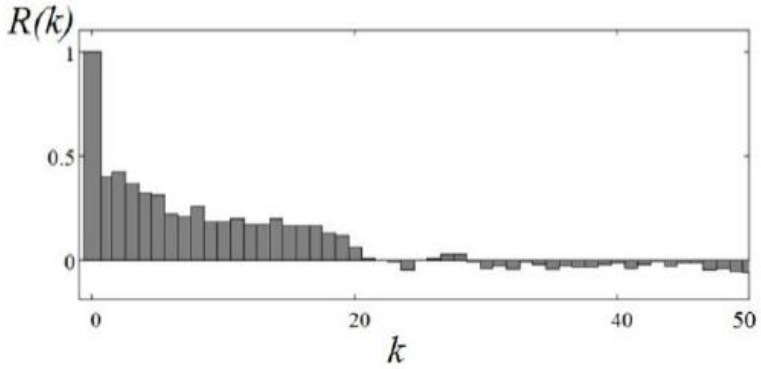

Рисунок 2.10 – Послідовність коефіцієнтів кореляції інтервалів тривалості пакетів для рівня доступу

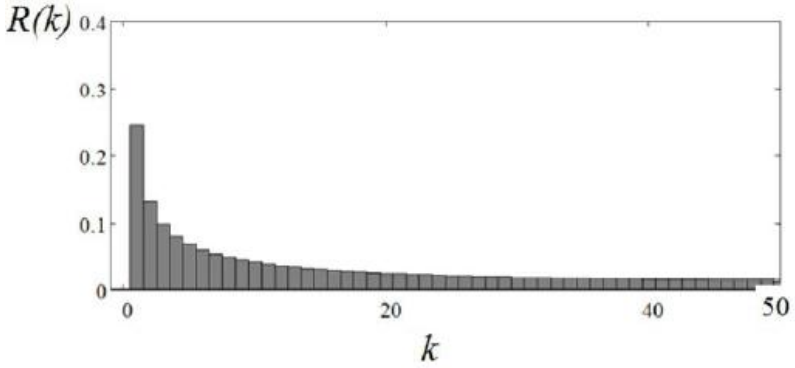

Рисунок 2.11 – Графік коефіцієнта кореляції R(k) само подібного випадкового процесу з H = 0,650

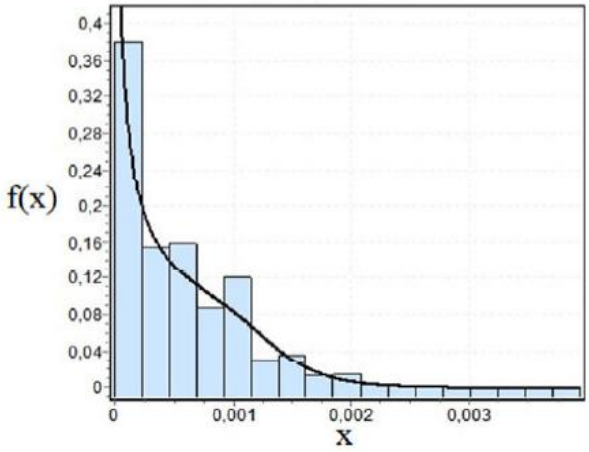

Рисунок 2.12 – Щільність ймовірностей інтервалів між пакетами

Гістограма довжин пакетів виділеного IPTV трафіку, представлена на рисунку 2.13, має два явні піки, рознесені до областей малих та великих довжин пакетів, зосереджених в інтервалах: 60-145, 1360-1500 байт.

При цьому для апроксимує щільності доцільно використовувати розподіл суміші у вигляді:

$$f(y) = P_1 \cdot f_1(y) + P_2 \cdot f_2(y), \tag{2.24}$$

$$f_1(y) = \frac{y^{n/2-1} \exp(-y/2)}{2^{n/2} \Gamma(n/2)}, \tag{2.25}$$

з n ступенями свободи (тут n = 2) та вагою $P_1 = 0{,}19$, а в якості f_2 (y) використовувати $\delta(y - y_2)$ - дельта-функцію в точці y_2=1400, що відповідає другому піку, з вагою P_2 =0,81. Тут Г (·) – символ гамма-функції.

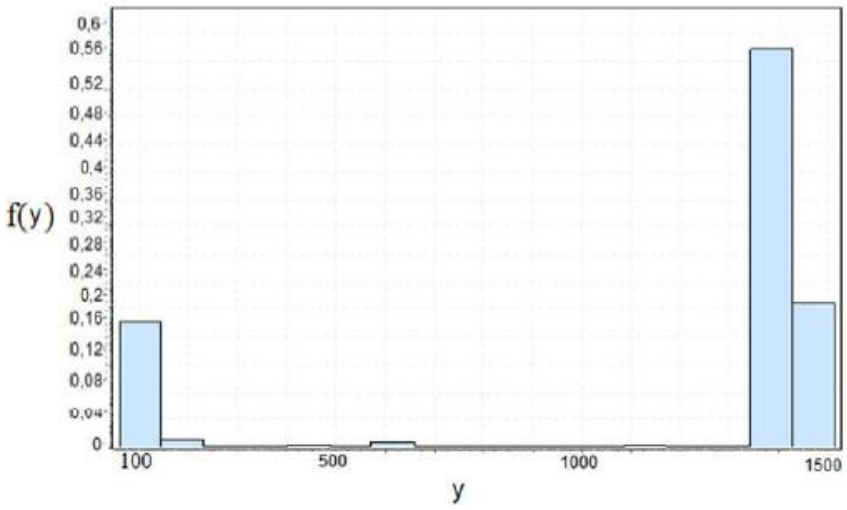

Рисунок 2.13 – Гістограма довжин пакетів виділеного IPTV трафіку

2.6 Висновки розділу 2

Розглянуто методи аналізу статистичних властивостей трафіку. Показано, що адекватний опис трафіку, як випадкового процесу, сучасних (і проектованих) МСП може бути дано із застосуванням методів теорії фракталів, зокрема, з використанням самоподібних випадкових процесів, параметри часових інтервалів яких описуються розподілами з «важкими» хвостами. Введення на розгляд поняття «параметр Херста» дозволило класифікувати залежність відліків часового ряду, що описує мережевий трафік.

Встановлено взаємозв’язок моделей трафіку, заснованих на завданні виду розподілу ймовірностей для випадкових величин, суть яких – інтервали часу між пакетами, що надходять на вхід мережевого вузла, з моделями у вигляді тимчасового ряду, тобто. кількістю пакетів за одиницю часу. Дано опис властивостей самоподібного трафіку, що має виражені кореляційні властивості, з використанням понять «індекс дисперсії інтервалів часу між подіями» та «індекс дисперсії числа подій».

Запропоновано апроксимацію розглянутих розподілів ймовірностей корелеьованих тимчасових інтервалів, засновану на використанні розподілу Ерланга.

Для реально зареєстрованого трафіку IPTV на рівні доступу та на рівні агрегації проведено статистичний аналіз ймовірносно-часових параметрів трафіку (розрахунок послідовності коефіцієнтів кореляції, підбір за критерієм згоди розподілів ймовірностей), на основі якого проведено аналіз середнього часу очікування пакета в черги. Показано, що наявність кореляційних зв’язків для послідовності інтервалів часу між пакетами і для послідовності інтервалів часу обслуговування пакетів призводить до істотного збільшення (у конкретному прикладі майже на порядок) часу очікування пакета в черзі.

3 АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВУЗЛУ МСП В УМОВАХ НЕТОЧНОГО ЗНАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАФІКА

3.1 Загальне рішення задачі оцінювання середнього часу очікування заявки в черзі для системи G/G/1

У розділі 2 було показано, що трафік сучасних мереж, особливо на рівні доступу, має самоподібні властивості, що характеризується яскраво вираженими кореляційними зв’язками тимчасових параметрів трафіку і розподілами з «важкими» хвостами для миттєвих значень параметрів. Якщо такі тимчасові параметри як інтервали часу між заявками на обслуговування та інтервали часу обслуговування заявок незалежні, то аналіз роботи вузла мережі можна провести, моделюючи його як систему масового обслуговування загального виду (G/G/1). При цьому одна з найбільш суттєвих характеристик роботи вузла - час очікування заявки в черзі, може бути отримана з рішення інтегрального рівняння Ліндлі [3]. Нагадаємо, що необхідна інформація для вирішення інтегрального рівняння Ліндлі - це одномірні щільності ймовірностей інтервалів часу між заявками та інтервалів часу обслуговування заявок. Дуже часто такі щільності відомі з тим чи іншим ступенем невизначеності щодо параметрів цих щільностей, що обумовлено складністю та мінливістю процесів, що протікають у досліджуваній мережі, також об’єктивними та суб’єктивними труднощами процесів збирання, обробки та інтерпретації інформації про функціонування мережі [20].

Одним з методів, що дозволяють врахувати невизначеність знання щодо параметрів розподілів, є інтервальний підхід [20], при якому невизначені параметри задаються діапазоном своїх можливих значень. Ефективність такого підходу для аналізу марківської системи M/M/1 продемонстровано у роботі [20]. При аналізі системи G/G/1 слідуватимемо роботам [10, 13].

Розглянемо систему G/G/1 з дисципліною обслуговування FIFO, яка

характеризується розподілами з «важкими» хвостами і в якій для певності використовуємо розподіл Парето (для значень інтервалів часу між заявками) та розподіл Вейбулла (для значень інтервалів часу обслуговування заявок). Таку систему можна позначити як P/W/1, маю на увазі, що P означає розподіл Парето, а W – розподіл Вейбулла. Запишемо дані розподілу у вигляді:

$$f_P(x) = \frac{\beta k^{\beta}}{x^{\beta+1}}, \quad x \geq k, \tag{3.1}$$

$$f_W(x) = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\alpha}}, \quad x \geq 0. \tag{3.2}$$

Надалі, не втрачаючи спільності, вважаємо k =1, λ =1.

Вважатимемо, що параметр β відомий неточно у деяких межах [a, b]. Найбільша невизначеність знання щодо значення параметра β буде характеризуватись рівномірною щільністю ймовірностей:

$$f(\beta) = \frac{1}{b-a}. \tag{3.3}$$

Тому безумовна (незалежна від конкретного значення ймовірностей для розподілу Парето $f_{P*}(x)$ матиме вигляд:

$$f_{P^*}(x) = \int_a^b f_P(x) f(\beta) d\beta = \frac{1}{b-a} \int_a^b \frac{\beta}{x^{\beta+1}} d\beta. \tag{3.4}$$

Інтегруючи частинами, маємо:

$$f_{P^*}(x) = \frac{1}{(b-a)(\ln x)^2}\left[x^{-a-1}(1+a\ln x) - x^{-b-1}(1+b\ln x)\right]. \quad (3.5)$$

Графік густини $f_{P*}(x)$ при значеннях a =1, b = 3 наведено на рисунку 3.1, з якого випливає, що $f_{P*}(x)$ є знову розподілом Парето

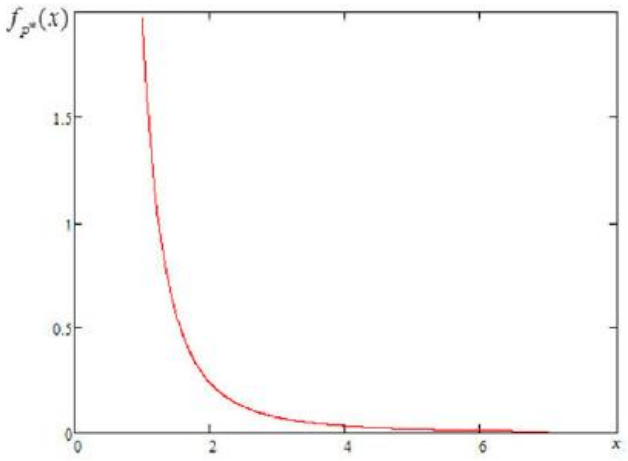

Рисунок 3.1 – Розподіл $fP*(x)$

Такий самий результат можна отримати, припускаючи, що параметр β з рівною ймовірністю набуває значення β =1, 2, 3. При цьому якщо з (3.1) позначити $P(x,\beta) = f_P(x)$, то замість (3.4) слід записати очевидне співвідношення:

$$f_{P^*}(x) = \sum_{i=1}^{N} f_P(x,\beta_i)P(\beta_i) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} f_P(x,\beta_i), \quad (3.6)$$

Поступаючи аналогічно до розподілу Вейбулла (використовуючи усереднення за рівноймовірними значеннями α =1, 2, 3, 4 згідно з формулою (3.6)), отримуємо:

$$f_{W^*}(x) = \frac{1}{4}\left[e^{-x} + 2xe^{-x^2} + 3x^2e^{-x^3} + 4x^3e^{-x^4} \right]. \quad (3.7)$$

Графік густини $f_{W*}(x)$, побудований згідно (3.7), представлений на рисунку 3.2.

