МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РОМАНЧУК ВАСИЛЬ ІВАНОВИЧ

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант –
Климаш Михайло Миколайович,
д.т.н., професор

Ідентичність всіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:
Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради **/І.В. Демидов/**

Львів – 2018

АНОТАЦІЯ

Романчук В.І. Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська Політехніка» МОН України, Львів, 2018.

Дисертаційну роботу присвячено проблематиці адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі приймаючи до уваги цільове призначення бізнес-процесів, флуктуаційний характер та пікові значення інтенсивностей потокового навантаження різних типів, що в процесі динамічного програмного конфігурування ресурсів забезпечило б виконання вимог до продуктивності мережі, оперативності доставки даних і якості обслуговування користувачів.

В роботі продемонстровано передумови для виникнення протиріччя між можливостями сучасних систем управління якістю послуг і реальними потребами користувачів, орієнтованими на конкретні послуги.

У дисертаційній роботі представлено розв’язання актуальної наукової проблеми забезпечення оперативності обміну інформацією в мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж на основі створення методу адаптивного управління структурними параметрами мережевих пристроїв та розроблення математичних моделей і алгоритмів обслуговування черг для покращення якості надання інформаційних послуг.

У першому розділі проведено огляд мережевих протоколів і механізмів забезпечення якості обслуговування показав, що поряд з маршрутизацією, резервуванням ресурсів, маркуванням і класифікацією пакетів, профілюванням трафіку, важливе місце в архітектурі QoS відводиться технологічним засобам управління чергами, які відповідають за їх формування та контроль

перевантаження. Саме неефективне управління чергами призводить до неконтрольованого зростання затримок, джитера і рівня втрат пакетів. Встановлено, що ключовим недоліком відомих механізмів управління чергами є переважання ручних налаштувань в ході конфігурації обладнання, що не дозволяє оперативно реагувати на зміну стану (завантаженості) інтерфейсів маршрутизатора та мережі в цілому, а також на варіацію характеристик трафіку. На основі проведеного аналізу можна зробити висновок про необхідність розробки нових моделей і методів адаптивного управління потоками даних та мережевими ресурсами, спрямованих на забезпечення ефективної роботи мультисервісної мережі.

Другий розділ роботи присвячено розробленню моделей, методів і алгоритмів підвищення якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж. А саме формалізовано завдання адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі. Удосконалено метод управління чергами на інтерфейсах мережевих вузлів. Розроблено структурно-функціональну модель статичної та динамічної віртуалізації обчислювальних ресурсів мережного пристрою. Розроблено метод декомпозиції структури мережного маршрутизатора з віртуалізацією; Запропоновано метод виявлення аномалій мережевого трафіку корпоративної мережі.

У третьому розділі виконано моделювання та дослідження впливу управління ресурсами мультисервісних корпоративних мереж на якість надання інфокомунікаційних послуг. Дослідження показують, що на даний момент не існує універсальної технології QoS, здатної задовольнити одночасно всі вимоги для побудови мультисервісних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж зв'язку. Досліджено вплив конфігурації мережевих пристроїв на якість обслуговування послуг засобом Packet tracer та OpNet modeler. Аналіз отриманих результатів моделювання, показав, що найкращим механізмом

надання гарантованої якості обслуговування є Int-DiffServ. Проведено оцінку параметру Херст, яка підтвердила високу ступінь самоподібності, характерну для мультисервісного трафіку. Проведено імітаційне моделювання обслуговування мережевого трафіку із параметрами, що відповідають реальним мультисервісним мережам, обрахунок якісних показників кожного типу потоку та розроблено алгоритм побудови імітаційної моделі вхідного трафіку, характеристики яких наближаються до характеристик реальних потоків даних. Розроблено імітаційну модель обслуговування послуг в мережевих вузлах з реалізацією удосконаленого алгоритму управління чергами. Для підтвердження адекватності запропонованої імітаційної моделі проведено аналіз агрегованого трафіку корпоративної мультисервісної мережі.

В четвертому розділі роботи розроблено імітаційну структурно-функціональну модель мережевого пристрою з віртуалізацією ресурсів. Проведено моделювання та порівняння систем обслуговування інформаційних потоків з статичною та динамічною реконфігурацією ресурсів маршрутизатора з обробкою пакетів за порядком черги FIFO на базі імітаційної моделі. На основі отриманих залежностей визначено обсяг необхідних ресурсів обслуговуючого вузла для забезпечення встановленого рівня часових показників якості обслуговування при розгортанні віртуальних маршрутизаторів. Аналогічно порівнювалась запропоновані способи віртуалізації мережевого пристрою із системою пріоритетного обслуговування потоків. Досліджено вплив методу управління структурними параметри віртуальних маршрутизаторів на якість обслуговування потоків корпоративної мережі. Підвищено достовірність оцінки допустимої кількості віртуальних вузлів мультисервісної мережі в залежності від використовуваного типу послуг і цільової групи користувачів. Оцінено часові параметри QoS мультисервісної віртуальної корпоративної інфраструктури із застосуванням методу декомпозиції структури віртуального маршрутизатора в залежності від конфігурації та завантаженості вузлів мережі.

У п’ятому розділі для оцінки ефективності запропонованих рішень у роботі, створено віртуальну тестову платформу корпоративної мережі нового покоління з використанням інструменту QtCreator (версія 5.2). Щоб повністю абстрагуватися від канального рівня, створено віртуальний IP-пакет, з яким можуть працювати вузли тестової платформи. На основі розробленої програмно-апаратної платформи, розроблено модель віртуалізованого програмно-керованого маршрутизатора, яка володіє функцією адаптивного вибору алгоритму обслуговування черг в умовах нестаціонарності потоку. Адекватність розроблених моделей підтверджено на основі дослідження імовірнісних властивостей трафіку мультисервісної корпоративної мережі та оцінки тривалостей обслуговувння пакетів з реальними апаратними маршртизаторами.

Шостий розділ роботи присвячений опису технічних аспектів впровадження віртуальних маршрутизаторів в мультисервісній інфраструктурі. Розглянуто структурну декомпозицію топології мультисервісної мережі на віртуальні моно сервісні та їх переваги у функціонуванні. Проведено опис розгортання віртуальних маршрутизаторів на одному фізичному на основі гнучкого розподілу віртуального часу доступу до процесора. Розроблено програмну модель маршрутизатора з набором сучасних механізмів та алгоритмів обслуговування інформаційних потоків. На основі програмної моделі маршрутизатора розширено набір функціональних можливостей пристрою режимом адаптивного розгортання віртуальних вузлів з можливістю гнучкого управління структурними параметрами. Створено UML-діаграму побудови імітаційної моделі програмного маршрутизатора з віртуалізацією. Проведено дослідження якості обслуговування потокового трафіку на основі розробленої моделі програмного маршрутизатора з можливістю розгортання віртуальних обслуговуючих пристроїв класового призначення. Порівняно часові показники якості обслуговування IPTV потоку при використанні технології віртуалізації мережевого пристрою з існуючим алгоритмом

справедливого обслуговування. Проведено експеримент для оцінки ефективності запропонованих рішень та впливу на якість сприйняття клієнт-орієнтованої послуги. Встановлено, що запропонована технологія динамічної віртуалізації мережевого пристрою та метод управління чергами дає змогу в процесі динамічного програмного конфігурування ресурсів забезпечити виконання вимог до продуктивності мережі, оперативності доставки даних і якості обслуговування корпоративних користувачів.

Ключові слова: мультисервісна мережа, якість обслуговування, розподіл ресурсів, буфер, віртуалізація, маршрутизатор, самоподібність, функціонально-орієнтована корпоративна мережа.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Климаш Михайло Миколайович. Сучасні перетворення в архітектурах розподілених систем: монографія / М.М. Климаш, А.О. Лунтовський, В.І. Романчук. – Львів-Дрогобич: Коло, 2015. – 328 с.

2. Климаш М.М. Завади в транспортних DWDM мережах / М.М. Климаш, В.І. Романчук, Ю.Д. Добуш. – Львів, 2010. – 192 с.

3. Demydov I. Traffic Fluctuations Optimization for Telecommunication SDP Segment based on Forecasting using Ateb-functions: / I. Demydov, I. Dronyuk, O. Fedevych, V. Romanchuk // In: N. Kryvinska and M. Greguš, ed. Data-centric business and applications. Evolvements in business information processing and management. Series: Lecture notes on data engineering and communications technologies. Berlin: Springer International Publishing, 2018. – Vol. 20, pp. 71-88. DOI: 10.1007/978-3-319-94117-2_4, ISSN 2367-4512 (Scopus)

4. Maksymyuk T. Designing the New Backhaul for 5G Heterogeneous Network Based on Converged Optical Infrastructure / T. Maksymyuk, O. Krasko, M. Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy// Acta Electrotechnica et Informatica, 2017. – Vol. 17, No. 4. – pp. 9–12, DOI: 10.15546/aeei-2017-0028. (Index Copernicus)

5. Romanchuk V. Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT / Vasyl Romanchuk, Mykola Beshley, Andriy Prislupskiy, Halyna Beshley, Oleksiy Panchenko// Internet of Things (IoT) and Engineering Applications, Clausius Scientific Press, Canada. – 2018. –Vol.3. – pp. 22-23. (CrossRef)

6. Romanchuk V. Development of software-based router model with adaptive selection of algorithms for queues servicing / V. Romanchuk, M. Klymash, M. Beshley, O. Panchenko, A. Polishchuk // Technology audit and production reserves. – 2018. - №3/2(41). - pp. 46-55. ISSN 2226-3780. (Index Copernicus, EBSCO)

7. Климаш М.М. Розроблення програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів / М.М. Климаш, В.І. Романчук, О.М Панченко, М.І. Бешлей, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. Політехніка». – 2017. – № 766. –С. 76 – 85. (Index Copernicus, Google scholar)

8. Бешлей М.І. Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритезації потоків у маршрутизаторах / М.І. Бешлей, В.В. Червенець, І.В. Демидов, В.І. Романчук, О.М. Панченко// Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал - Х: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. - 2016. –№5(142) - С. 114-123. (Index Copernicus, Google scholar)

9. Романчук В. І. Аналіз структури мережевого трафіку та мережевих аномалій на прикладі сегмента локальної мережі кампусу Національного університету “Львівська політехніка”/ В. І. Романчук, С. В. Алексєєв, В. В. Червенець, Р. С. Колодій // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2014. - № 796. - С. 157–163. (Index Copernicus, Google scholar)

10. Стрихалюк Б.М. Дослідження статистичних параметрів та характеристик інформаційних потоків в гетерогенних мережах / Б.М.Стрихалюк, І.В. Демидов, В.І Романчук, М.І. Бешлей // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. – №6(34). – С. 82-92.