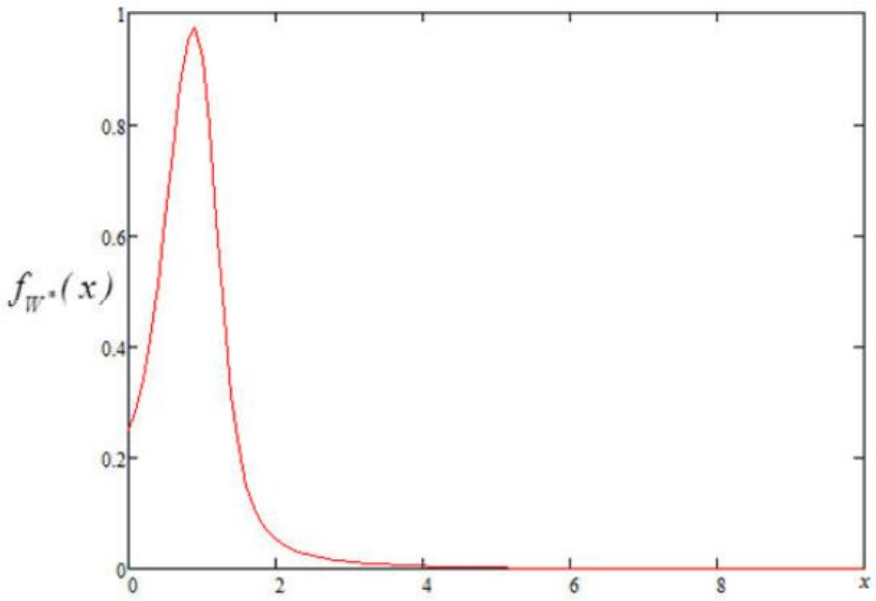

Рисунок 3.2 – Розподіл $f_{W*}(x)$

Отже, завдання аналізу характеристик мережевого вузла, що моделюється системою масового обслуговування загального виду, при невизначеності знання про конкретні значення ймовірно-часових параметрів вузла може бути вирішена на основі інтервального підходу. Застосовуючи апроксимацію, що використовуються для опису роботи вузла мережі щільностей ймовірностей, рядами загасаючих експонент, можна, вирішуючи рівняння Ліндлі спектральним методом, визначити один з найважливіших параметрів вузла мережі - час очікування заявки в черзі, при різних імовірністях властивостей оброблюваного трафіку.

3.2 Розв’язання задачі оцінювання середнього часу очікування заявки на черги для системи G/D/1

Розглянемо систему G/D/1. Така система часто використовується для моделювання роботи вузла мережі спеціального призначення, тому що реалізація протоколів криптографічного захисту повідомлень передбачає постійну тривалість обслуговування будь-якої заявки.

Розглянемо окремий випадок системи G/D/1 [101], яку позначимо як P/D/1. Припускаючи для розподілу Парето k= 1, запишемо щільність імовірностей постійного часу обслуговування заявки x_0 у вигляді

$$f_D(x) = \delta(x - x_0), \quad x_0 > 0, \tag{3.8}$$

де δ (·) - символ дельта-функції.

Щодо невизначеності знання параметра β розподілу Парето зробимо такі ж припущення як у розділі 3.1, тому залишається справедливим виразом (3.5).

Відомо [3], що цікавий для нас параметр системи обслуговування - середній час очікування заявки в черзі ($T_{ср}$), може бути отриманий як безпосереднім рішенням рівняння Ліндлі, а й непрямим способом через запровадження поняття «залишкового часу» деякої випадкової величини ξ , котора означає тривалість вільного стану системи.

Розрахунки, проведені у роботі [13], показують, що для аналізованого прикладу при вибраних параметрах a = 0,2 ; b = 0,8; x_0 = 200 (час, відповідний обробці заявки розміром 200 байт) середній час очікування заявки в черзі становить $T_{ср}$ = 2,67 (умовних одиниць часу).

Достовірність результатів, отриманих у розглянутому прикладі, була перевірена моделюванням роботи вузла мережі у програмі NS2 з використанням гамма-розподілу з параметром z = 0,5 згідно зі схемою, наведеною на

рисунку 3.3.

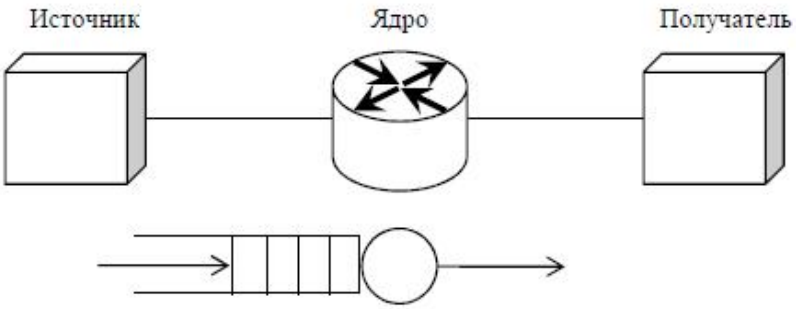

Рисунок 3.3 – Схема моделювання роботи вузла мережі NS2

В експерименті задавався потік з гамма-розподілом інтервалів часу між пакетами, а розмір пакету залишався фіксованим з розміром 200 байт. Як модуль транспортного рівня використовувався модуль UDP.

Зміна розміру черги експериментально показано на рисунку 3.4.

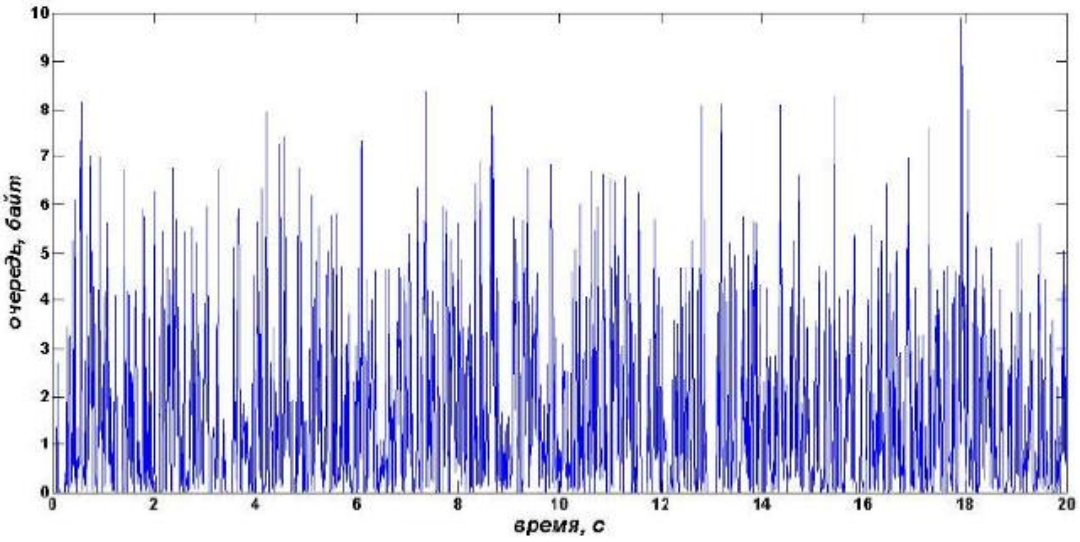

Рисунок 3.4 – Зміна розміру черги у процесі моделювання системи Г/D/1

Аналіз представленої на рисунку 3.4 реалізації дав середнє значення затримки в черзі, рівне 0,005 с.

Якщо ототожнити використовувані вище «умовні одиниці часу» з се-

кундами, можна констатувати дворазове відмінність абсолютних значень середньої затримки заявки у черзі. Самі ж абсолютні значення затримки, отримані з модельного експерименту та аналітичного розрахунку, вказують на допустимість такого порівняння, тому що:

- по-перше, характеристична функція часу очікування в черзі отримана приблизно без оцінки помилки наближення,

- по-друге, моделювання проведено для фіксованого значення параметра гамма-розподілу z = 0,5 (У розрахунках передбачався рівномірний розподіл z з інтервалу (0,2-0,8)),

- по-третє, не можна не враховувати певні неточності, характерні для будь-якої моделюючої системи, у тому числі й для NS2.

Розглянуті приклади аналізу характеристик мережевого вузла, що моделюється системою масового обслуговування загального виду, показують, що завдання оцінювання середнього часу очікування заявки в черзі при невизначеності знання про конкретні значення імовірнісно-часових параметрів вузла може бути вирішена на основі інтервального підходу.

3.3 Аналіз параметрів системи масового обслуговування загального виду методом рандомізації

Використовуємо поняття оновлюючого процесу, запроваджене попередніх розділах, для аналізу параметрів системи загального виду шляхом рандомізації [3, 4].

Тут як оновлюючий процес використовується модель випадкового потоку, що відображає статистичні властивості вихідного потоку. Дана модель, що представляється так званим узагальненим (рандомізованим) пуасонівським потоком (ОПП), параметр якого є випадковою величиною з деякою функцією розподілу, описує ситуацію невизначеності знання щодо невідомого точно параметра вихідного потоку.

Якщо звернутися до рисунку 2.4 розділу 2 і ввести в розгляд послідов-

ність інтервалів часу, що не перетинаються. (t1, t2 , K t_n) та значення N (t_i) – кількість подій в інтервалі ti , i = 1, K n , З урахуванням формули (2.16), для розподілу ймовірностей подій ОПП, що з'явилися в цих інтервалах, можна записати [4]

$$\Omega(\vec{t}, \vec{k}) = P\big(N(t_1) = k_1, \ldots, N(t_n) = k_n\big) = \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^{n} \frac{(\lambda t_i)^{k_i}}{k_i!} e^{-\lambda t_i} dF(\lambda), \qquad (3.9)$$

де: t = (t1, t2 , K t_n), k = (k1, k2 , K k_n),

F (λ)- функція розподілу випадкового параметра вихідного, що породжує пуасонівського потоку.

Вперше на можливість використання даного підходу для моделювання залежності між подіями не тільки всередині будь-якого інтервалу, а й між інтервалами, а також групування подій у пачки, зазначив А.Я. Хінчін.

У роботах [3, 4] наведено конкретні результати, отримані з використанням моделі (3.9).

Інтенсивність потоку μ(t), що має сенс середньої кількості подій на інтервалі Δt (при Δt → 0), завжди задовольняє умові μ(t) ≥ λ(t), причому рівність досягається тільки для ординарного потоку без післядії. Вступ до (3.9) двох параметрів a та ν характеризує цикли зайнятості джерела подій (проміжки часу між періодом зайнятості і наступним за ним періодом зайнятості), що характерно для потоків, що описуються моделлю (3.9).

Важливо відзначити, що розподіл (3.8) є окремим випадком розподілу Парето (див. формулу (2.15)). Це дає підстави стверджувати, що за допомогою ОПП можна моделювати розподіли з важкими хвостами.

Замінимо вихідну систему моделлю, функціонування якої залежить від деякого випадкового параметра α з відповідною функцією розподілу. Припускатимемо, що модель відповідає виразу (3.9), тобто. трафік, що надходить на обробку, замінюється рандомізованим пуасонівським потоком.

Розглянемо як приклад систему M/M/n з кінцевим розміром буфера k.