11. Кільменінов О.А. Моделювання роботи маршрутизатора з віртуалізацією при заданих параметрах якості потокового трафіку / О.А. Кільменінов, В.І. Романчук// Наукові записки УНДІЗ. – 2017. – №4(48). – С. 12-17.

12. Романчук В.І. Аналіз імовірнісних характеристик трафіку інфокомунікаційної корпоративної мережі / В.І. Романчук, О.А. Лаврів, А.В. Поліщук, Р.І. Бак // Зб. наук. пр. УАД. – Львів, 2011. – Вип. 26, С. 145-151.

13. Климаш М. М. Матричний метод аналізу оптичних транспортних мереж зі спектральним ущільненням каналів / М. М. Климаш, В. І. Романчук // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2007. - № 595. - С. 92-98.

14. Андрухів Т. В. Моделювання повністю оптичних мереж зі спектральним ущільненням каналів / Т. В. Андрухів, В. І. Романчук, А. В. Поліщук // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2008. - № 618. - С. 145-152.

15. Романчук В.І. Покращення якості надання телекомунікаційних послуг в міських транспортних мережах з кодовим розділенням каналів / В.І. Романчук, Т.В. Андрухів, М.М Климаш // Зб. наук. пр. Комп’ютерні технології друкарства. – Львів, 2009. – №22. – С. 76 - 82.

16. Романчук В.І. Дослідження технології IP/MPLS при різних мережевих топологіях / В.І. Романчук, Ю.В. Антонюк, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2009. – № 645. – С. 95-103.

17. Романчук В.І. Моделювання міських мультисервісних мереж / В.І. Романчук, Ю.В Мітіхін, Р.С. Колодій, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та

телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2011. – № 705. – С. 152-158.

18. Чернихівський Є.М. Оцінка і управління якістю сприйняття послуги (QoE) в телекомунікаційних мережах / Є.М. Чернихівський, М.І. Кирик, В.І. Романчук, В.В. Червенець // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2010. – № 680. – С. 132–135.

19. Климаш М.М. Дослідження та моделювання роботи Gigabit Ethernet комутатора транспортних оптичних мереж / М.М. Климаш, В.І. Романчук, Б.М. Стрихалюк // Вісник «Радіоелектроніка та телекомунікації». – 2004. - № 508. - С. 152-157.

20. Романчук В.І. Дослідження методів оцінювання якості сприйняття послуг для різних типів рафіку телекомунікаційних мереж / В.І. Романчук, М.М. Климаш, Б.В. Янишин // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2012. - № 738. - С. 165-172.

21. Романчук В.І. Метод узгодженого розв’язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами мережевих пристроїв / В.І Романчук, М.І. Бешлей, О.М. Панченко, А.В. Поліщук // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку. - 2018. - №2(50). - С. 48-57.

22. Бешлей Г.В. Метод декомпозиції структури мережного пристрою з віртуалізацією ресурсів / В. І. Романчук, М. І. Бешлей, А. М. Прислупський, Г.В. Бешлей // Наукові записки [Української академії друкарства]. – 2018. - №1(56). – С. 31-42.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

23. Chervenets V. QoS/QoE Correlation Modified Model for QoE Evaluation on Video Service / V. Chervenets, V. Romanchuk, H. Beshley, A.Khudyy // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science

Proceedings of the XIII th International Conference TCSET'2016 (Lviv – Slavske) 2016.– P. 664-666. (Scopus)

24. Romanchuk V. Research of Multimedia Streaming Transmission in Multiservice Networks / V. Romanchuk, V. Chervenets, A. Polishuk // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 39. (Scopus)

25. Romanchuk V. Development the Methods of Conversion to Photonic Transport Networks / V. Romanchuk, O. Krasko, O. Koretsky // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 258. (Scopus)

26. Romanchuk V. The Main Causes of Failures SQL Server / V. Romanchuk, T. Andrukhiv, I. Kahalo // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 258. (Scopus)

27. Beshley M. Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization / M. Beshley, V. Romanchuk, V. Chervenets and A. Masiuk // 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016, pp. 1-3. (Scopus)

28. V. Romanchuk. Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes / V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and A. Polishchuk / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 295-298. (Scopus)

29. Chervenets V. Quality increasing of traffic flow transferring in multiservice networks / V. Chervenets, V. Romanchuk, O. Puha and O. Bilyk / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 274-277. (Scopus)

30. Chervenets V. Investigation and Simulation of System for Data Flow Processing in Multiservice Nodes Using Virtualization Mechanisms / M . Klymash, V. Romanchuk, M. Beshley and and A. Polishchuk // 2017 IEEE First Ukraine Conference on electrical and computer engineering (UKRCON). - pp. 989-992. (Scopus)

31. Romanchuk V. Telemedicine system model using Internet-technology / V. Romanchuk, T M. Klymash, V. Krasko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2010 (Lviv – Slavske, February 23–27), 2010. - P. 259. (Scopus)

32. Polishchuk A. Research Methods to Provide Services in NGN / A. Polishchuk, E. Chernykhivsky, V. Chervenets, V. Romanchuk// Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the Xth International Conference TCSET'2010. Lviv – 2010, P. 238. (Scopus)

33. Beshley M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network testbed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko, A. Masiuk // Proceedings of XIIIth international conference"The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics" CADSM'2015 (24-27 February, Lviv-Poljana, Ukraine), 2015. - P. 1-4. (Scopus)

34. Romanchuk V. Method for processing multiservice traffic in network node based on adaptive management of buffer resource / V. Romanchu M. Beshley, A. Polishuk and M. Seliuchenko // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018), Lviv-Slavske, 2018, pp. 1118-1122. (Scopus)

35. Романчук В.І. Аналіз методів оцінювання та контролю у Віртуальному навчальному середовищі Львівської політехніки / В.І. Романчук // Інноваційні комп'ютерні технології у вищій школі : матеріали науково-практичної конференції, 18–19 лютого 2010 року, Львів / Національний університет "Львівська політехніка". – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – С. 36–40.

36. Червенець В. В. Модель віртуального маршрутизатора з статичною та динамічною реконфігурацією ресурсів / М. І Бешлей, В. В. Червенець, В. І. Романчук, А. В. Поліщук // Х Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції (19-22 квітня 2016р., м. Київ, Україна), 2016 - К.: НТТУ «КПІ». – С. 140-142.

37. Романчук В. Дослідження імовірнісних властивостей трафіку корпоративної мультисервісної мережі / В. Романчук, В. Червенець // Комп'ютерні науки та інженерія, матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2011 – Львів. – 2011. – С. 220–221.

38. Романчук В. Реалізація QoS для мультимедійного трафіку в корпоративній мережі / В.І. Романчук, В.В. Червенець. // Матеріали НМК "Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011". – Львів – 2011. – С. 17 – 20.

39. В.І. Романчук. Дослідження динамічних методів маршрутизації на транспортний мережі / В.І. Романчук // Матеріали конференції "Інноваційні комп'ютерні технології у вищій школі". – Львів, 2010. – С. 30-33.

40. В.І. Романчук. Перехід до фотонних мереж / В.І. Романчук, О.В. Красько // Наукова практична конференція "Сучасні проблеми телекомунікації -2011". – Львів 2011. – С. 17-21.

41. В.І. Романчук. Аналіз методів передачі трафіку реального часу в телекомунікаційних мережах / В.І. Романчук, О.А. Лаврів, А. В. Поліщук // Міжнародна конференція "Телекомунікаційні системи і технології" (МКТСТ'2011), 18-21 жовтня 2011р. - Харків, Україна. - С. 121 – 124.

42. В.І. Романчук. Дослідження передавання інформаційного навантаження потокового мультимедіа / В.І. Романчук, В.В. Червенець, А.В. Поліщук // Наукова-методична конференція "Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій -2012".– Львів, 2012. – С. 71-72.

43. В.І. Романчук. Моделювання перехресних завад в DWDM системах / В.І. Романчук, О.В. Корецький // Наукова-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2012”.– Львів, 2012. – С. 68-70.

44. Beshley M. Method of Resource Distribution for Mobile Cloud Computing Systems. / M. Beshley, B. Buhyl, V. Romanchuk, M. Klymash // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XII th International Conference TCSET’2014 (Lviv – Slavske), 2014. - P. 581-584.

45. В.І. Романчук. Програмовані SDN мережі. Сучасні виклики та інтеграція нових концепцій: Internet of Everything, SDN, ACI / В.І. Романчук, С.В. Алексєєв // Наукова практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікації -2014”, 30 жовтня – 2 листопада, – Львів 2014. – С. 51-57.

46. М.М. Климаш. Розроблення макету мультисервісної мережі на базі програмно – апаратної платформи для забезпечення навчально – наукового процесу кафедри телекомунікацій / М.М. Климаш., В.І. Романчук., М.І. Бешлей // 1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT’2015). Conference proceedings. (29 October – 01 November, Lviv, Ukraine), 2015.– P. 175-178.

47. Лунтовський А.О. Дослідження ефективності використання ресурсів навчально-наукового центру паралельних обчислень / М.М. Климаш., В.І. Романчук, М.І. Бешлей, А.О. Лунтовський // Міжнародна науково-технічна конференція (Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології) Матеріали науково-технічної конференції 17–20 листопада 2015 м. Київ. - С.61-63.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

48. Заявка u 2015 05649 Україна, МПК G06F 5/00. Спосіб поділу результатів моніторингу на дві групи / Климаш М.М., Пелішок В.О., Андрухів Т.В., Романчук В.І. Деклараційний патент на корисну модель, МПК (2016) G06F 5/00. (Україна). U201505649; Заявл. 08.06.2015; Опубл. 25.07.2016. Бюл. № 14, 2016.

49. Заявка u 2015 05662 Україна, МПК H04B 7/00. Спосіб оптичного передавання з кодовим розділенням каналів / Климаш М.М., Демидов І.В., Романчук В.І. Деклараційний патент на корисну модель, МПК (2009) H04J 13/02. (Україна). U200907598; Заявл. 20.07.2009; Опубл. 10.11.2009. Бюл. № 21, 2009.

ABSTRACT

Romanchuk V. I. Resource management methods and algorithms for multiservice information function-oriented corporate networks. - Proficiency scientific treatise on the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Doctor of Engineering Science degree in technical sciences on specialty 05.12.02 «Telecommunication systems and networks» (172 - Telecommunications and Radioengineering). - Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to the problems of adaptive structural and functional synthesis of logical infrastructure of the corporate network taking into account the purpose of business processes, the fluctuation nature and the peak values of the intensity of the stream load of different types, which in the process of dynamic software configuration of resources would meet the requirements for network performance, data and quality of service for customers.

The work demonstrates the preconditions for a contradiction between the possibilities of modern quality management systems and the actual needs of users focused on specific services. The dissertation presents the solution of the actual scientific problem of ensuring the quality of services and efficiency of information exchange in multiservice information functional-oriented corporate networks on the basis of the creation of a method for adaptive management of structural parameters of network devices and the development of mathematical models and algorithms for queuing services for improving the quality of information services.

In the first section, an overview of network protocols and quality assurance mechanisms has shown that, along with routing, resource redundancy, marking and

packet classification, traffic profiling, an important place in the QoS architecture is allocated to the technological means of managing the queues responsible for their formation and overload control. It is precisely ineffective queue management that leads to uncontrolled increase in delays, jitter, and packet loss. It has been established that the key disadvantage of known queuing mechanisms is the predominance of manual settings during the configuration of equipment, which prevents the prompt response to changing the state of the router interfaces and the network as a whole, as well as variation of traffic characteristics. On the basis of the analysis, it can be concluded that it is necessary to develop new models and methods of adaptive data flow management and network resources aimed at ensuring efficient operation of the multiservice network.

The second section of the paper is devoted to the development of models, methods and algorithms for improving the quality of service and flexible management of resources of multiservice information functional-oriented corporate networks. In particular, the problem of adaptive structural and functional synthesis of logical infrastructure of the corporate network is formalized. The method for managing queues on the interfaces of network nodes has been improved. The structural-functional model of static and dynamic virtualization of computing resources of a network device is developed. The method of decomposition of the structure of a network router with virtualization is contributed. The method of detecting anomalies of network traffic of the corporate network is also proposed. In the third section, the modeling and research of the impact of multiservice corporate network resources management on the quality of the provision of info-communication services was performed. Studies show that at present there is no universal QoS technology capable of simultaneously meeting all the requirements for building multiservice functional-oriented corporate communications networks. The influence of network device configuration on the quality of service servicing by means of Packet Tracer and OpNet modeler is explored. An analysis of the results of the simulation showed that the best mechanism for providing assured quality of

service is Int-DiffServ. The Hurst parameter was evaluated, which confirmed the high degree of self-similarity characteristic of multiservice traffic. The simulation of network traffic servicing with parameters corresponding to real multiservice networks, calculation of qualitative indicators of each type of stream was carried out, and algorithm of constructing the simulation model of incoming traffic was contributed, the characteristics of this such traffic are approaching the characteristics of real data flows. The simulation model of servicing in network nodes with the implementation of advanced queuing algorithm is developed. An analysis of the aggregated traffic of the corporate multiservice network has been performed to confirm the adequacy of the proposed simulation model.

In the fourth section of the work the simulation model for structure-functional network device with virtualization of resources is developed. The simulation and comparison of information flow service systems with static and dynamic reconfiguration of the router resources with packet processing by the order of the FiFO-queue based on the simulation model is carried out. Based on the received dependencies, the amount of necessary resources of the service node is determined to provide the established level of time service quality indicators when deploying virtual routers. Similarly, the proposed ways of virtualizing a network device with a system of priority flow maintenance were compared. The influence of the method of management of the structural parameters of virtual routers on the quality of service flow of the corporate network is studied. The validity of estimating the admissible number of virtual nodes of a multiservice network is increased, depending on the type of services used and the target group of users. The time parameters of the QoS Multiservice Virtual Enterprise Infrastructure are evaluated using the decomposition method of the virtual router structure, depending on the configuration and loading of the network nodes.

In the fifth section to assess the effectiveness of the proposed solutions in the work, a virtual test platform for the next generation corporate network was created using the QtCreator tool (version 5.2). To completely abstract from the channel level,

a virtual IP packet which test platform nodes can work with is created. Based on the developed software and hardware platform, a virtualized program-driven router model has been developed that has the function of adaptive selection of queue maintenance algorithm in conditions of non-stationary flow. The adequacy of the developed models is confirmed based on the investigation of the probabilistic properties of the traffic of the multiservice corporate network and the evaluation of the delays of service of packets with real hardware routers.

The sixth chapter is devoted to the description of the technical aspects of the implementation of virtual routers in the multiservice infrastructure. Structural decomposition of the topology of the multiservice network into virtual mono-services and their advantages in functioning are considered. A description of the deployment of virtual routers based on physical one is based on the flexible distribution of virtual access time to the processor was performed. The software model of the router with a set of modern mechanisms and algorithms of information flow servicing is developed. Based on the software model of the router, the set of functional capabilities of the device is expanded by the mode of adaptive deployment of virtual nodes with the possibility of flexible control of structural parameters. A UML diagram is created for constructing the simulation model of a software router with virtualization. The research of the quality of stream traffic servicing was conducted based on the developed model of the software router with the possibility of deploying virtual servicing devices of class purpose. There were compared time performance indicators for IPTV stream flow using virtualization technology of a network device with an existing fair service algorithm. An experiment was conducted to evaluate the effectiveness of the proposed solutions and influence on the quality of client-centered service perception. It is established that the proposed technology of dynamic virtualization of the network device and the method of queue management allow the dynamic programming configuration of resources to ensure compliance with the requirements for network performance, data delivery speed and quality of service for

corporate users.Key words: multiservice network, service quality, resource allocation, buffer, virtualization, router, self-similarity, functionally-oriented corporate network.

Keywords: multiservice network, quality of service, distribution of resources, buffer, virtualization, router, self-similarity, functional-oriented corporate network.

The list of author's publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis were published:

1. Klymash M. M. Modern transformations in the architectures of distributed systems: monograph / M. M. Klymash, A. O. Lentovsky, V. I. Romanchuk. - Lviv; Drohobych: Kolo, 2015. - 328 p.

2. Klymash M. M.. Obstacles in transport DWDM networks / MM Klymash, VI Romanchuk, Yu.D. Dobush. - Lviv, 2010. - 192 p.

3. Demydov I. Traffic Fluctuations Optimization for Telecommunication SDP Segment based on Forecasting using Ateb-functions: / I. Demydov, I. Dronyuk, O. Fedevych, V. Romanchuk // In: N. Kryvinska and M. Greguš, ed. Data-centric business and applications. Evolvements in business information processing and management. Series: Lecture notes on data engineering and communications technologies. Berlin: Springer International Publishing, 2018. – Vol. 20, pp. 71-88. DOI: 10.1007/978-3-319-94117-2_4, ISSN 2367-4512

4. Maksymyuk T. Designing the New Backhaul for 5G Heterogeneous Network Based on Converged Optical Infrastructure / T. Maksymyuk, O. Krasko, M. Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy// Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 17, No. 4, 2017, 9–12, DOI: 10.15546/aeei-2017-0028.

5. Romanchuk V. Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT / Vasyl Romanchuk, Mykola Beshley, Andriy Prislupskiy, Halyna Beshley, Oleksiy Panchenko// Internet of Things (IoT) and Engineering Applications, Clausius Scientific Press, Canada. – 2018. –Vol.3. – pp. 22-23.

6. Romanchuk V. Development of software-based router model with adaptive selection of algorithms for queues servicing / V. Romanchuk, M. Klymash,

M. Beshley, O. Panchenko, A. Polishchuk // Technology audit and production reserves. – 2018. - №3/2(41). - pp. 46-55. ISSN 2226-3780.

7. Klymash M. Development of software router with automatic deployment of virtual nodes / M.M. Klymash, VI Romanchuk, O. M. Panchenko, M.I. Beshley, AV Polischuk // Radioelektronika i telekomunikatsiya [op. sciences etc.] / rec. Ed. B.A. Mandzai - L.: Vt. Nats. University Lviv Polytechnic, 2017. - No. 766. - C. 76 - 85.

8. Beshley M. Development of real-time data transmission methods by improving streaming prioritization processes in routers / M.I. Beshley, V.V. Chervenets, I.V. Demydov, V.I. Romanchuk, O.M. Panchenko // Systems of Arms and Military Equipment: Sciences. magazine - Kharkiv: Khar. Univ. Air. Forces named after Ivan Kozhedub. - 2016.-№5(142) - P. 114-123.

9. Romanchuk V. Analysis of the structure of network traffic and network anomalies on the example of the local network segment of the campus of the Lviv Polytechnic National University / V.I. Romanchuk, S.V. Alekseev, V.V. Chervenets, R. S. Kolodiy // Radioelektronika i telekomunikatsiya [SB. sciences etc.] / rec. Ed. B.A. Mandzai - L.: Nat. University Lviv Polytechnic Publishaing House, 2014. - No. 796. - P. 157-163.

10. Stryhalyuk B.M. Investigation of statistical parameters and characteristics of information flows in heterogeneous networks / B.M. Stryhalyuk, I.V. Demydov, V.I. Romanchuk, M.I. Beshley // Scientific notes of the UNDIZ. – 2014. – №6 (34). - P. 82-92.

11. Kilmeninov O. Modeling the operation of the router with virtualization at given parameters of stream traffic quality / O.A. Kilmeninov, V.I. Romanchuk, M.I. Beshley // Scientific notes of the UNDIZ. - 2017 - No. 4 (48). - P. 12-17.

12. Romanchuk V.I. Analysis of probabilistic characteristics of traffic of infocommunication corporate network / V.I. Romanchuk, O.A. Lavriv, A.V. Polischuk, R.I. Bak // Computer printing technologies. UAD Herald. - Lviv, 2011. - Issue 26. - P. 145-151.