Якщо як випадковий параметр α використовувати коефіцієнт завантаження системи ρ (тобто прийняти α = ρ), який визначається як ρ = λτ , де λ - інтенсивність вхідного потоку, τ - середній час обслуговування, то, використовуючи фундаментальну роботу [22].

Для порівняння наведемо значення ймовірності блокування $P_{бл}$ для класичної системи M/D/1 з буфером розміром k:

$$P_{бл} = q^{*}_{1+k} = \frac{\rho^{1+k}}{\sum_{i=0}^{k+1} \rho^{i}}. \qquad (3.10)$$

За отриманими результатами можна порівняти зміну ймовірності блокування для системи M/D/1 і системи G/D/1, причому, як випливає з викладеного, передбачається, що інтенсивність пуасонівського потоку в системі G/D/1 на кожному інтервалі часу між заявками набуває випадкового значення, що відповідає розподілу. Нижче представлені таблиці 3.1-3.3 для ймовірностей блокування систем M/D/1 та G/D/1 при різних значеннях ρ.

Таблиця 3.1- Значення ймовірності блокування ρ = 0,25

Система	k							
	0	1	2	3	4	5	6	7
G/D/1 $q_{i = k+1}$	0,200	0,091	0,064	0,060	0,069	0,094	0,142	0,222
M/D/1 $P_{бл}$	0,200	0,048	0,012	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000

Таблиця 3.2- Значення ймовірності блокування ρ = 0,3

Система	k							
	0	1	2	3	4	5	6	7
G/D/1 $q_{i = k+1}$	0,231	0,122	0,099	0,106	0,064	0,108	0,293	0,413
M/D/1 $P_{бл}$	0,231	0,065	0,019	0,006	0,002	0,000	0,000	0,000

Таблиця 3.3- Значення ймовірності блокування ρ = 0,5

Система	k							
	0	1	2	3	4	5	6	7
G/D/1 $q_{i = k+1}$	0,333	0,250	0,273	0,353	0,469	0,584	0,672	0,713
M/D/1 $P_{бл}$	0,333	0,143	0,067	0,032	0,016	0,008	0,004	0,002

Для значень ρ = 0,3 і ρ = 0,5 на рисунку 3.5 відображені графіки зміни імовірності блокування $P_{бл}$ залежно від розміру черги k.

Аналіз даних, представлених у таблицях, показує, що й на вході системи G/D/1 інтервали часу між заявками мають розподіл Парето з можливою статистичною залежністю аналізованих інтервалів, то пропускна здатність системи різко знижується, не дивлячись на те, що коефіцієнт завантаження

системи ρ < 1. Вже при ρ = 0,5 спостерігається швидке монотонне зростання ймовірності блокування.

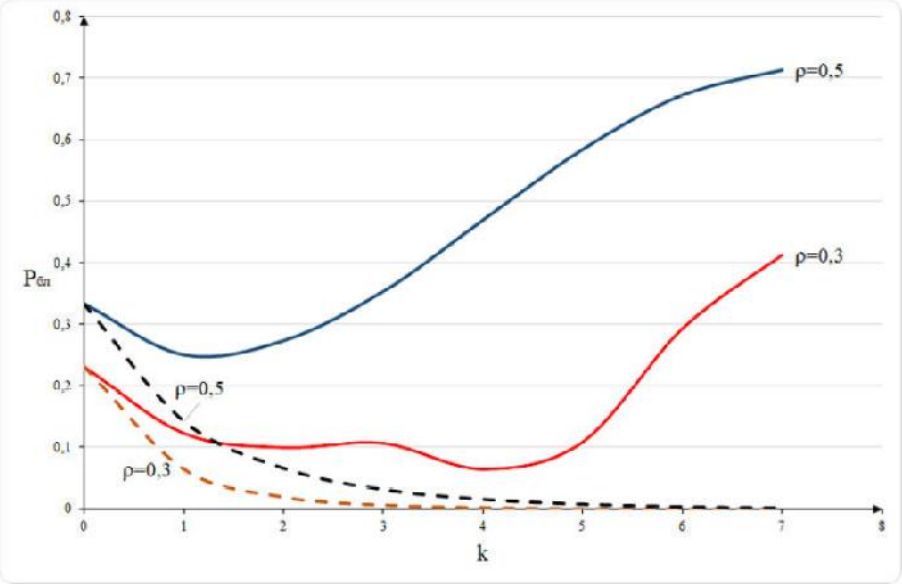

Рисунок 3.5 – Залежність $P_{бл}$ від розміру черги

Тепер із використанням моделі (3.9) визначимо вплив статистичних зв'язків інтервалів часу обробки заявки у системі M/M/1 на розмір черги при необмеженому розмірі вхідного буфера.

Нехай на вході системи M/M/1 діє пуассонівський потік з параметром (інтенсивністю) λ. Час обслуговування заявки τ є випадковою величиною, розподіленою за показовим законом, і кожне випадкове значення ня τ «реалізується» як τ_j з ймовірністю p_j так що:

$$\sum_{j=1}^{k} p_j = 1 .$$

Таке припущення призводить до того, що розподіл часу обслуговування стає гіперекспоненціальним, докладно розглянутим у розділі 2. Тут на відміну від ситуації, розглянутої раніше, полягає в тому, що кожне τ j визначається номером j, який є номером «стану» системи. Нагадаємо, що під «станом» розуміється кількість заявок, що у системі у певний час, тобто. номерj –

це кількість заявок, що знаходяться в черзі, плюс одна заявка на обслуговуванні (при одному обслуговувальному приладі).

Відомо [19], що з системи M/M/1 ймовірність будь-якого i -го стану системи визначається як ρ i $(1-\rho)$, де $\rho = \lambda\tau$. Дотримуючись позначень даного розділу можна записати $q_i^* = \rho^i (1-\rho)$. І далі за допомогою формули (3.10) одержимо для модельної системи [4]:

$$q_i = q_0 \sum_{j=1}^{\cdot\cdot} p_j \rho_j^i , \quad \rho_j = \lambda \tau_j ,$$

$$q_0 = 1 \Big/ \sum_{j=1}^{k} \frac{p_j}{1-\rho_j} . \qquad (3.11)$$

Середня кількість заявок у системі:

$$E(i) = \bar{i} = \sum_{i=0}^{\infty} i q_i = q_0 \sum_{j=1}^{k} \frac{p_j \rho_j}{(1-\rho_j)^2} . \qquad (3.12)$$

Для окремого випадку k = 2 з (3.12) отримаємо

$$\bar{i} = \left(\frac{p_1}{1-\rho_1} + \frac{p_2}{1-\rho_2} \right)^{-1} \left[\frac{p_1 \rho_1}{(1-\rho_1)^2} + \frac{p_2 \rho_2}{(1-\rho_2)^2} \right], \quad p_1 + p_2 = 1 . \qquad (3.13)$$

Відповідно до моделі формула (3.43) визначає середнє число заявок у системі, в якій інтервали часу обробки заявок не є незалежними. Характер залежності при цьому визначається набором величин q_i , i = 1, …k .

У якості об’єкта порівняння виберемо систему M/G/1 з нескінченною чергою, в якій інтервали обслуговування заявок є послідовність незалежних величин з гіперекспоненціальним розподілом:

$$w(\tau) = \sum_{j=1}^{k} p_j \mu_j e^{-\mu_j \tau}, \text{ где } \mu_j = 1/E(\tau_j).$$

Середня кількість заявок у системі M/G/1 визначається добре відомою формулою Поллячека – Хінчина [22], у якій ключову роль відіграє значення другого моменту розподілу часу обслуговування. Використовуючи дану формулу спільно з останнім записом гіперекспо-ненціального розподілу, можна отримати:

$$\bar{i}_H = \frac{\rho + p_1 p_2 (\rho_1 - \rho_2)^2}{1 - \rho},$$
$$\rho = p_1 \rho_1 + p_2 \rho_2, \quad \rho_i = \frac{\lambda}{\mu_i}, \quad i = 1, 2. \tag{3.14}$$

У таблиці 3.4 наведено результати розрахунків, виконаних за формулою (3.13), формулою (3.14) та за формулою $i_M = \rho/1-\rho$, Що відноситься до системи M/M/1.

Таблиця 3.4. Середня довжина черги

Система	ρ							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
i	0,170	0,273	0,428	0,647	1,012	1,621	3,422	12,14
i_H	0,130	0,234	0,406	0,649	0,970	1,384	2,217	3,96
i_M	0,111	0,250	0,428	0,667	1,000	1,500	2,330	4,000

На рисунку 3.6 дані з таблиці оформлені графічно для зручності візуалізації. Криві, що відповідають залежностям $i_H(\rho)$ і $i_M(\rho)$ практично зливаються і розташовані на графіку нижче кривої i(ρ) яка характеризує аналізовану систему.

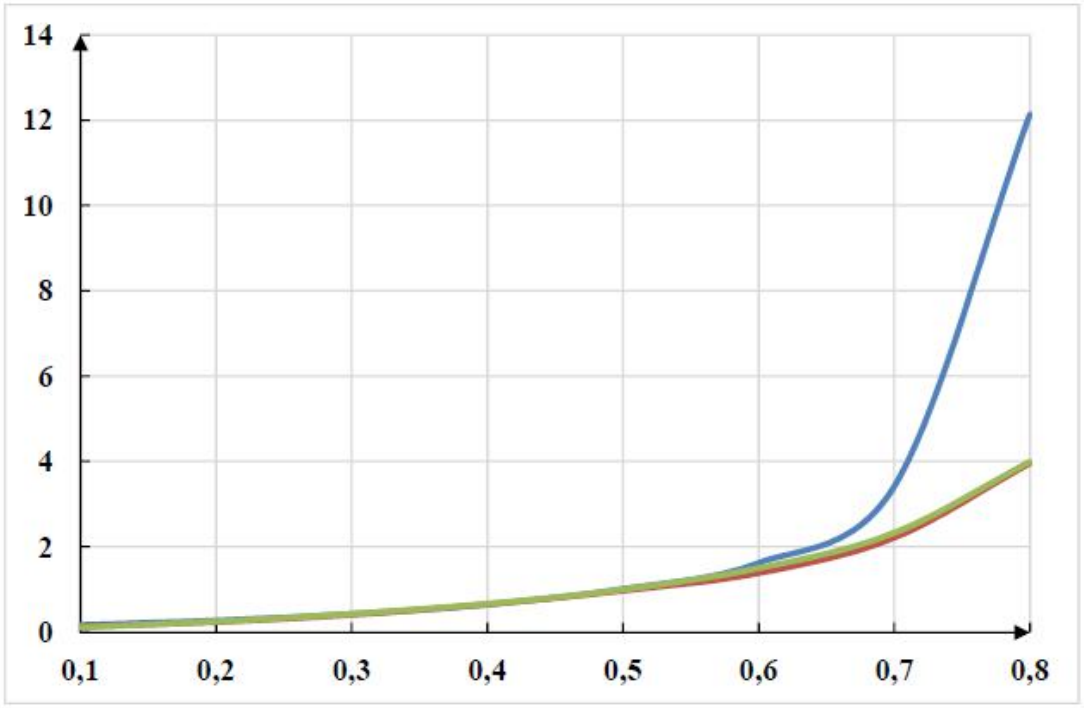

Рисунок 3.6 – Залежність середньої довжини черги від ρ

З результатів розрахунків, представлених у таблиці 3.4 та на графіках рисунку 3.6, слід, що наявність статистичної залежності між інтервалами часу обслуговування істотно збільшує чергу заявок у буфері системи, що призводить до погіршення якості обслуговування в порівнянні з тим випадком, коли така залежність відсутня.

3.4 Висновки розділу 3

Показано, що у випадку, коли деякі параметри розподілу ймовірностей послідовностей інтервалів часу між пакетами і послідовностей інтервалів часу обслуговування відомі неточно, що характеризує невизначеність знання щодо параметрів розподілів, при аналізі середнього часу очікування пакета в черзі можна використовувати інтервальний підхід, у якому невизначені параметри задаються діапазоном своїх можливих значень. При цьому в традиційному методі аналізу середнього часу очікування пакета в черзі (через рішення рівняння Ліндлі) невизначеність знання щодо неточно відомих пара-

метрів долається усередненням розподілу із заданою (або обраною) ваговою функцією за інтервалом можливої зміни невідомого параметра.

На прикладі системи масового обслуговування виду P/W/1 (де P означає розподіл Парето, а W – розподіл Вейбулла) показано, що після усереднення за невідомими параметрами завдання визначення середнього часу очікування в черзі зводиться до вирішеної в розділі 2 – з використанням урав - нения Ліндлі та апроксимації усереднених розподілів сумами затухаючих експонент.

Проведено дослідження системи G/D/1 (G - довільне розподіл інтервалів часу між пакетами, D - постійний час обслуговування пакета), що представляє певний інтерес для мереж спеціального призначення, т.к. реалізація протоколів криптографічного захисту повідомлень подраз-має постійну тривалість обслуговування будь-якої заявки. Для випадку, коли

Як розподіл інтервалів часу між пакетами використовується розподіл Парето з неточно заданим параметром форми, середній час очікування пакета в черзі визначено різними методами:

- непрямим методом (за Клейнроком) через аналіз часу вільного стану системи,
- шляхом вирішення інтегрального рівняння Ліндлі.

Порівняння рішень показало їх задовільний збіг.

Методом спектрального рішення рівняння Ліндлі виконано аналіз системи обслуговування G/D/1 для випадку, коли розподіл інтервалів часу між пакетами задано гамма-розподілом з неточно заданим параметром форми з діапазону, при якому гамма-розподіл має «важкий» хвіст. Здійснено моделювання роботи даної системи симулятором NS2. Порівняння результатів розрахунку та моделювання підтвердило доцільність використання інтервального підходу для оцінки середнього часу очікування пакета в черзі за невідомих точно параметрів розподілу інтервалів часу між надходженням пакетів.

Показано, що використання як оновлюючого потоку рандомізованого пуасонівського потоку дозволяє досліджувати імовірнісно-часові характерис-

тики системи G/D/1 при впливі на неї трафіку з випадковими взаємозалежними (корельованими) інтервалами часу між пакетами, і підпорядковуються розподілам з «важкими» хвостами. Взаємозалежність інтервалів часу моделюється в рандомізованому пуасонському потоці випадковою зміною параметра потоку.

Використання рандомізованого пуасонівського потоку дозволяє розраховувати ймовірність блокування системи G/D/1. Показано, що наявність кореляційних зв’язків інтервалів часу надходить потоку обмежує пропускну здатність системи, приводячи до швидкого зростання ймовірності блокування системи. Середня довжина черги при цьому різко збільшується при коефіцієнті завантаження системи вище значення 0,6.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВУЗЛІВ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МЕРЕЖІ МЕТОДОМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Викладені в розділах 2 і 3 матеріали з аналітичного дослідження характеристик вузлів мультисервісних мереж зв’язку, якими є і мережі спеціального призначення, вимагають експериментальної перевірки, яку доцільно здійснити з використанням спеціалізованих моделюючих платформ, що дозволяють відтворити на комп’ютері роботу не тільки вузла мережі при обробці реального трафіку, що володіє фрактальними властивостями, а також фрагментів провідних та бездротових мереж зв’язку.

4.1 Огляд засобів моделювання мереж зв’язку

Найбільш докладна, але компактно викладена інформація з цього питання міститься в роботах [8,10,11].

Для створення надійно функціонуючої мережі зв’язку необхідно на етапі проектування знання потенційних характеристик вузлів мережі, тому що діапазон зміни аналізованих характеристик визначається апріорною варіацією параметрів оброблюваного трафіку.

Якість роботи мережі багато в чому обумовлено різними факторами, багато з яких носять випадковий характер і можуть не піддаватися строгому математичному аналізу. Основним інструментом аналізу може бути імітаційне моделювання в комп’ютерних програмах-симуляторах без застосування реального устаткування.

На етапі побудови моделі виникає питання про вибір інструментарію.

Критеріями створення ефективної моделі є:

- детальна реалізація протоколів функціонування мереж,
- можливість написання та підключення власних модулів,
- можливість зміни параметрів моделювання під час проведення екс-

периментів,

- платформна незалежність,
- розвинений графічний інтерфейс,
- ціна товару.

Найбільш популярними середами імітаційного моделювання є:

- The Network Simulator (NS-2) – об’єктно-орієнтований програмний продукт, ядро якого реалізовано мовою C++. На базі NS2 можлива організація наочної демонстрації функціонування протоколів і мережевих механізмів.
- OPNET Modeler Suite (OPNET) − засіб для проектування та моделювання локальних та глобальних мереж, комп’ютерних систем, додатків та розподілених систем. Включає такі продукти: Netbiz (проектування
- оптимізація обчислювальної системи), Modeler (моделювання та аналіз продуктивності мереж, комп’ютерних систем, додатків та розподілених систем), ITGuru (оцінка продуктивності комунікаційних мереж та розподілених систем).
- OMNet++ - модульний пакет, що розширюється, на основі компонентів бібліотеки C++, що використовується для побудови моделей мережі, являє собою симулятор дискретних подій. У системі OMNeT++ закладена детальна реалізація протоколів, починаючи від мережевого рівня, можливість написання і підключення власних модулів, розвинений графічний інтерфейс.

У таблиці 4.1 надано характеристики згаданих програмних продуктів.

NS2 розроблявся як програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом (open source code software – OSS). Таке ПЗ поширюється безкоштовно - без будь-яких обмежень право використання, модифікації та розповсюдження третіми особами. З цієї ж причини безкоштовні і завжди доступні on-line всі оновлення та доповнення (нові бібліотеки, протоколи тощо).

Таблиця 4.1. Характеристики імітаційних програмних продуктів

Продукт	Мова програмування	Наявність бібліотеки	Підтримка візуалізації	Повний аналіз ситуації	Пошагова трасировка	Розповсюдження у відкритому доступі
OPNET	C++	+	+	+	-	-
Omnet	C++	+	+	+	+	+
NS2	OTcl	+	+	+	+	+

Ще однією властивістю програмного забезпечення є гнучка настройка відповідно до вимог конкретного користувача. Однією з відмінних властивостей NS2 з погляду гнучкості є мультиопераційність. Повні версії, що включають всі функції, на даний момент працездатні під управлінням наступних операційних систем: SunOS, Solaris, Linux, FreeBSD, Windows 7/10 [7].

Наведені дані дозволяють віддати перевагу мережному симулятору NS2.

4.2 Характеристики симулятора NS2

The Network Simulator (NS-2) – об’єктно-орієнтований програмний продукт, ядро якого реалізовано мовою C++. Як інтерпретатор використовується мова скриптів (сценаріїв) OTcl (Object oriented Tool Command Language). NS2 повністю підтримує ієрархію класів C++ (називається в термінах NS2 ієрархією, що компілюється) і подібну ієрархію класів інтер-претатора OTcl (названу інтерпретованою ієрархією). Використання двох мов програмування в

NS2 пояснюється такими причинами. З одного боку, для детального моделювання протоколів необхідно використовувати системну мову програмування, що забезпечує високу швидкість виконання і здатний маніпулювати досить великими обсягами даних. З з іншого боку, для зручності користувача та швидкості реалізації та модифікації різних сценаріїв моделювання привабливіше використовувати мову програмування вищого рівня абстракції. Такий підхід є компромісом між зручністю використання та швидкістю. У NS2 як системна мова використовується C++, що дозволяє забезпечити:

- високу продуктивність,
- роботу із пакетами потоку на низькому рівні абстракції моделі;
- модифікацію ядра NS2 з метою підтримки нових функцій та протоколів.
- Як мову програмування високого рівня абстракції використовується мова скриптів OTcl, що дозволяє забезпечити ряд позитивних властивостей, властивих мові Tcl/Tk (т.к. OTcl є об’єктно-орієнтованим розширенням мови Tcl):
- простота синтаксису,
- простота побудови сценарію моделювання,

можливість з’єднання воєдино блоків, виконаних системними мовами програмування і просту маніпуляцію ними.

В імітаційному моделюванні мережа є сукупністю мережевих об’єктів, які певним чином реагують на безліч подій. Мережеві об’єкти сповіщаються про ці події планувальником подій. У кожної події є набір атрибутів: час наступу і мережевий об’єкт, до якого належить ця подія. Планувальник, виходячи з хронологічної таблиці, вибирає відповідні мережеві об’єкти та повідомляє про настання подій.

Основними компонентами моделювання NS2 є планувальник подій, мережеві об’єкти та події (at-події та пакети).

Основою моделювання в NS2 є планувальник подій (event scheduler). Основні користувачі планувальника подій - компоненти мережі, які моделю-

ють затримку на обробку пакетів або яким потрібні таймери.

Планувальник подій реального часу використовується для емуляції, коли пакет моделювання взаємодіє з реальною мережею.

Інше важливе використання планувальника подій – це планування подій моделювання, такі як, наприклад, старт програми FTP, закінчення моделювання, генерація сценарію моделювання до запуску самого моделювання тощо.

Мережеві об’єкти можуть бути простими (черги, лінії затримки, мультиплексори/демультиплексори, агенти, додатки) і складовими, які утворюються шляхом об’єднання простих об’єктів (вузли, дуплексні лінії, локальні мережі 802.3 Ethernet, 802.11 Wi-Fi) .

Вузол у NS2 є абстракцією мережного рівня. Він може приймати пакети та класифікувати їх за адресою та портом, що є полями IP-заголовка.

Лінії зв’язку є складовими об’єктами (2 протилежно спрямовані симплексні лінії, які складаються з черги, Null-агента, лінії затримки та об’єкта). Якщо модель орієнтована на трасування подій, ланка також міститиме об’єкти трасування.

Агенти в NS2 є абстракцією транспортного рівня і служать для того, щоб забезпечувати передачу пакетів між мережевими об’єктами. Для створення з’єднання з використанням протоколу TCP необхідно наявність двох агентів - TCP-передавачі: TCP, TCP / Tahoe, TCP / Reno, TCP / Vegas, і TCP-приймач: TCPSink. Передавач має можливість відповідати по-різному на повідомлення про отримання пакетів від адресатів. Приймач приймає пакети та відправляє квитанцію про отримання. При створенні з’єднання з UDP протоколом, повідомлення про отримання не передбачені, тому для передачі використовується UDP-агент, а для прийому - Null-агент, який приймає та знищує всі пакети.

Програми NS2 відповідають за мережевий рівень. Додаток прикріплюється до агента і служить для створення трафіку. FTP, Telnet, CBR можна ви-

користовувати, як додатків. FTP і Telnet моделюють трафік, характерний для реальних протоколів прикладного рівня. CBR є абстрактним генератором трафіку із постійним темпом видачі пакетів.

Типи черг задаються при створенні ланки передачі даних, до них відносяться:

- DropTail (аналог FIFO з відкиданням пакетів, що знову надходять при переповненні черги),
- FQ (рівний розподіл пропускної спроможності між потоками), SFQ (рівний розподіл пропускної спроможності між обмеженою кількістю черг),
- DBR (обслуговування потоків у циклічному порядку з рівномірним розподілом пропускної спроможності між усіма класами),
- CBQ (розподіл пропускної спроможності відбувається відповідно
- класом пріоритету).

NS2 пакети складаються з набору заголовків та поля даних. Формат заголовка пакета задається під час створення об’єкта Simulator. Для зручності користувача всі пакети мають однаковий формат. Для прискорення процесу моделювання рекомендується вказувати, які протоколи будуть використовуватися в моделі для того, щоб виключити заголовки невикористовуваних протоколів із заголовка пакета.

У пакет NS2 входить засіб анімації результатів моделювання Nam [38], за допомогою якого можна спостерігати роботу моделюється мережі, її топологію, анімацію руху пакетів по каналах зв’язку або їх втрати, вести візуальний моніторинг стану черг і проводити аналіз даних.

Повна версія NS2 також містить візуалізатор Xgraph, за допомогою якого можна зобразити графічно отримані результати моделювання, що знаходяться у відповідному файлі, в який записуються дані в процесі симуляції.