13. Klymash M.M. Matrix method of analysis of optical transport networks with spectral sealing of channels / M. M. Klymash, V. I. Romanchuk // Visn. National University Lviv Polytechnic University. - 2007. - No. 595. - P. 92-98

14. Andrukhiv T.V. Modeling of fully optical networks with spectral sealing of channels / T. V. Andrukhiv, V. I. Romanchuk, A.V. Polischuk // Visn. National University Lviv Polytechnic University. - 2008. - No. 618. - P. 145-152.

15. Romanchuk V.I. Improving the quality of providing telecommunication services in urban transport networks with code division of channels / V.I. Romanchuk, T.V. Andrukhiv, M.M. Klymash // Computer printing technologies. UAD Herald. - Lviv, 2009. - Issue 22. - P. 76 - 82.

16. Romanchuk V.I. Research of IP / MPLS technology with different network topologies / V.I. Romanchuk, Yu.V. Antonyuk, A.V. Polischuk // Radioelektronika i telekomunikatsiya / resp. Ed. B.A. Mandziy. - 2011. - No. 645. – Lviv. - P. 95-103.

17. Romanchuk V.I. Modeling of urban multiservice networks / V.I. Romanchuk, Yu.V. Mityhin, R.S. Kolodiy, A.V. Polishchuk // Radioelektronika i telekomunikatsiya / resp. Ed. B.A. Mandziy - Lviv: Lviv Polytechnic NU, 2011. - No. 705. - P. 152-158.

18. Chernichivsky Y.M. Assessment and management of quality of perception of the service (QoE) in telecommunication networks / Y.M. Chernihivsky, M.I. Kyryk, V.I. Romanchuk, V.V. Chervesnets // Radioelektronika i telekomunikatsiya / resp. Ed. B.A. Mandziy - Lviv: Lviv Polytechnic NU, 2010. - No. 680. - P. 132-135.

19. Klymash M.M. Icestigation and simulation of Gigabit Ethernet switching modules operation in optical transport networks / M.M. Klymash, V.I. Romanchuk, B.M. Stryhalyuk // Radioelektronika i telekomunikatsiyi. – 2004. – No. 508. - P. 152-157.

20. Romanchuk V. Research of methods for assessing the quality of perception of services for different types of telecommunication network development / V.I. Romanchuk, M.M. Klymash, B.V. Yanyshyn // Radioelektronika i

telekomunikatsiyi / resp. Ed. B.A.Mandziy - Lviv: Lviv Polytechnic NU, 2012. - No. 738. - P. 165-172.

21. Romanchuk V.I. Method of coordinated solving of balancing tasks of different priority load balancing between queues of network devices / V.I. Romanchuk, M.I. Beshey, O.M. Panchenko, A.V. Polishchuk // Scientific notes of the UNDIZ. - 2018. – No.2(50). - P. 48-57.

22. Beshley H.V. Method of decomposing the structure of a network device with virtualization of resources / V.I. Romanchuk, M.I. Beshey, A.M. Pryslupskiy, H.V. Beshley // Sientific notes of Ukrainian Printing Academy. – 2018. – No. 1(56). – C. 31-42.

Proceedings that certify an approvement of thesis materials:

23. Chervenets V. QoS/QoE Correlation Modified Model for QoE Evaluation on Video Service / V. Chervenets, V. Romanchuk, H. Beshley, A.Khudyy // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XIII th International Conference TCSET'2016 (Lviv – Slavske) 2016.– P. 664-666. (Scopus)

24. Romanchuk V. Research of Multimedia Streaming Transmission in Multiservice Networks / V. Romanchuk, V. Chervenets, A. Polishuk // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 39. (Scopus)

25. Romanchuk V. Development the Methods of Conversion to Photonic Transport Networks / V. Romanchuk, O. Krasko, O. Koretsky // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 258. (Scopus)

26. Romanchuk V. The Main Causes of Failures SQL Server / V. Romanchuk, T. Andrukhiv, I. Kahalo // Modern problems of radio engineering,

telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 258. (Scopus)

27. Beshley M. Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization / M. Beshley, V. Romanchuk, V. Chervenets and A. Masiuk // 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016, pp. 1-3. (Scopus)

28. V. Romanchuk. Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes / V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and A. Polishchuk / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 295-298. (Scopus)

29. Chervenets V. Quality increasing of traffic flow transferring in multiservice networks / V. Chervenets, V. Romanchuk, O. Puha and O. Bilyk / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 274-277. (Scopus)

30. Chervenets V. Investigation and Simulation of System for Data Flow Processing in Multiservice Nodes Using Virtualization Mechanisms / M . Klymash, V. Romanchuk, M. Beshley and and A. Polishchuk // 2017 IEEE First Ukraine Conference on electrical and computer engineering (UKRCON). - pp. 989-992. (Scopus)

31. Romanchuk V. Telemedicine system model using Internet-technology / V. Romanchuk, T M. Klymash, V. Krasko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2010 (Lviv – Slavske, February 23–27), 2010. - P. 259. (Scopus)

32. Polishchuk A. Research Methods to Provide Services in NGN / A. Polishchuk, E. Chernykhivsky, V. Chervenets, V. Romanchuk// Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the X th International Conference TCSET'2010. Lviv – 2010, P. 238. (Scopus)

33. Beshley M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network testbed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko, A. Masiuk

// Proceedings of XIIIth international conference”The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics” CADSM’2015 (24-27 February, Lviv-Poljana, Ukraine), 2015. - P. 1-4. (Scopus)

34. Romanchuk V. Method for processing multiservice traffic in network node based on adaptive management of buffer resource / V. Romanchu M. Beshley, A. Polishuk and M. Seliuchenko // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018), Lviv-Slavske, 2018, pp. 1118-1122. (Scopus)

35. Romanchuk V.I. Analysis of evaluation and control methods in the Virtual Learning Environment of Lviv Polytechnic / V.I. Romanchuk // Innovative computer technologies in high school: materials of the scientific and practical conference, February 18-19, 2010, Lviv / Lviv Polytechnic National University. - Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2010. - P. 36-40.

36. Chervenets V.V. Model of virtual router with static and dynamic reconfiguration of resources / M.I. Beshley, V.V. Chervenets, V.I. Romanchuk, A.V. Polishchuk // X International scientific and technical conference "Problems of telecommunication »ПТ-2016: collection of conference materials (April 19-22, 2016, Kyiv, Ukraine), 2016 - К.: NTTU "KPI". - P. 140-142.

37. Romanchuk V. Investigation of probabilistic properties of traffic of corporate multiservice network / V. Romanchuk, V. Chervenets // Computer science and engineering, materials of the V International Conference of Young Scientists CSE-2011 - Lviv. - 2011. - P. 220-221.

38. Romanchuk V. Implementation of QoS for multimedia traffic in the corporate network / V.I. Romanchuk, V.V. Chervenets // Materials of NMK "Modern problems of telecommunications and training of specialists in the field of telecommunications - 2011". - Lviv - 2011. - P. 17 - 20.

39. V.I. Romanchuk Investigation of Dynamic Routing Methods on the Transport Network / V.I. Romanchuk // Materials of the conference "Innovative computer technologies in high school". - Lviv, 2010. - P. 30-33.

40. Romanchuk V.I. Transition to photonic networks / V.I. Romanchuk, O.V. Krasko // Scientific practical conference "Modern problems of telecommunications-2011". - Lviv 2011. - P. 17-21.

41. Romanchuk V.I. Analysis of methods for transmitting real-time traffic in telecommunication networks / V.I. Romanchuk, O.A. Lavriv, A.V. Polischuk // International Conference "Telecommunication Systems and Technologies" (MKTT'2011), October 18-21, 2011. - Kharkiv, Ukraine. - P. 121 - 124.

42. Romanchuk V.I. Research on the transfer of information load of streaming multimedia / V.I. Romanchuk, V.V. Chervenets, A.V. Polishchuk // Scientific-methodical conference "Modern problems of telecommunications and training of specialists in the field of telecommunications -2012." - Lviv, 2012. - P. 71-72.

43. Romanchuk V.I. Simulation of cross-interferences in DWDM systems / V.I. Romanchuk, O.V. Koretsky // Scientific-methodical conference "Modern problems of telecommunications and training of specialists in the field of telecommunications -2012." - Lviv, 2012. - P. 68-70.

44. Beshley M.I. Method of Resource Distribution for Mobile Cloud Computing Systems. / M. Beshley, B. Buyl, V. Romanchuk, M. Klymash // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XII th International Conference TCSET'2014 (Lviv-Slavske), 2014. - P. 581 -584.

45. Romanchuk V.I. Programmable SDN networks. Modern Challenges and Integration of New Concepts: Internet of Everything, SDN, ACI / V.I. Romanchuk, S.V. Alekseev // Scientific practical conference "Modern problems of telecommunications -014", October 30 - November 2. – Lviv, 2014. - P. 51-57.

46. Klymash M.M. Development of the layout of the multiservice network based on the software and hardware platform for providing the educational and scientific process of the telecommunication department / M.M. Klymash, V.I. Romanchuk, M.I. Beshley // 1st International Conference "Advanced

Information and Communication Technologies" (AICT'2015). Conference proceedings (29 October - 01 November, Lviv, Ukraine), 2015.- P. 175-178.

47. Luntovsky A.O. Research of the efficiency of using resources of the educational and scientific center of parallel computing / M.M. Klymash, V.I. Romanchuk, M.I. Beshley, A.O. Luntovsky // International Scientific and Technical Conference (Modern Information and Telecommunication Technologies) Materials of the Scientific and Technical Conference November 17-20, 2015, Kyiv. - P. 61-63.

Proceedings where additional scientific results of thesis were published:

48. Application u 2015 05649 Ukraine, IPC G06F 5/00. Methods of dividing the monitoring results into two groups / Klymash M/M, Pelishok V.O., Romanchuk V.I. Declarative patent for utility model, IPC (2016) G06F 5/00. (Ukraine). U201505649; Declared June 8, 2015; Pubwished 07/25/2016 Bull No. 14, 2016.