У NS2 існує і математична підтримка, що дозволяє створювати різні види трафіку, як, наприклад, пуассонівського трафіку, самоподібного тощо.

Гнучка архітектура NS2 дає можливість її користувачам реалізовувати власні математичні функції та закони на C++.

NS2 також реалізована можливість моделювання виникнення помилок (спотворення або втрата інформації) на канальному рівні, на рівні бітів або пакетів. Є можливість реалізації своєї моделі помилок.

4.3 Моделювання та обробка самоподібного трафіку стимулятором NS2

Як зазначено в попередньому розділі, NS2 дозволяє описати для моделюваної мережі топологію, конфігурацію джерел і приймачів трафіку, параметри з'єднань (смугу пропускання, затримку, ймовірність втрати пакетів) та інші параметри. При моделюванні є можливість управляти параметрами буферів, проводити моніторинг прийнятих, відправлених і втрачених пакетів, здійснювати збір статистики та ін. За допомогою генерації вихідних trace-файлів може бути отримана інформація про динаміку трафіку, стан з'єднань та об'єктів мережі, а також роботи протоколів.

Для створення трафіку в системі NS2 призначені об'єкти типу Traffic.

Вони створюються методами Traffic/type, де type Expoo, Pareto або Trace.

Об'єкт Traffic/Pareto – ON/OFF генератор трафіку згідно з розподілом Парето (у NS2 є генератори та інших розподілів з «важкими» хвостами – розподілу Вейбулла, гамма-розподілу). Проста ON/OFF модель передбачає, що джерела перемикаються між двома станами: ON-стан, в якому джерела генерують трафік з постійною швидкістю, OFF-стан, в якому трафік не генерується.

У роботі [11] наведено приклад генерації методом ON/OFF трафіку Парето з параметрами: пакети розміром 128 байт із постійною бітовою швидкістю 20000 біт/с протягом ON-періоду із середньою тривалістю 500 мс. Середня тривалість OFF-періоду становить 1,5 с, параметр форми α дорівнює 1,2 (формула 2.15). Рисунок 4.1 пояснює створення генератора трафіку з розподілом Парето із заданими параметрами.

```
set traffic [new Traffic/Pareto]
$traffic set packet-size_ 128
$traffic set burst-time_ 500ms
$traffic set idle-time_ 1.5s
$traffic set rate_ 20000.0
$traffic set shape_ 1.2
```

Рисунок 4.1 – Генератор трафіку Парето

Для управління якістю обслуговування в маршрутизаторах r1 і r2 використовується алгоритм FIFO. Принцип роботи цього алгоритму заснований на процедурі відкидання всіх пакетів, що прийшли після досягнення заздалегідь встановленого максимального розміру черги. Ця процедура отримала назву «відкидання хвоста» (tail drop). Ефективність такої процедури є досить низькою, т.к. про навантаження стає відомо лише за факті переповнення черги [7]. Таким чином, механізм FIFO не може зменшити реальний розмір черги, щоб знизити час затримки пакета.

З урахуванням відомого співвідношення [3], справедливого для розподілу Парето між параметром Херста H і параметром форми α:

$$H = \frac{3-\alpha}{2} \tag{4.1}$$

Можна стверджувати, що згідно з рисунком 4.1 буде генеруватися трафік з явно вираженими самоподібними властивостями (H = 0 9).

Для аналізу ступеня впливу самоподібності трафіку на рівень втрати пакетів (packetloss) при негарантованій доставці даних (best-effort service) проведемо експеримент за схемою, представленою на рисунку 4.2.

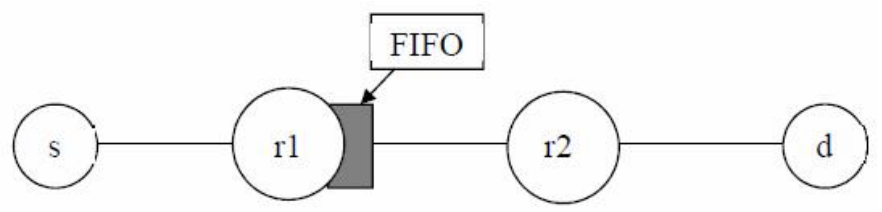

Рисунок 4.2 – Схема експерименту з негарантованої доставки даних

При генерації трафіку для випадкових інтервалів часу було використано розподіл Парето зі змінним параметром Херста. Значення параметра Херста змінювалося від 0,1 до 0,9. Для перетворення досліджуваних реалізацій у вид, необхідний для використання як джерело трафіку в NS2, використовувалася програма vega.tcl, розроблена F.Vega. Отримані таким чином самоподібні потоки, упаковувалися в UDP-пакети і передавалися в сторону одержувача (d). Для спостереження роботи алгоритму FIFO пропускна здатність віртуального каналу між маршрутизаторами (r1 і r2) вибиралася менше швидкості потоку трафіку. Таким чином частина трафіку губилася і при цьому спрацьовувала стандартна процедура управління чергою Tail Drop. Тривалість кожного експерименту - 3 години. Результати експерименту надано на рисунку 4.3 пунктирною (згладженою) лінією.

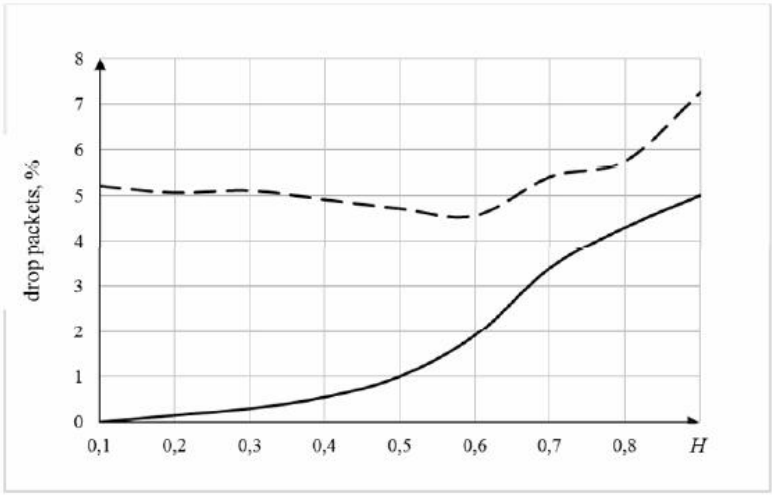

Рисунок 4.3 – Залежність відсотка відкинутих пакетів від коефіцієнта Херста

Деякі програми не здатні нормально функціонувати або функціонують вкрай неефективно у разі втрати пакетів. Подібні програми вимагають від мережі гарантії надійної доставки всіх пакетів.

Відкидання пакетів є неминучим явищем при негарантованій доставці трафіку. Слід також зазначити, що відкинуті пакети вказують на неефективне використання ресурсів мережі, частина яких була витрачена на доставку пакетів у точку, де вони були втрачені.

Моделі негарантованої доставки даних при використанні як алгоритму обслуговування черг стандартної процедури FIFO основною причиною відкидання пакета є переповнення буфера черги. Тому результат експерименту певною мірою може бути інтерпретований як імовірність блокування системи G/D/1 с кінцевим розміром буфера за умови, що символ G в даному випадку означає розподіл Парето.

З графіка на рисунку 4.3 видно, що з значень H від 0,1 до 0,6 спостерігається плавне зменшення кількості відкинутих пакетів. Подальше збільшення параметра Херста призводить до значного зростання кількості втрат пакетів. Мінімальний відсоток втрат спостерігається на H = 0,6 – 4,66%, максимальний відсоток – на H = 0,9 – 7,26%. Таким чином, збільшення втрат пакетів зі зростанням параметра Херста вказує на неефективність роботи алгоритму FIFO для струмів із самоподібністю.

За аналогічною схемою був проведений експеримент у моделі диференційованого обслуговування, коли якість обслуговування визначалося зваженим механізмом довільного раннього виявлення (WRED) [14]. У схемі на рисунку 4.2 замість алгоритму FIFO слід у разі записати алгоритм WRED. Плавне регулювання розміру черги алгоритмом WRED в даному експерименті характеризується наступними параметрами: при розмірі черги рівної 10 пакетів ймовірність відкидання пакетів дорівнює 0, при зміні черги від 10 до 30 пакетів ймовірність відкидання пакетів лінійно зростає до величин набуває значення 1.

Результат експерименту представлений на рисунку 4.3 суцільною (згладженою) кривою. Порівняння кривих на рисунку 4.3 переконливо показує перевагу управління трафіком алгоритмом WRED.

Проаналізуємо ситуацію, пов’язану із спільною передачею TCP та UDP трафіку [49]. І тому розглянемо схему, представлену на рисунку 4.4.

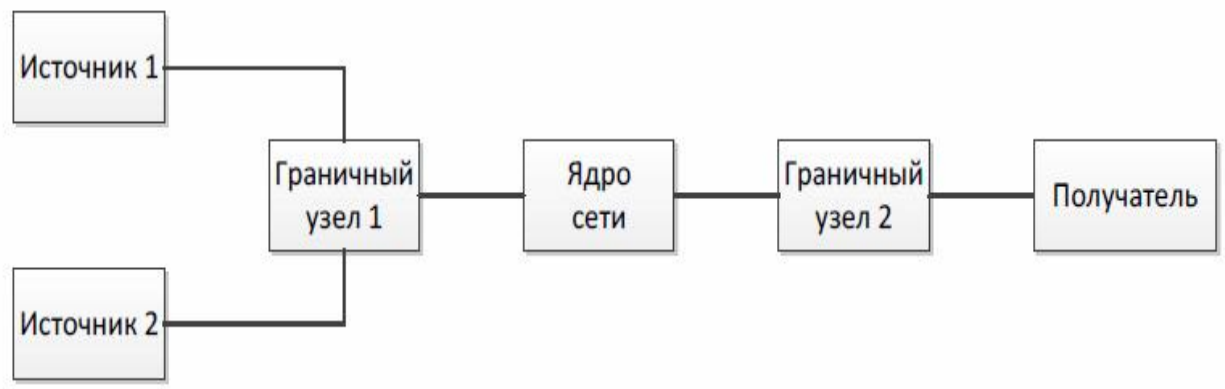

Рисунок 4.4 – Схема моделювання фрагмента мережі

Джерело 1 є генератором трафіку UDP із постійною швидкістю (CBR). Джерело 2 генерує трафік TCP моделі ON/OFF з використанням розподілу Парето при різних значеннях параметра форми.

Обробка результатів моделювання (трейс-файлу) здійснювалася за допомогою програми TraceGraph. З її допомогою була зібрана статистика, що показує величини затримки (мінімальну, середню, максимальну) та джиттера між джерелом 2 та одержувачем [9].

Даний експеримент дозволяє з’ясувати характер залежностей даних параметрів розміру пакета, швидкості потоку та параметра форми трафіку Парето [9]. Деякі результати наведені нижче на рисунках 4.5 - 4.7.

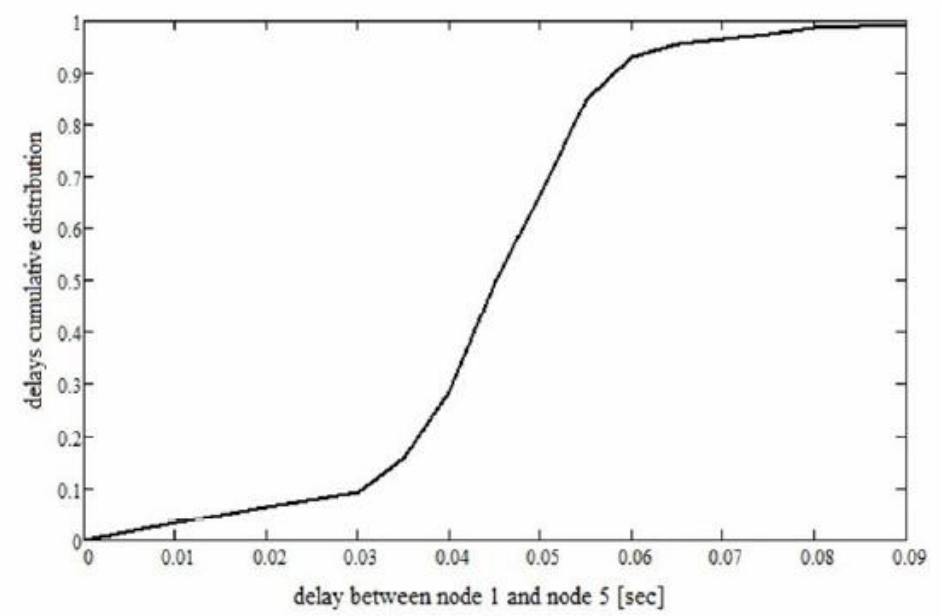

Рисунок 4.5 – Функція розподілу затримки: швидкість потоку 20 Мбіт/с, довжина пакета 1500 байт, параметр форми 3,5

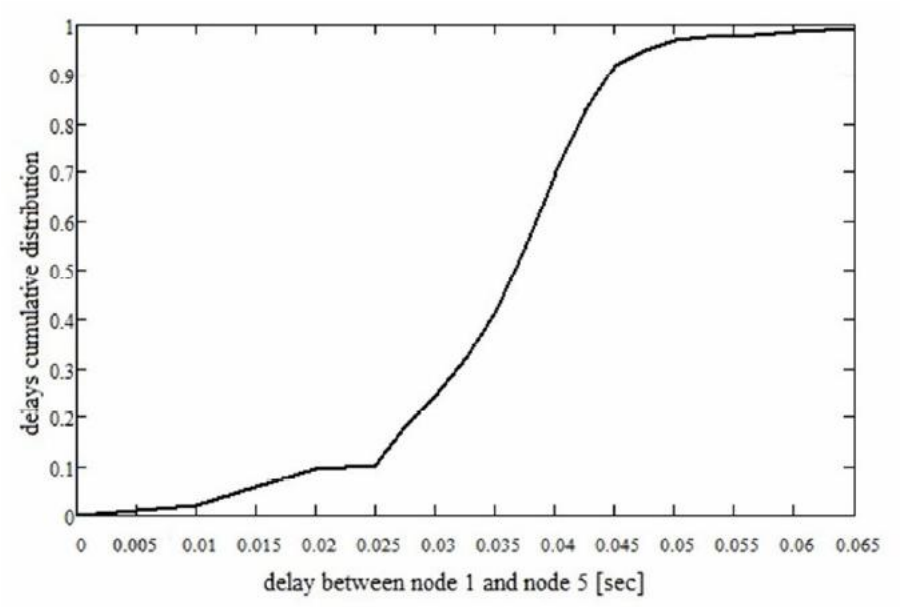

Рисунок 4.6 – Функція розподілу затримки: швидкість потоку 10 Мбіт/с, довжина пакета 1000 байт, параметр форми 1,5

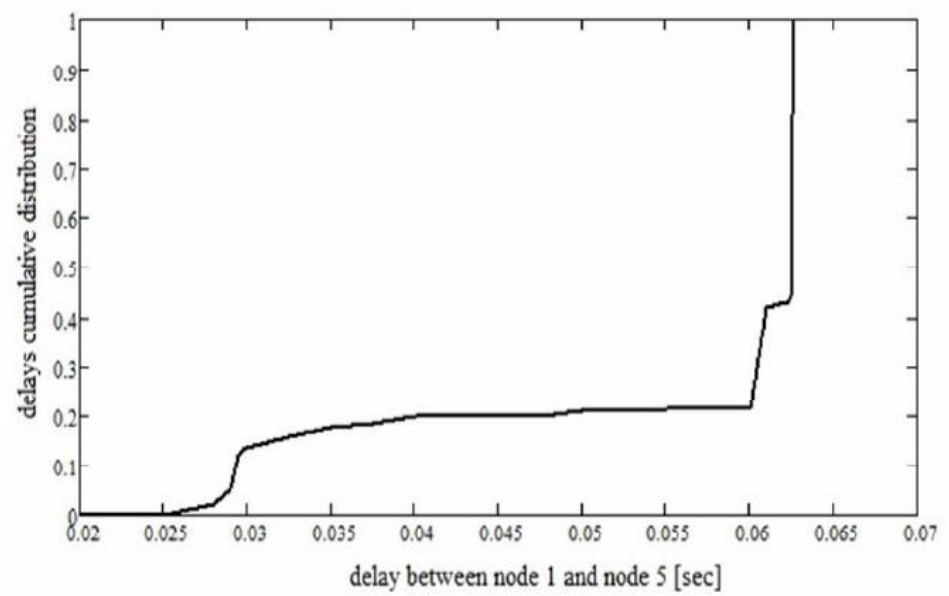

Рисунок 4.7 – Функція розподілу затримки: швидкість потоку 5 Мбіт/с, довжина пакета 1500 байт, параметр форми 1,5

З аналізу наведених графіків випливає, що з швидкості потоку 20 Мбіт/с та 10 Мбіт/с величини затримки розподілені досить рівномірно діапазоні від 0,03 до 0,07 с для різних довжин пакетів. При цьому параметр форми (приймає значення 1,5; 3,5) не надає помітного впливу на аналізовану характеристику.

Для швидкості потоку 5 Мбіт/с виявилося, що функція розподілу затримки має нерівномірний характер. Чим менша довжина пакета, тим менша величина затримки. Параметр форми практично не впливає на цю характеристику.

Цікавим є аналіз залежності затримки між джерелом і одержувачем від часу відправлення пакетів (або, фактично, часу моделювання). Нижче на рисунках 4.8 - 4.12 представлені ці залежності для різних поєднань моделюються параметрів.

З представлених результатів слід, що затримка між одним з джерел і одержувачем має періодичний (пилоподібний) характер з змінюється «частотою» слідування і «амплітудою». Це пов’язано насамперед із генеруванням

трафіку Парето On/Off періодами. На високих швидкостях потоку характер поведінки приблизно однаковий. На розкид значень затримок впливає параметр форми та довжина пакета.

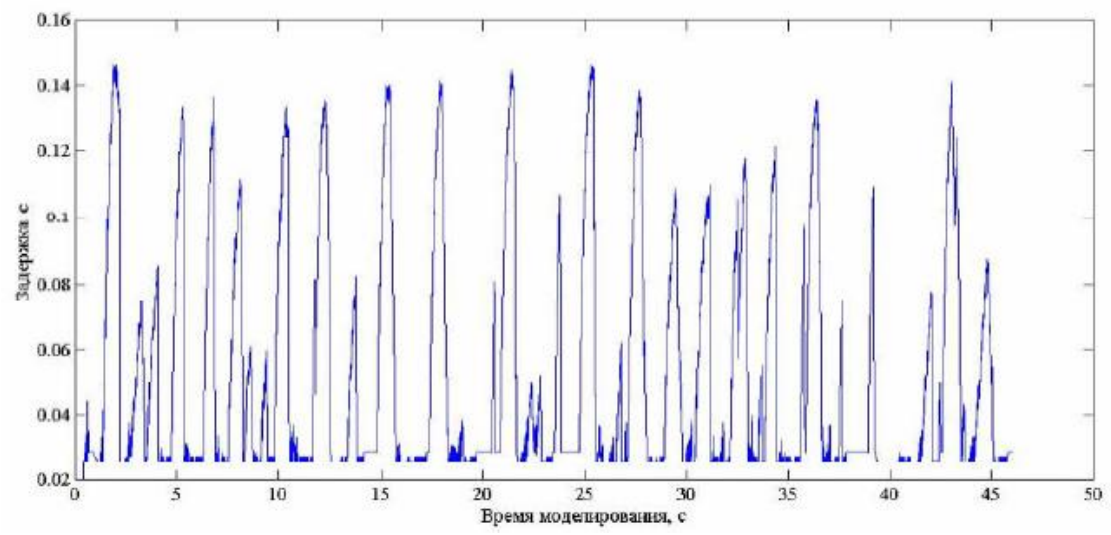

Рисунок 4.8 – Затримка між джерелом та одержувачем: швидкість потоку 20 Мбіт/с, довжина пакета 1500 байт, параметр форми 1,5

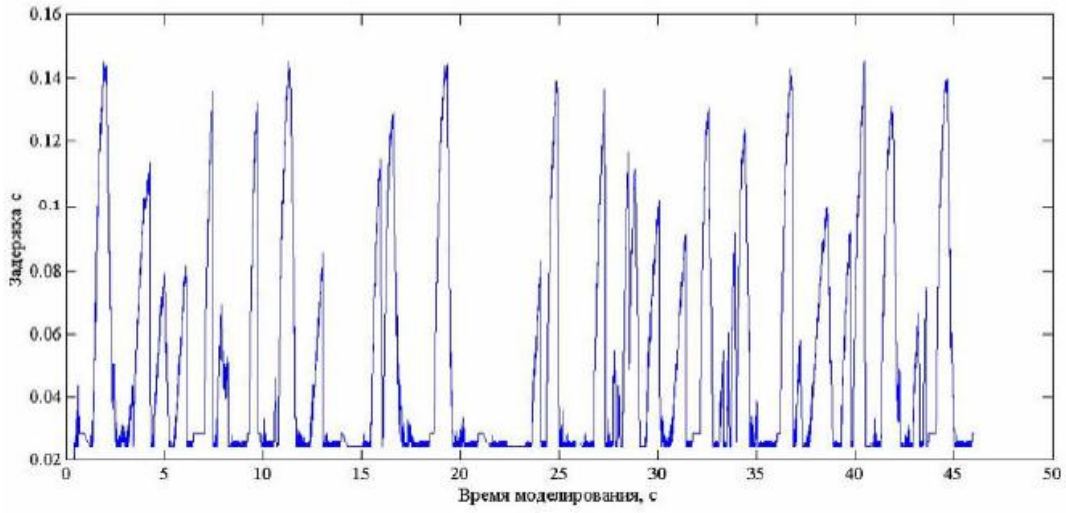

Рисунок 4.9 – Затримка між джерелом та одержувачем: швидкість потоку 20 Мбіт/с, довжина пакета 1500 байт, параметр форми 3,5

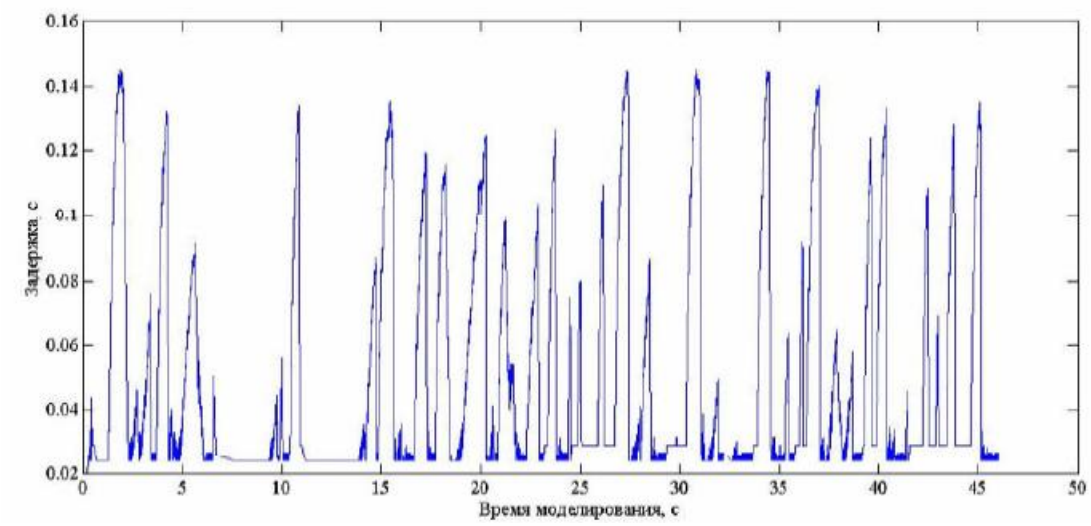

Рисунок 4.10 – Затримка між джерелом та одержувачем: швидкість потоку 10 Мбіт/с, довжина пакета 1500 байт, параметр форми 1,5