49. Application u 2015 05662 Ukraine, IPC H04B 7/00. Methods of optical transmission with code division of channels / Klymash M.M, Demydov I.V, Romanchuk V.I. Declarative patent for utility model, IPC (2009) H04J 13/02. (Ukraine). U200907598; Declared July 20, 2009; Pubwished November 10, 2009 Bull No. 21, 2009.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ..... 31
ВСТУП 32
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ПОБУДОВИ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ..... 43
1.1 Аналіз особливостей функціонування та побудови мультисервісних інформаційних корпоративних мереж..... 43
1.2 Забезпечення якості обслуговування мультисервісних корпоративних мереж..... 51
1.2.1 Дослідження загальної структури мультисервісної корпоративної мережі наступного покоління 51
1.2.2 Класифікація основних показників якості обслуговування та мережевих ресурсів 54
1.2.3 Засоби забезпечення якості обслуговування на основі управління мережевим ресурсом..... 60
1.3 Механізми та підходи управління чергами на маршрутизаторах телекомунікаційної мережі 67
1.4 Аналіз відомих математичних моделей і методів управління ресурсами телекомунікаційної мережі для забезпечення QoS 75
1.5 Проблематика дослідження та формулювання вимог до перспективних рішень в області управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж..... 81
Висновки до 1-го розділу..... 89
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ, МЕТОДИ І АЛГОРИТМИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ГНУЧКОСТІ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ..... 90

2.1 Формалізація завдання адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі.... 90
2.2 Метод узгодженого розв'язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами у відповідних мережевих інтерфейсах телекомунікаційних вузлів..... 95
2.3 Модель оброблення інформаційних потоків за удосконаленим алгоритмом управління черг..... 101
2.4 Структурно-функціональна модель мережевого вузла з статичною та динамічною віртуалізацією обчислювальних ресурсів 106
2.5 Метод декомпозиції структури мережевого маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів 111
2.6 Метод виявлення аномалій мережевого трафіку корпоративної функціонально-орієнтованої мережі..... 114
2.6.1 Аналіз та оцінка структури трафіку сегменту локальної мережі кампусу 115
2.6.2 Аналіз трафіку в режимі пікової завантаженості мережі 117
2.6.3 Аналіз трафіку в режимі недовантаженн мережі 118
Висновки до 2-го розділу..... 123
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ НА ЯКІСТЬ НАДАННЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ 125
3.1 Порівняння параметрів QoS інфокомунікаційних послуг шляхом конфігурації різних методів забезпечення якості обслуговування засобами OPNET Modeler 14.0 125
3.2 Дослідження впливу конфігурації мережевих пристроїв на якість обслуговування послуг в програмному середовищі Packet tracer 130
3.3 Дослідження та статистичний аналіз потоків маршрутизатора рівня агрегації корпоративної мережі..... 136

3.4 Дослідження ефективності запропонованих рішень шляхом проведення імітаційного моделювання в середовищы Matlab 148
Висновки до 3-го розділу..... 161
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ З ВІРТУАЛІЗАЦІЄЮ МАРШРУТИЗАТОРІВ 163
4.1 Моделювання системи обслуговування потоків даних в мультисервісних вузлах мережі із використанням механізмів віртуалізації 163
4.1.1 Моделювання та порівняння системи обслуговування інформаційних потоків з динамічною реконфігурацією ресурсів маршрутизатора та обробкою пакетів за порядком черги fifo 165
4.1.2 Моделювання систем обслуговування вхідних потоків з статичною і динамічною реконфігурацією ресурсів вузла та порівняння з пріоритетною обробкою пакетів..... 176
4.2 Дослідження впливу методу управління структурними параметрами віртуальних маршрутизаторів на якість обслуговування потоків 180
4.3 Прогнозування тривалості затримки пакетів послуги і-го пріоритету та кількості вузлів для забезпечення QoS..... 192
Висновки до 4-го розділу..... 201
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОЇ КОРПОРАТИВНОЇ МЕРЕЖІ ІЗ ВПРОВАДЖЕННЯМ ПРОГРАМНИХ МАРШРУТИЗАТОРІВ..... 203
5.1 Розроблення фрагменту віртуальної тестової платформи корпоративної мережі нового покоління для дослідження ефективності запропонованих методів та моделей..... 203

5.2 Оцінка точності і адекватності програмного маршрутизатора рівня агрегації з апаратним 212
5.3 Налаштування тестової платформи мережі нового покоління та постановка експерименту для оцінка ефективності удосконаленого алгоритму оброблення черг 222
Висновки до 5-го розділу 227
РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ МЕРЕЖНИХ ПРИСТРОЇВ В КОРПОРАТИВНУ ІНФРАСТРУКТУРУ 229
6.1 Реалізація механізму віртуалізації мережевого пристрою в корпоративній інфраструктурі 229
6.2 Розробка програмного маршрутизатора з модульною структурою 234
6.3 Практична реалізація технології віртуалізації програмного маршрутизатора 238
6.4 Забезпечення гарантованого рівня якості обслуговування потокового трафіку у віртуальній мультисервісній інфраструктурі 241
6.5 Дослідження методів оцінювання якості сприйняття послуги для різних типів трафіку мультисервісних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж 248
6.5.1 Структура та класифікація трафіку в мультисервісних корпоративних мережах 248
6.5.2 Імітаційна модель корпоративної мережі для передавання різнотипних потоків даних 257
6.5.3 Практична реалізація системи управління пропускною здатністю каналу зв'язку шляхом визначення показника якості сприйняття послуги 260
6.6 Суб’єктивна оцінка якості сприйняття послуг різних типів трафіку в функціонально-орієнтованій корпоративній мережі 267

Висновки до 6-го розділу 275
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ……...278
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 283
Додаток А. Акти впровадження 316
Додаток Б. Лістинг програми роботи мережевого пристрою з віртуалізацією ресурсів 320
Додаток В. Конфігурування QoS у маршрутизаторах Cisco 2800 330
Додаток Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації 339

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

OSI – Модель взаємодії відкритих систем

NGN – Мережа наступного покоління

IP – Технологічна основа побудови транспортної мережі з комутацією пакетів

MPLS – Багатопротокольна комутація на основі міток

IETF – Відкрите міжнародне співтовариство проектувальників, учених, мережевих операторів і провайдерів, створене IAB в 1986 році, яке займається розвитком протоколів і архітектури Інтернету.

ITU – Міжнародний союз телекомунікацій

ETSI – Європейський інститут стандартизації телекомунікацій

СМО – Система масового обслуговування

QoS – Якість обслуговування, якість надання послуг, якість сервісу

RSVP – Протокол резервування ресурсів

CoS – Клас сервісу

DSCP – Поле коду диференційованої послуги

PHB – Політика покрокових переходів

ТМЗК – Телефонна мережа загального користування

ToS – Рівень пріоритету IP, вид послуги

TU – Використання TE-тракту

VBR – Змінна швидкість передачі

VoD – Відео на замовлення

VoIP – Телефонія на основі протоколу IP

MOS – Середня експертна оцінка

WFQ – Зважене справедливе обслуговування

ВСТУП

Актуальність теми. Поточний етап розвитку сучасного суспільства характеризується все більш широким впровадженням інформаційно-комунікаційних систем і технологій. Основу інфокомунікацій формують телекомунікаційні системи та мережі, які забезпечують одночасне надання великої множини сервісів на базі однієї транспортної платформи. Результати проведеного аналізу сучасного стану телекомунікаційних технологій і основних протокольних рішень показали стрімку динаміку розвитку мереж наступного покоління (Next Generation Network, NGN) в напрямку створення високошвидкісних мультисервісних мереж нового покоління з можливістю функціональної адаптації під потреби користувачів, що пов'язано з необхідністю пошуку нових підходів до визначення їх фізичної та функціональної архітектури.

Незважаючи на випереджувальний розвиток технологій фізичного і канального рівнів, реалізувати потенціал телекомунікаційної корпоративної мережі нового покоління в повному обсязі можливо лише за рахунок ефективного управління доступними мережними ресурсами в умовах зростання вимог до оперативності обміну інформацією. Основна проблема, що виникає при розв'язанні завдань розподілу мережних ресурсів та управління їх запасами, полягає у створенні ефективної і надійної системи підтримання необхідного рівня резервів, а також розподілу та перерозподілу певних ресурсів у межах ієрархії телекомунікаційної корпоративної системи. Саме тому вивчення структури й особливостей мережного трафіку в одному із її локальних сегментів може стати основою для розроблення підходів і алгоритмів автоматизації моніторингу і розподілу мережних ресурсів, алгоритмів безпеки й забезпечення ефективного функціонування новітніх прототипів програмованих мультисервісних мереж з високим рівнем доступності. Такі підходи повинні опиратись на удосконалені методи розподілу

ресурсів, що володіють високою швидкодією, масштабованістю, гнучкістю, захищеністю, низькою операційною складністю та ресурсоємністю.

З огляду на особливу затребуваність забезпечення наскрізного (end-to-end) QoS на перше місце в архітектурі управління трафіком виходять рішення саме мережного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем. Серед процесів мережного рівня важливу роль відіграють завдання управління чергами, тому що саме неефективне управління чергами в мережних пристроях призводить до неконтрольованого зростання затримок і рівня втрат пакетів. Як показав проведений аналіз, в сучасному мережному обладнанні реалізовано множину механізмів керування чергами як з точки зору їх формування та обслуговування (FIFO, PQ, CQ, WFQ, CB WFQ), так і запобігання перевантаженням (RED, WRED, ECN, SPD). Їх основною особливістю і ключовим недоліком є переважання ручних адміністративних налаштувань в процесі конфігурування мережного обладнання, що не дає змоги оперативно реагувати на зміну стану завантаженості маршрутизатора та мережі в цілому. У зв'язку з цим багато вітчизняних вчених, таких як Лемешко О.В., Глоба Л.С., Ложковський А.Г., Лісовий І.П., Беркман Л.Н., Толюпа С.В., Воропаєва В.Я., Євсеева О.Ю. і зарубіжних Abdelwahab M. Elnaka. Xining Li K., Park, B. Ryu, V. Paxson, R. Mondragon активно працюють над удосконаленням засобів управління мережним трафіком і забезпечення якості обслуговування в телекомунікаційних системах, зокрема – і в напрямку перегляду моделей, методів і самих механізмів управління чергами на маршрутизаторах телекомунікаційної мережі.