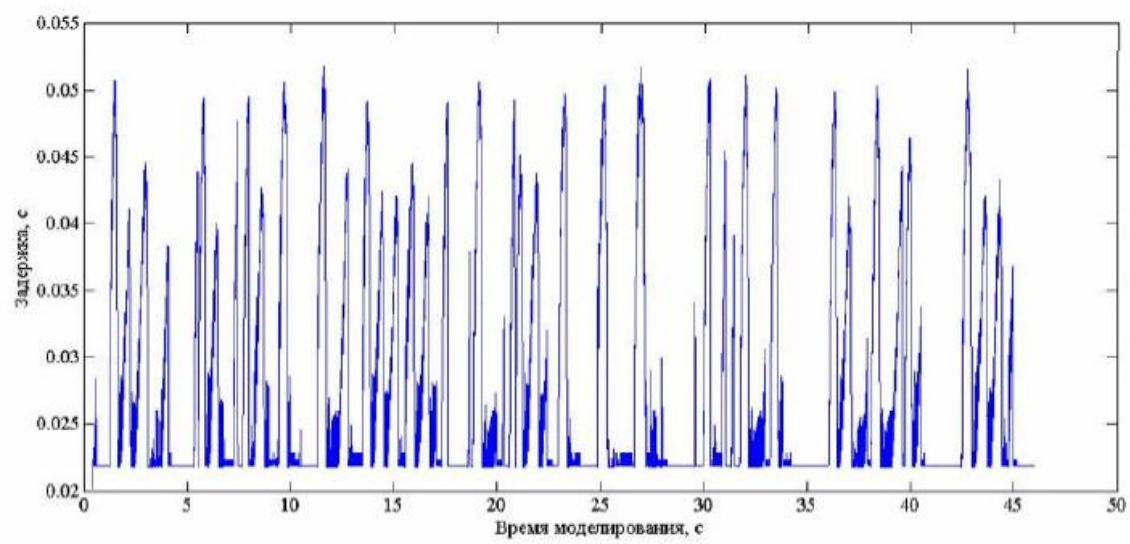

Рисунок 4.11 – Затримка між джерелом та одержувачем: швидкість потоку 10 Мбіт/с, довжина пакета 500 байт, параметр форми 1,5

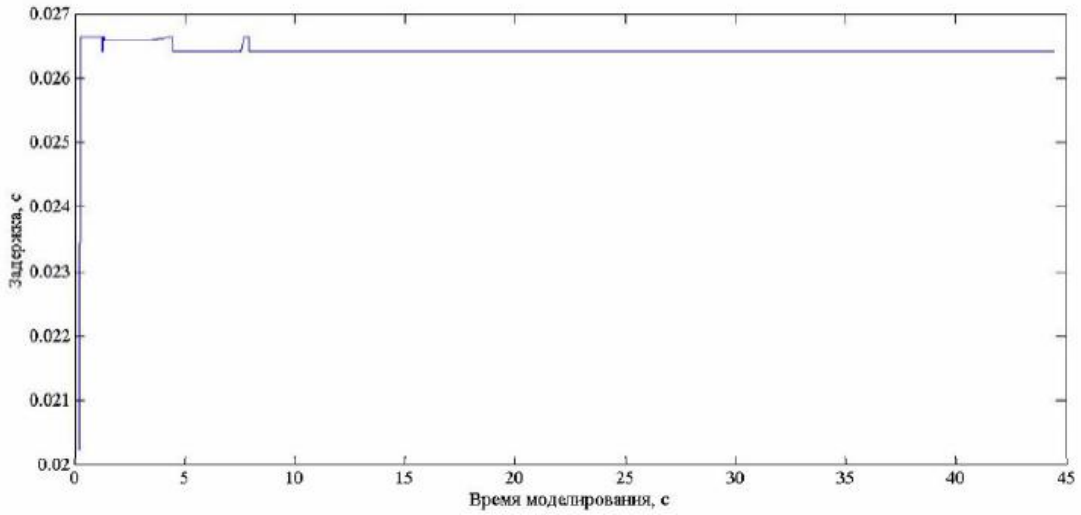

Рисунок 4.12 – Затримка між джерелом та одержувачем: швидкість потоку 5 Мбіт/с, довжина пакета 1000 байт, параметр форми 1,5

Слід зазначити, що характер зміни затримки залежить від швидкості потоку. Якщо для швидкостей 20 Мбіт/с та 10 Мбіт/с відмінності в затримці непомітні для ока, то при швидкості 5 Мбіт/с вони очевидні. Об’єктивну оцінку відмічених змін дає лише статистична обробка результатів моделювання, наведена на рисунках 4.5 - 4.7.

Узагальнюючи висновок по рисунках 4.8 – 4.12 можна назвати, що при збільшенні довжини пакета однієї і тієї ж швидкості спостерігається як збільшення величини затримки, а й розкид її значень між максимальним і мінімальним значеннями. Отже, при виборі довжини пакета необхідно керуватися типом переданого трафіку, його класом обслуговування і чутливістю до затримок. Крім того, для невеликого завантаження мережі (при малих швидкості передачі та довжині пакета) характерне сталість затримки протягом усього часу передачі пакетів [19].

Тепер промоделюємо роботу фрагмента мережі, представленого на рисунку 4.13 [9].

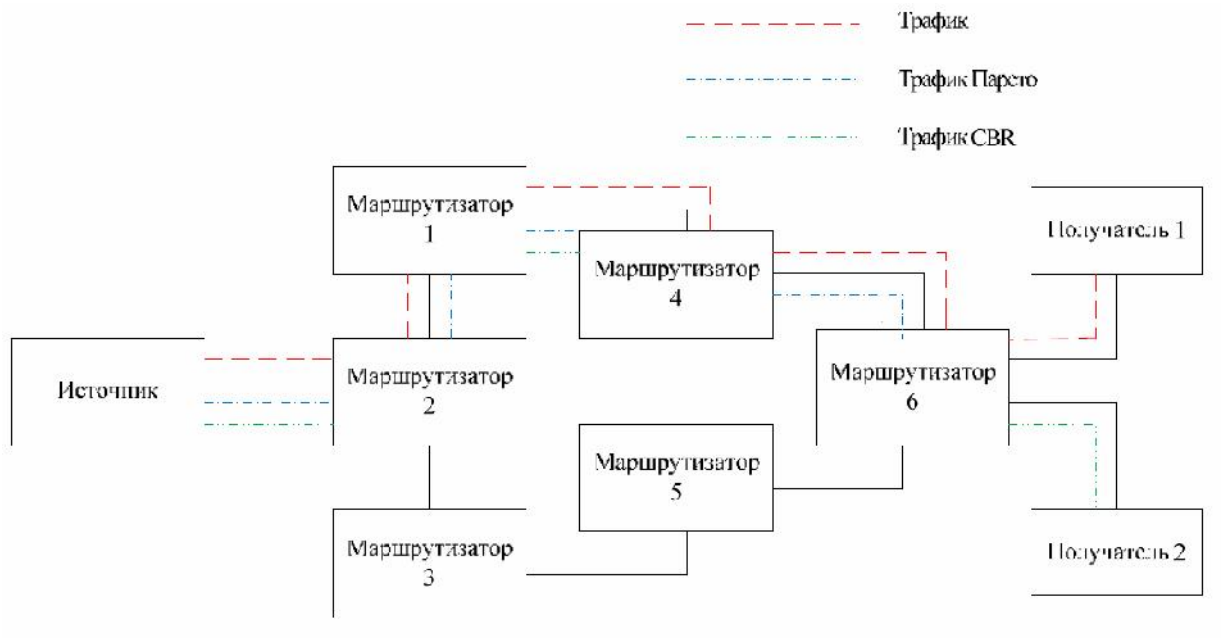

Рисунок 4.13 – Фрагмент мережі, що моделюється

Для імітації ситуації у реальній мережі поруч із обробкою досліджуваного трафіку обробляється фоновий трафік. Фоновим для основного є сполучення CBR (Constant Bit Rate) трафіку з постійною бітовою швидкістю та ON/OFF-трафіку з розподілом Парето ON та OFF періодів.

Досліджуваний трафік передається між джерелом і одержувачем 1. Конкуруючий з цим потоком фоновий трафік передається від джерела до одержувача 2 і реалізується генерацією CBR і ON/OFF-трафіку. Як основний поток обробляється трафік IPTV. Даний трафік, зафіксований в реальній лінії зв’язку, імпортований в симулятор NS2.

Подана схема дозволяє проаналізувати вплив кореляційних властивостей довжин пакетів (через завдання параметра форми розподілу Парето, який задає значення параметра Херста і, отже, кореляційні властивості трафіку) на результати обробки трафіку одержувачем. В експерименті аналізувалися такі параметри якості обслуговування: затримка, джиттер і частка втрачених пакетів.

Для трафіку IPTV зміна затримки пакетів у часі та джиттера в часі наведено на рисунках 4.14 та 4.15 відповідно.

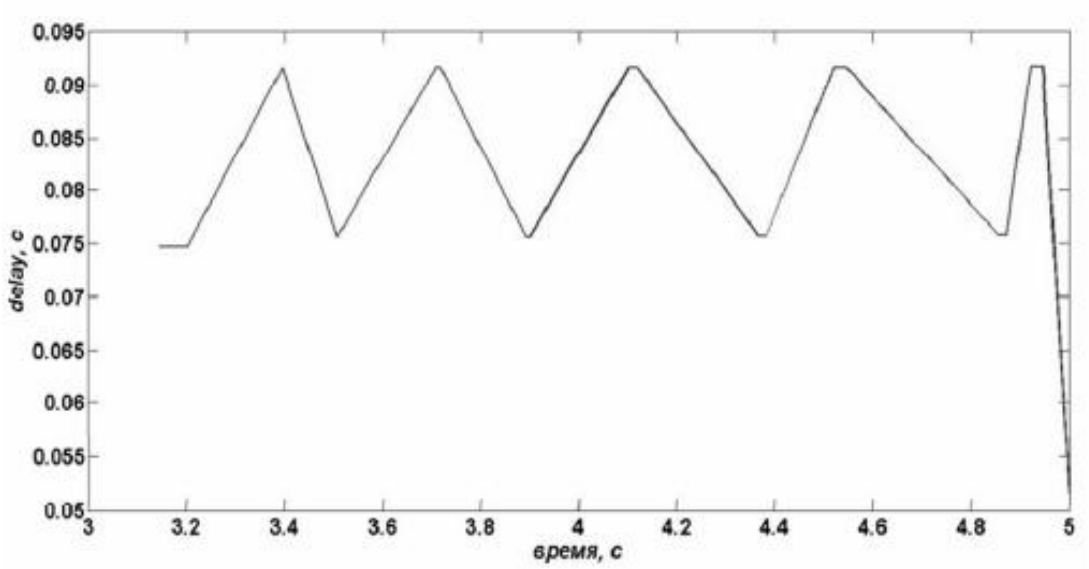

Рисунок 4.14 – Зміна затримки для трафіку мережі IPTV

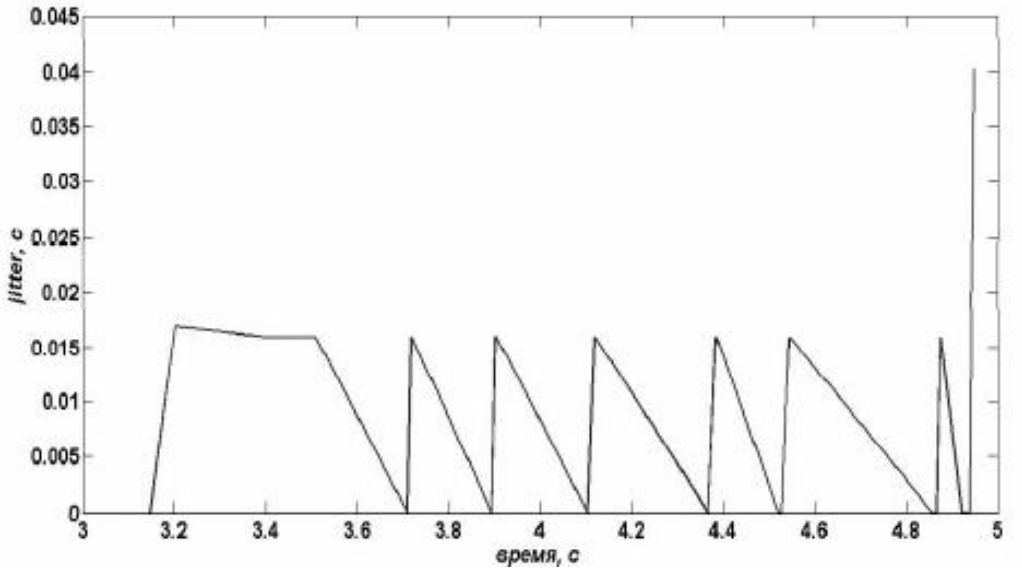

Рисунок 4.15 – Зміна джиттера для трафіку IPTV

Результати моделювання представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Результати моделювання

Параметри QoS	Тип трафіку		
	CBR	ON/OFF з розподілом Парето	IPTV
Затримка, мс	80	91	82
Джітер, мс	5	0,51	8
Можливість втрат, %	0	5	0,3
Можливість скидання, %	6,5	0,3	12

Аналіз результатів моделювання показав, що в процесі обробки трафіку ті параметри QoS, які традиційно використовуються для оцінки ефективності обробки потоків, мало відрізняються для різних моделей трафіка. Найбільш наближені значення параметрів QoS при обробці реального трафіку отримані для фонової моделі у вигляді ON/OFF процесу з розподілом Парето. При цьому такий параметр як ймовірність скидання пакета для корельованого трафіку значно перевищує допустимі значення по QoS.