В основному, більшість робіт, які присвячені методам оптимізації ефективності використання мережних ресурсів, носять теоретичний характер, пов'язаний зі створенням нових алгоритмів обробки та формування трафіку, що робить їх важкореалізованими в реальній телекомунікаційній мережі. Іншим недоліком існуючих методів є використання комплексного підходу до управління інформаційними потоками без урахування особливостей кожного

типу трафіку, що генерується різними мережними послугами. Відомі технічні методи управління трафіком у вузлах мережі, такі як шейпінг та полісінг є малоефективними при обробленні трафіку та забезпеченні гарантованої якості обслуговування.

Виходячи з існуючого **протиріччя** між можливостями сучасних систем управління якістю послуг і реальними потребами користувачів, орієнтованими на конкретні послуги, актуальною **науково-прикладною проблемою** є забезпечення якості надання інфокомунікаційних послуг шляхом покращення оперативності обміну інформацією в мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мережах на основі створення методу адаптивного управління структурними параметрами мережних пристроїв та розвитку математичних моделей і алгоритмів обслуговування черг.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з положеннями Постанови Верховної Ради України про «Концепцію національної інформаційної політики», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні», Закону України «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напряму кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» - «Інфокомунікаційні системи та мережі», в рамках низки держбюджетних науково-дослідних тем «Дослідження та розроблення телекомунікаційних мережних систем для застосувань телематики і телеметрії» (ДБ/КОМ) (2011-2012 рр.), № держреєстрації 0111U001223; «Моделі та структури конвергентних телекомунікаційних мереж на основі CLOUD – технологій» («ДБ/CLOUD») (2013-2014 рр.), № держреєстрації 0113U003184; «Методи побудови та моделі інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN-технологій

для систем електронного урядування» (ДБ/SDN) (2015-2016), № держреєстрації 0115U000444; «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G), (2017–2019 рр.) № держреєстрації 0117U004449, а також госпдоговірної тематики «Проектування та впровадження локальної мережі передачі мультимедійних даних на базі Ethernet технологій» (2016р.), ГД № 0548.

Мета і завдання дослідження. Метою представленої дисертаційної роботи є підвищення якості сервісу та ефективності використання ресурсів мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж шляхом розроблення адаптивних методів віртуалізації мережних пристроїв та алгоритмів динамічного управління мережними ресурсами.

Для досягнення поставленої мети в межах дисертаційних досліджень були сформульовані та розв’язані наступні завдання:

1. Аналіз розвитку мереж нового покоління та огляд відомих математичних моделей і методів управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж;
2. Формалізація завдання адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі;
3. Удосконалення методу управління чергами на інтерфейсах мережевих вузлів;
4. Розроблення структурно-функціональної моделі статичної та динамічної віртуалізації обчислювальних ресурсів мережного пристрою;
5. Розроблення методу декомпозиції структури мережного маршрутизатора з віртуалізацією;
6. Розроблення методу виявлення аномалій мережевого трафіку корпоративної мережі;
7. Моделювання та дослідження впливу процесу управління мережними ресурсами на якість обслуговування інформаційних послуг;

8. Розроблення програмно-апаратної платформи мультисервісної корпоративної мережі з адаптивним конфігуруванням ресурсів;

9. Дослідження ефективності запропонованих рішень та розробка рекомендацій щодо практичного використання отриманих в роботі результатів в сучасних і перспективних телекомунікаційних мережах.

Об'єктом дослідження є процес адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі.

Предмет дослідження: моделі, методи та алгоритми динамічного управління ресурсами мультисервісних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж.

Методи дослідження. В процесі досліджень використано такі теоретичні засади, як теорія систем масового обслуговування, теорія оптимізації, теорія телекомунікаційних систем, теорія ієрархічних систем, математичного та імітаційного моделювання, метод експертних оцінок, основні положення теорії ймовірності та математичної статистики, теорії фрактальних процесів, методів лабораторного та натурного експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено метод узгодженого балансування різнопріоритетного навантаження між чергами у призначених мережних інтерфейсах телекомунікаційних вузлів шляхом встановлення пріоритетності його оброблення за принципами диференціації сервісів, який відрізняється від відомих урахуванням тривалості передавання й очікування пакетів для проведення обміну пакетами між чергами із різним пріоритетом, що дало змогу першочергово передавати пакети, які спізнюються, наслідком чого стає адаптація процесів обслуговування навантаження до змін станів мережних вузлів, що дало змогу забезпечувати необхідні показники якості сервісу.

2. Набула подальшого розвитку структурно-функціональна модель мережного вузла, яка відрізняється від відомих урахуванням процесів статичної та динамічної віртуалізації обчислювальних ресурсів і дала змогу описати

процес адаптивної віртуалізації маршрутизаторів із оптимізацією заданого рівня параметрів якості обслуговування для визначених типів інфокомунікаційних послуг відповідно до множин властивих їм вимог до забезпечення якості сервісу, а також підвищити загальну стійкість системи (корпоративної мережі) до кібератак шляхом ізолювання атакованої віртуальної машини.

3. Вперше запропоновано метод декомпозиції структури мережного маршрутизатора, який, на відміну від відомих, базується на структурно-функціональній моделі віртуалізації його ресурсів, який дав змогу зменшити флуктуації часових параметрів обслуговування різних видів трафіку, що виникають унаслідок коливань їх інтенсивності, а також підтримувати задані показники параметрів якості обслуговування та оцінювати ефективність застосування масштабованих мережних рішень корпоративного класу.

4. Вперше запропоновано метод виявлення аномалій мережного трафіку, який, на відміну від відомих, заснований на виконанні статистичного аналізу поведінкових залежностей і ентропії інтенсивності трафіку, що дало змогу забезпечити виявлення, блокування або фільтрацію небажаних інформаційних потоків в програмно-базованих корпоративних мережах.

5. Набула подальшого розвитку функціональна модель програмно-керованого маршрутизатора, яка, на відміну від раніше відомих, у процесі адаптивного вибору алгоритму обслуговування черг під час виникнення флуктуацій користувацького навантаження передбачає врахування накопиченої інформації щодо минулих рішень, що дало змогу зменшити характерні для мультисервісних мереж нового покоління коливання часових показників якості сервісу.

6. Набула подальшого розвитку модель програмного маршрутизатора, яка, на відміну від відомих, враховує особливості виділення ресурсів при самоорганізації віртуальних аналогів апаратних маршрутизаторів різної продуктивності, в залежності від функціонально-орієнтованого призначення корпоративних мереж, а також можливості автоматизованого відновлення їх

працездатності і забезпечення заданого рівня якості обслуговування з мінімальними затратами мережних ресурсів, що дало змогу підвищити ефективність функціонування корпоративних мереж.

Практичне значення одержаних результатів. Основним практичним результатом дисертації, який одержаний на основі проведених теоретичних та практичних досліджень, є розвиток методики адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі шляхом конфігурування її мережно-незалежних рівнів для забезпечення вимог до продуктивності мережної системи, якості обслуговування користувачів та оперативності доставки даних. Запропоновані методи дають змогу виявити потенційні вузькі місця в телекомунікаційній системі з метою її модернізації та сформувати пропозиції щодо зміни програмної архітектури активного мережного (агрегуючого та комутаційного) обладнання. При цьому, протягом 2015-2017 років проведено трансформацію мультисервісної корпоративної мережі Національного університету «Львівська політехніка» «Polynet», одержано позитивний приріст по продуктивності функціонування, показникам якості обслуговування, захищеності даних, забезпечено гнучкість управління ресурсами мережі без значних кошторисних затрат на модернізацію мережної інфраструктури.

У межах удосконаленої дисертантом методики використано наступні практичні особливості розроблених методів, моделей та алгоритмів:

1. Зменшено до 2 разів затримку обслуговування з кінця в кінець при наданні інфокомунікаційних послуг реального часу та забезпечено високий рівень якості сприйняття відеопотоку при втратах пакетів до 3% із застосуванням удосконаленого алгоритму зваженого кругового обслуговування черг у мережних вузлах мультисервісної мережі.

2. Покращено якість обслуговування критично важливих даних у корпоративній мережі за середньою затримкою на 18,8%, а для потоків, чутливих до втрат та нечутливих до затримок вдалося зменшити ймовірність

втрат пакетів до 10 разів шляхом використання запропонованої моделі віртуалізації мережного вузла з адаптивним управлінням структурними параметрами віртуальних маршрутизаторів при збереженні одних і тих самих обсягів апаратних мережних ресурсів.

3. Запропоновано технологію динамічної віртуалізації мережевого пристрою, яка забезпечує можливість призначення мінімального обсягу мережних ресурсів для гарантування заданого рівня якості обслуговування та покращує часові показники якості обслуговування потокового трафіку в режимі реального часу до 25-30%.

4. Підвищено достовірність оцінювання оптимальної кількості віртуальних вузлів мультисервісної корпоративної мережі від 1,1 до 5,1 разів та прогнозування затримки обслуговування різнорідного трафіку з кінця в кінець в умовах його флуктацій від 4 до 30 %, в залежності від цільового орієнтування мережної інфраструктури.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсів лекцій з дисциплін «Телекомунікаційні та інформаційні мережі, ч.1», «Системне програмування інфокомунікацій»; для створення нових курсів лекцій з дисциплін «Розподілені сервісні системи та Cloud-технології», «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв’язку».

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних корпоративних мережах Національного університету «Львівська політехніка», ТОВ ВТФ «Контех», ТОВ «Телекомунікаційна компанія», ПП «Цифрові технології», що підтверджено актами впровадження. Результати роботи можуть застосовуватись при розробленні методів адаптивного управління ресурсами у спеціалізованих мультисервісних інфокомунікаційних мережах з високими вимогами щодо якості, оперативності і гарантованості обміну інформацією, зокрема – для

системи використаних віртуалізованих і програмно-конфігурованих мережних пристроїв, а також у межах розвитку архітектури мереж наступного покоління.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, внесок Романчука В.І. є вирішальним, зокрема авторові належать (*нумерація згідно Додатку Г*): у роботах [5, 7, 28, 45, 46] – розроблення моделі програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів цільового призначення; у працях [22, 30, 33, 36] – модель віртуального маршрутизатора зі статичною та динамічною реконфігурацією ресурсів; у роботах [2, 5, 15, 16, 25, 43, 44, 48, 49] – методи управління ресурсами в мультисервісних гетерогенних мережах; у працях [10, 12, 37] – дослідження імовірнісних властивостей трафіку корпоративної мультисервісної мережі; у праці [9] – метод виявлення аномалій мережевого трафіку; у роботах [29, 11, 14] – математичні моделі, результати моделювання та дослідження реалізацій концепції віртуалізації мережевих пристроїв; у роботах [3, 11, 18, 22, 24, 26, 31, 37, 41, 42] – дослідження процесу передавання потокового мультимедіа в корпоративних мережах із гарантуванням якості обслуговування; у роботах [6, 8, 27, 32-35] – розроблення модифікованого методу пріоритетного обслуговування черг у вузлах мультисервісної корпоративної мережі; у роботах [1, 4, 13, 17, 19-21, 38-40, 47] – моделі та методи управління ресурсами транспортних телекомунікаційних мереж.

Результати спільних наукових праць було використано у дисертаційних роботах таких співавторів, як Червенець В.В. [251] (для дослідження практичних аспектів застосування віртауалізації активного мережного обладнання, але при статичному розподілі мережних ресурсів), Бешлей М.І., який використав удосконалені автором методи управління потоками для перевірки адекватності віртуальних аналогів апаратних маршрутизаторів [252].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 20-ти

міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів-Славське, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 рр.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2015 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій - 2016» ПТ-16 (м. Київ, 2016 рр.); Міжнародній конференції «Телекомунікаційні системи і технології» (м. Харків, 2011 р.); Науково-практичних конференціях «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011, 2012, 2014» (м. Львів, 2012, 2013 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології» (м. Київ, 2015); The 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T) (Kharkiv, Ukraine, 2015); Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки IEEE (УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016) (м. Київ, 2016 р.); 2nd International IEEE Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (м. Львів, 2015, 2017 рр.). Крім цього, дисертаційна робота у повному обсязі представлена на наукових семінарах кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 49 наукових праць, серед них статей у наукових фахових виданнях – 20 (всі статті у науковій періодиці, що входить до міжнародних науково-метричних баз різного рівня, включаючи Scopus, Index Copernicus, Google Scholar тощо), у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 13, з них індексованих у науково-метричній базі Scopus – 12, також 2 патенти та 2 колективні монографії.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і 4

додатків. Загальний обсяг роботи складає 346 сторінок друкарського тексту, із них 11 сторінок вступу, 235 сторінок основного тексту, 169 рисунків, 20 таблиць, список використаних джерел із 252 найменувань, 4 додатки на 31 сторінці. Додатки містять обрані початкові коди та конфігурацію маршрутизатора, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список праць автора.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ПОБУДОВИ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ

1.1 Аналіз особливостей функціонування та побудови мультисервісних інформаційних корпоративних мереж

Мультисервісна мережа (ММ) на початковому етапі проектування характеризується незначним числом абонентів, які можуть бути розподілені по значній території, яким надаються одночасно послуги телефонного зв'язку , передачі даних та послуги відео. Відсутність взаємодії з аналогічними мультисервісними мережами в інших регіонах країни (тобто автономність створюваних місцевих ММ) дозволяє розглядати ММ як відносно незалежну, замкнуту систему. Незважаючи на простоту телекомунікаційних і інформаційних технологій, що використовуються при проектуванні ММ, виникає цілий ряд суперечливих вимог, які повинні бути враховані при розробці системного проекту мережі операторського класу [19].

Як було відзначено, особливостями створення мультисервісних мереж на початкових етапах є:

- Незначне число абонентів, які можуть бути розподілені по всій території даного міста;
- Надання абонентам ММ одночасно послуг телефонного зв'язку та передачі даних, а в перспективі – і послуг відео;
- Відсутність взаємодії з аналогічними мережами в інших регіонах країни (тобто автономність створюваних місцевих ММ).

Остання обставина дозволяє розглядати ММ як відносно незалежну, замкнуту систему.

В умовах термінологічної плутанини щодо переліку послуг, які надаються абонентам ММ, з'явився чисто маркетинговий термін «Triple Play», який не несе ніякого технологічного навантаження. Однак під даним терміном

для широкого загалу абонентів ММ розуміється цілком конкретна функціональність на базі технологій IP, яка полягає в можливості отримання «потрійної» послуги: «Дані + мова + відео». Стратегічна мета постачальників таких послуг – закріпити свою «присутність» в кожному будинку, стати невід'ємною частиною побуту кожної людини. У технологічному плані не відбулося нічого нового: для передачі даних використовуються Інтернет служби (наприклад, ftp / http), для мови використовуються технології VoIP (Voice over IP) на базі протоколів SIP і H.323, а для відео – технології відеоспостереження, теле-, відео-телефонія, відео-на-замовлення (VoD) та телемовлення по IP (IPTV) [232]. В психологічному плані така «потрійна» послуга, що забезпечує більшу частину інфокомунікаційних потреб сучасної людини, покликана, з часом, витіснити з ринку послуги базової телефонії та стандартного телебачення. Всі ці фактори роблять її дуже привабливою для операторів місцевих мереж зв'язку.

Незважаючи на згадану простоту і опрацьованість телекомунікаційних та інформаційних технологій, що застосовуються в рішеннях "Triple Play", при проектуванні ММ виникає цілий ряд суперечливих вимог, які повинні бути враховані при розробці системного проекту мережі операторського класу. Далі під мережею операторського класу будемо розуміти ММ, яка забезпечує виконання основних вимог щодо надійності та доступності, застосовуваних до мереж зв'язку загального користування. Однією з цілей цієї роботи є створення спрощеної концептуальної моделі ММ, яка б забезпечувала можливість всебічного дослідження з допустимою точністю процесів, що протікають в реальних операторських мережах при наданні послуг «Triple Play».

В даний час абонент – споживач послуг «Triple Play» може користуватися як різноманітним набором термінального обладнання (ПК для доступу та Інтернет, IP телефон для розмов, приставка SetTopBox для телебачення), так і інтегрувати всі послуги в універсальному терміналі на базі мультимедіа ПК. Останній варіант видається більш перспективним, оскільки є масовим і

відносно недорогим. Тому в даній концептуальної моделі під абонентським термінальним обладнанням буде розумітися мультимедіа ПК, що підключається до ММ через Ethernet. Більшість операторів видають тільки одну IP адресу для абонентів, підключених до мережі Ethernet. Тому будемо вважати, що до кожного Ethernet порта підключений тільки один абонентський мультимедіа термінал. Структура ММ може бути розділена на кілька підрівнів мережевої ієрархії (рис. 1.1).