Як зазначено в документах, що регламентують параметри якості обслуговування в операторських мережах [7], при передачі VoIP трафіку втрати пакетів не повинні перевищувати 0,25%, а при передачі потокового відео - не більше 1%.

Знання цих характеристик дає інформацію для покращення параметрів мережевого управління та підвищення рівня якості обслуговування у мережі.

4.4 Висновки розділу 4

1) Для експериментальної перевірки теоретичних результатів, отриманих у розділах 2 та 3, здійснено вибір платформи моделювання фрагментів МСП виходячи з критеріїв:

- детальна реалізація протоколів функціонування мереж,

- можливість написання та підключення власних модулів,
- можливість зміни параметрів моделювання під час проведення експериментів,
- платформна незалежність,
- розвинений графічний інтерфейс, - ціна товару.

У результаті в якості платформи моделювання обраний вільно розповсюджуваний об’єктно-орієнтований програмний продукт NS2, ядро якого реалізовано мовою C++.

2) Для аналізу ступеня впливу самоподібності трафіку на рівень втрати пакетів поставлено експеримент для моделі негарантованої доставки даних (з управлінням черги алгоритмом FIFO) та моделі диференційованого обслуговування (з управлінням чергою алгоритмом WRED).

При використанні розподілу Парето для інтервалів часу між пакетами та постійним часом обслуговування пакетів у моделі негарантованої доставки даних показано, що при збільшенні параметра Херста H в інтервалі значень від 0,1 до 0,6 спостерігається збільшення кількості втрачених пакетів. Мінімальний відсоток втрат спостерігається на H = 0,6 – 4,66%, максимальний відсоток – на H = 0,9 – 7,26%. Збільшення втрат пакетів зі зростанням параметра Херста вказує на неефективність роботи алгоритму FIFO для потоків із самоподібністю.

У моделі диференційованого обслуговування при H = 0,6 губиться в середньому 2% пакетів, при H = 0,9 - 5%.

3) Моделювання варіанта спільної передачі TCP і UDP (CBR) трафіка (TCP – трафік Парето) показало, що затримка пакетів у моделюваному фрагменті мережі в діапазоні швидкостей потоку від 20 Мбіт/с до 10 Мбіт/с затримки розподілені рівномірно в діапазоні від 0,03 до 0,07 с при різних довжинах пакетів. Значення параметра форми розподілу Парето у своїй не надає істотного впливу затримку.

Для швидкості потоку 5 Мбіт/с інтегральна функція розподілу затримки має нерівномірний характер, що характеризує можливо стрибкоподібний

характер зміни затримки.

Залежність затримки між джерелом і одержувачем від часу відправлення пакетів має циклічний характер зі змінною «частотою» слідування і «амплітудою».

4) Розглянута схема експерименту, в якій конкуруючий з основним IPTV-трафіком фоновий трафік передається від джерела до одержувача і реалізується генерацією CBR і ON/OFF-трафіку (трафік IPTV імпортований в NS2 з реальної лінії зв’язку). Аналіз зміни затримки пакетів і джитера показав, що в процесі обробки трафіку ті параметри QoS, які традиційно використовуються для оцінки ефективності обробки потоків, мало відрізняються для різних моделей трафіку (IPTV, CBR та ON/OFF-трафіку). Найбільш наближені значення параметрів QoS при обробці реального трафіку отримані для фонової моделі у вигляді ON/OFF процесу з розподілом Парето. При цьому, такий параметр, як ймовірність скидання пакета, для корельованого трафіку IPTV значно перевищує допустимі значення QoS.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено аналіз існуючих моделей трафіку та методів його обробки, заснованих на класичній теорії масового обслуговування. При цьому встановлено, що в сучасних інфокомунікаційних мережах трафік, як випадковий процес, має самоподібні властивості, що характеризується явно вираженими кореляційними властивостями інтервалів часу між заявками та інтервалів часу обробки заявок у вузлах мережі, та розподілу ймовірностей зазначених інтервалів мають "важкі" хвости.

З використанням регресійного аналізу встановлено, що позитивні значення коефіцієнтів кореляції породжують процес утворення пачок заявок, тоді як негативні значення коефіцієнтів кореляції призводять до зворотної тенденції.

У разі, коли послідовності зазначених інтервалів незалежні, для аналізу середнього часу очікування заявки в черзі системи масового обслуговування загального виду доцільно використовувати інтегральне рівняння Ліндлі, рішення якого спектральним методом може бути легко знайдено при апроксимації щільностей ймовірностей тимчасових інтервалів рядами загасаючих експонент (зокрема, гіперекспоненціальним або ерлангівським розподілом).

Відповідно до мети кваліфікаційної роботи та поставлених задач дослідження у роботі отримані наступні результати:

1) Для обліку кореляційних властивостей тимчасових інтервалів у роботі використані моделі трафіку у вигляді оновлюючих процесів (процесів відновлення) з гіперекспоненціальними розподілами. Облік кореляційних властивостей здійснюється через індекс дисперсії часових інтервалів, що визначається сумою всіх значущих коефіцієнтів кореляції послідовності часових інтервалів.

2) Для трафіку, що володіє самоподібними властивостями, розроблена методика оцінювання середнього часу очікування заявки в черзі для системи

масового обслуговування загального виду, заснована на вирішенні інтегрального рівняння Ліндлі спектральним методом з використанням моделі самоподібного трафіку у вигляді процесу відновлення з гіперекспоненціальним розподілом миттєвих значень інтервалів часу між заявками.

3) Для оцінки впливу розміру черги на пропускну здатність системи масового обслуговування (або ймовірність блокування) використана модель самоподібного трафіку у вигляді рандомізованого пуассонівського потоку, у якого інтенсивність змінюється при зміні стану системи.

Для перевірки результатів, отриманих аналітичним шляхом, у роботі проведено імітаційне моделювання процесів передачі та обробки трафіку вузлами мережі із заданими характеристиками на симуляторі NS2. Моделювання показало якісний збіг теоретичних і експериментальних результатів.

Перспективний напрямок подальших досліджень з тематики кваліфікаційної роботи пов’язаний із розробкою системи оперативного моніторингу трафіку стану вузлів мереж спеціального призначення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Іванісенко І.М, Мазепа К.М. Дослідження моделей управління транспортною мережею IP/MPLS // Тези доповідей восьмої міжнародної науково–технічної конференції.– Черкаси–Харків–Баку–Бельсько–Бяла:2021,– Т.1.–с. 112.

2. Автокорреляционная функция. Примеры расчётов [Электронный ре-сурс]. – Режим доступа: http://www.newreferat.com/ref-671-1.html, свободный.

3. Аджемов, А.С., Васильев А.Б., Кучерявый А.Е. Перспективные направ-ления развития сетей связи общего пользования // Электросвязь. – 2008 – № 10 –6-7.

4. Александров А.М. Один метод исследования систем массового обслу-живания // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика - 1971.- № 3. С. 105-115.

5. Александров А.М. Рандомизированные модели цифрового телетрафика. Электросвязь. № 6. 2010. С.41-44.

6. Анализ свойства самоподобия трафика веб-ресурса [Электронный ре-сурс]. – Режим доступа: http://morozov.krc.karelia.ru/articles/kp/, свободный.

7. Аппроксимация функций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://physics.herzen.spb.ru/library/01/01/nm_labs/approximation.htm, свободный.

8. Архив документации на OpenNet.ru / Раздел «Cisco маршрутизаторы и коммутаторы». [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.mpls-exp.ru/ispqoscisco.html, свободный. – Загл. с экрана.

9. Бельков Д.В., Едемская Е.Н. Анализ сетевого трафика методом агрегирования [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ea.donntu.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/3247/1/Анализ%20сетев

ого% 20трафика%20методом%20агрегирования.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

10. Беляев С.О., Буранова М.А. Анализ характеристик трафика сети специального назначения // XVII МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – 2016, Самара. - С. 260-261.

11. Букашкин С.А., Тучкин А.В. Особенности пакетной передачи различ-ных видов трафика по каналам с небольшой пропускной способностью // Радио-техника. – 2014. – №4. – С.37-42.

12. Буранова М.А. Исследование статистических характеристик само-по-добного телекоммуникационного трафика // Инфокоммуникационные техноло-гии. – 2012. – №4. – Том 10. – С. 35-41.

13. Буранова М. А., Карташевский В. Г. Анализ времени ожидания для уз-ла сети типа G/D/1 при неточном знании параметров трафика // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Том 5. № 1. С. 24–33.

14. Буранова М.А, Карташевский В.Г., Самойлов М.С. Анализ статистиче-ских характеристик мультимедийного трафика узла агрегации в мультисервисной сети / // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – №4. – С. 63-69.

15. Буранова М.А., Карташевский В.Г., Самойлов, М.С. Сравнительный анализ статистических характеристик видеотрафика в сетях пакетной передачи данных // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – №4. – Том 12. – С. 33-38.

16. Буранова М.А., Карташевский, В.Г. Влияние механизмов управления QOS на показатели качества обслуживания мультимедийного трафика сети Internet // T-Comm. – 2013. – №8. – С. 54-60.

17. Буренин А.Н., Легков К.Е. К вопросу математического описания пото-ков управляющей информации в процессе управления современной инфокомму-никационной сетью специального назначения // Наукоемкие технологии в косми-ческих исследованиях земли. 2013. №5.- С.8-12.

18. Буренин А.Н., Легков К.Е., Нестеренко О.Е. К вопросу построения

си-стем управления современными инфокоммуникационными сетями специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2013. – Т. 6, №6. – С. 22–28.

19. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS [Текст] / Научно-техн. изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. - 304 с.: ил.

20. Гончаренко В.А. Анализ реактивности узла вычислительной сети в условиях интервальной неопределенности // Изв. Вузов. Приборостроение, 2008, Т.51. №7. С. 34-39.

21. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и про-изведений. - М.: Наука, 1971, 1108 с.

22. Гуда А.Н., Бутакова М.А., Москат Н.А. Модели оценки параметров те-лекоммуникационного трафика в автоматизированных информационно-управляющих системах [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://vernadsky.tstu.ru/pdf/2010/02/12.pdf, свободный.

23. Данилов, А.Н., Кайюмов С.Т. Анализ методов оценки параметров тра-фика мультисервисной сети доступа // T-Comm. –2011. – №3 – С. 38-39.

24. Деарт В.Ю., Кожухов И.С. Исследование параметров качества обслуживания (QoS), определяющих качество восприятия пользователем (QoE) по-токового видео при передаче через Интернет // T-Comm. – 2013. –№7.