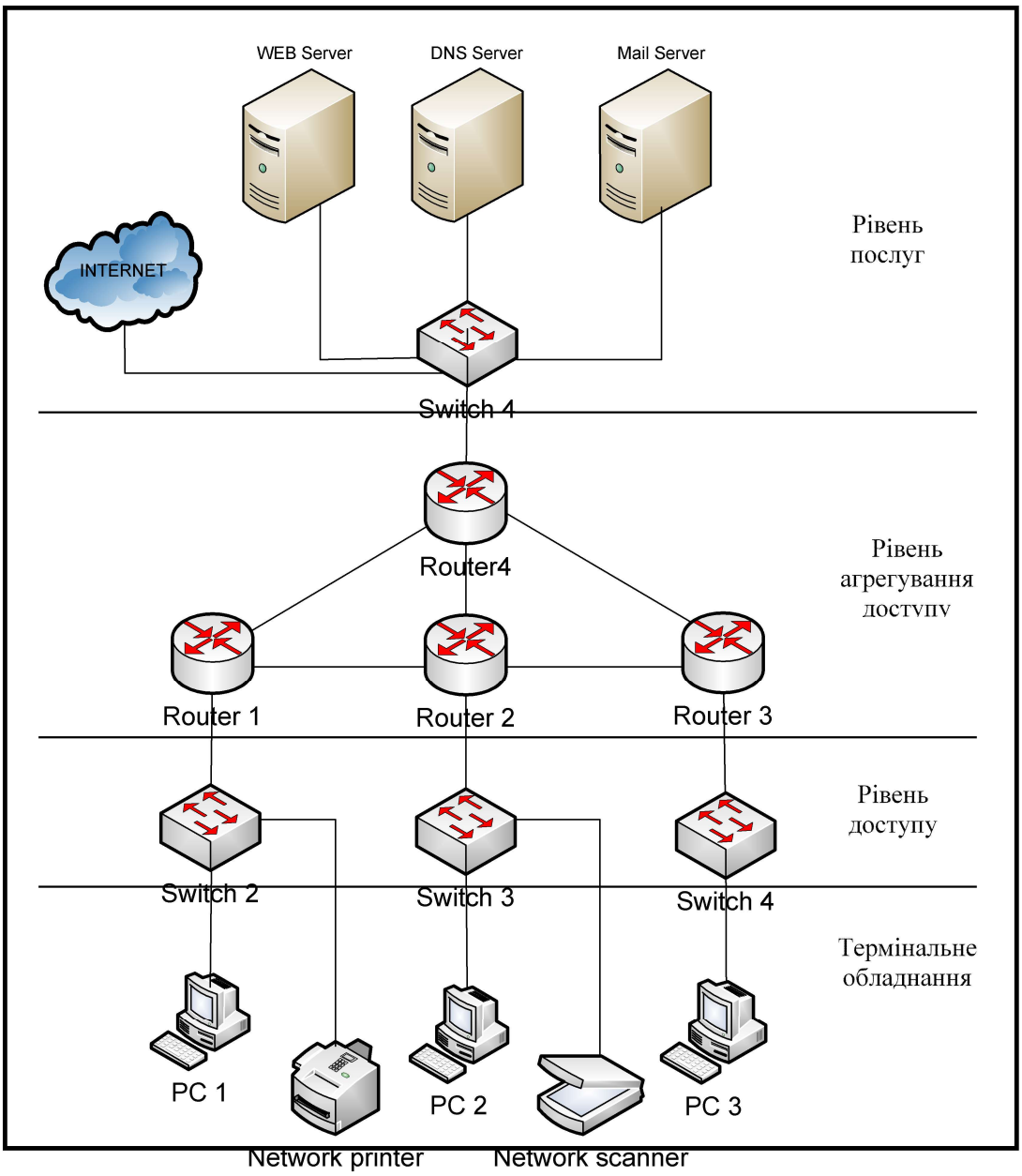


Рис. 1.1. Модель ієрархічної ММ Львівської політехніки

На рівні доступу застосовуються Ethernet комутатори, котрі, в свою чергу, підключаються до маршрутизаторів. На даній ділянці рівня доступу використовується класична топологія «зірка» без резервування. У найпростішому випадку комутатори підключаються до найближчого маршрутизатора рівня агрегування доступу. Для забезпечення структурної надійності на ділянці підключення комутаторів до рівня агрегування доступу рекомендується організовувати резервний канал від обладнання комутатора до іншого маршрутизатора рівня агрегування доступу. Причому перемикання на резервний канал зв'язку з іншим вузлом агрегування доступу здійснюється тільки у разі порушення зв'язку на напрямку основного каналу. Як було описано, комутатори підключаються до вузлів агрегування доступу, які представляють собою маршрутизатори з підтримкою MPLS. В ієрархії MPLS ці маршрутизатори забезпечують одночасну реалізацію функцій LER і LSR (P/PE). На рівні агрегування доступу застосовуються зіркоподібні, кільцеві й повнозв’язні топології, реалізовані оптичними лініями [3,6]. Однак для мінімального забезпечення структурної надійності бажано, щоб кожен вузол агрегування був підключений оптичною лінією не менш ніж до двох вузлів рівня ядра мережі [4]. Магістральні маршрутизатори на рівні ядра мережі виконують функцію LSR (P) і як правило включаються в повнозв’язному режимі. Для забезпечення структурної надійності в мережі операторського класу їх не може бути менше двох.Отримання інформаційного контенту (дані з Інтернет, відеозапис з сервера VoD, мова через шлюз з ТМЗК і т.п.) здійснюється через вузли агрегування послуг, які є маршрутизаторами з реалізацією функцій LER (PE). Для забезпечення структурної надійності на рівні агрегування послуг бажано, щоб кожен маршрутизатор був підключений оптичною лінією не менш ніж до двох вузлів рівня ядра мережі.

Стосовно до специфіки впровадження даних мережевих рішень операторами місцевого зв'язку слід враховувати, що значними обмежувальними факторами при виборі топології мультисервісної мережі є розташування

колодязів і трас первинних каналів, а також історично-сформовані адреси для розміщення технологічного обладнання.

На ділянці доступу здійснюється перенесення консолідованих потоків різнорідного трафіку (дані, відео, мова) без будь-якої пріоритезації на канальному рівні в кадрах Ethernet (рис. 1.2).

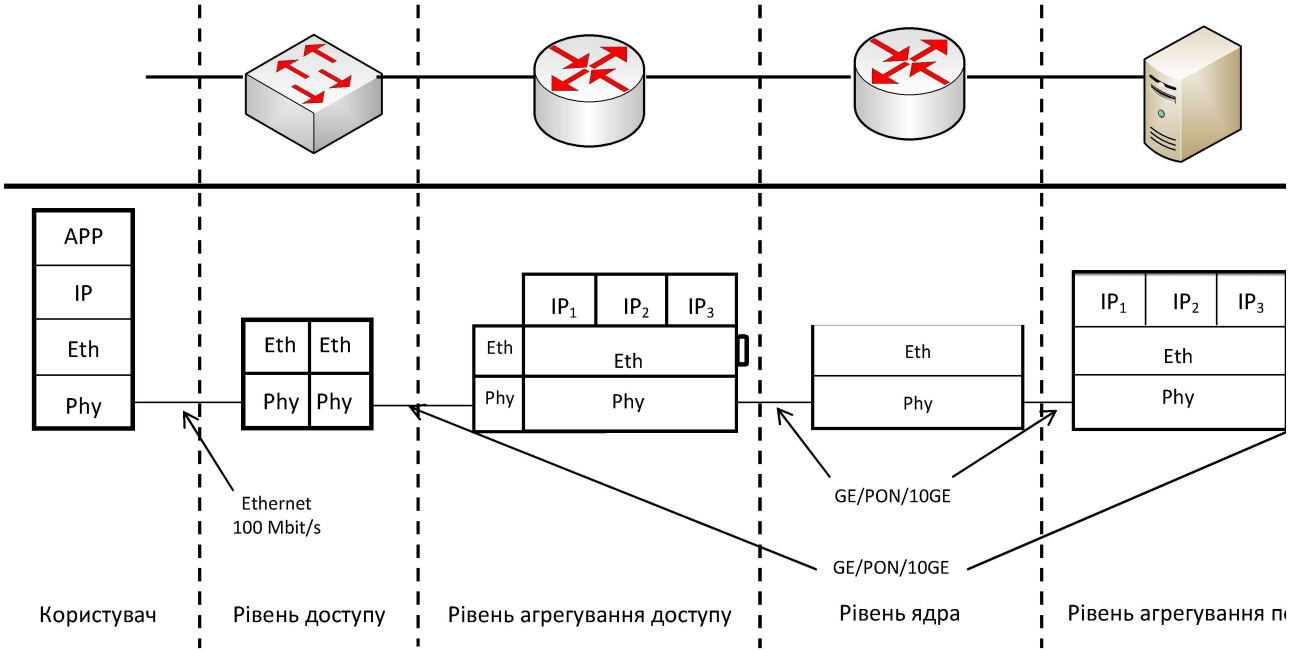


Рис. 1.2. Протокольна структура мультисервісної мережі

Для рівномірного розподілу навантаження на рівні агрегування доступу здійснюється термінування сесій PPPoE (реалізуються функції RAS). У цих же вузлах агрегування доступу здійснюється виділенням IP пакетів з кадрів Ethernet і сортуванням потоків трафіку (дані – IP1/MPLS1, відео-IP2/MPLS2, мова-IP3/MPLS3) за різними буферами MPLS з метою формування класів пріоритетності обслуговування. Найвищий пріоритет призначається для найбільш критичного до затримок мовного трафіку, а для трафіку даних Інтернет призначається нижчий пріоритет. Формування декількох буферів для різних типів трафіку для забезпечення QoS в мережах MPLS дозволяє застосовувати до них різні дисципліни обслуговування. Питання забезпечення QoS в мережах MPLS є пріоритетним напрямком роботи організацій по

стандартизації та розробників мережевого устаткування, проте в даний час для забезпечення QoS в мережах MPLS використовуються два механізми: DiffServ і InServ [18, 19]. Принцип роботи DiffServ полягає в застосуванні механізмів обробки пакетів у вузлах мережі MPLS відповідно до пріоритетів пакетів. Застосування даного механізму підвищує рівень обслуговування в мережі MPLS, однак DiffServ не надає гарантованої якості обслуговування.Для надання гарантованої якості обслуговування в мережах MPLS може застосовуватися технологія IntServ, в основу якої покладено протокол RSVP. Протокол RSVP дозволяє резервувати необхідну смугу пропускання, проте має ряд істотних недоліків, які обмежують його використання в мережах MPLS великого масштабу (операторського класу). Тому в даній концептуальній моделі ММ технологія IntServ не розглядається. Як правило, в устаткуванні операторського класу процеси маршрутизації (OSFP, IS-IS) і розподілу міток (LDP) істотно не впливають на структурну надійність мережі і її стійкість до перевантажень. Тому в протокольній структурі ММ для ділянки MPLS вони не враховуються. У цій ММ враховано, що в реальних маршрутизаторах, що встановлюються на мережах операторського класу на відміну від еталонної моделі MPLS здійснюється не тільки пріоритетна маршрутизація (функція LERTPE), а й внутрішня комутація на рівні MPLS (функція LSR/P). Таким чином, на рівні вузла агрегування доступу здійснюється замикання трафіку, що проходить тільки через один вузол, без виходу на рівень агрегування .

На агрегування доступу мережі здійснюється класична комутація по мітках на рівні MPLS (функція LSR/P) для ефективного розподілу навантаження між вузлами агрегування доступу і вузлами агрегування послуг. На рівні агрегування послуг здійснюється сортування потоків трафіку (дані, відео, мова) і класична пріоритетна маршрутизація (Функція LER / PE), що забезпечує ефективну пріоритетну доставку послуг «Triple Play» в масштабах всієї мережі. Крім протокольної структури істотний вплив на загальну адекватність концептуальної моделі реалізації послуги «Triple Play» реальної

мережі здійснюють характер розподілу і параметри трафіку. Слід враховувати, що для різних додатків характер розподілу трафіку в ММ також буде відрізнятися. Табл. 1.1 містить узагальнені технічні вимоги для VoD.

Таблиця 1.1

Технічні вимоги для VoD

Показник	Стандартна чіткість (SDTV)	
Швидкість відео потоку / кодек	3.18Мбіт / с (MPEB-2)	2.1Мбіт / с (MPEB-4)
Час затримки передачі пакету	<200 мс (рекомендований)	
Варіація часу затримки передачі пакета	<50мс	
Середнє значення коефіцієнту втрат IP пакетів	2.3x10-6	3.3x10-6
Частка помилок в IP пакетах (IPER)	1x10-6	
Клас якості за ITU-T Y.I541	Клас 6, Клас 7	

Табл. 1.2 містить узагальнені технічні вимоги для IPTV.

Таблиця 1.2

Технічні вимоги для IPTV

Показник	Стандартна чіткість (SDTV)		Висока чіткість (HDTV)	
Швидкість потоку / кодек	2.5 Мбіт/с (MPEG-2)	1.75 Мбіт/с (MPEG-4)	15 Мбіт/с (MPEG-2)	10 Мбіт/с (MPEG-4)
Час затримки передачі пакета	<200 мс			
Варіація часу затримки передачі пакета	<50мс			
Середнє значення коефіцієнта втрат IP пакетів	1.9x10-6	3.3x10-6	4.87x10-8	7.31x10-8
Сумарний час перемикання телевізійного каналу	<1 с (<2 с)			
Частка помилок в IP пакетах (IPER)	1x10-6			

На фазі початкового розвитку ММ мовне навантаження в напрямку шлюзу з МЗК істотно перевищує навантаження, що замикається всередині IP мережі, однак у фазі насичення (більше 80% абонентів використовують IP телефонію) ця пропорція змінюється у зворотний бік. Мовленнєве навантаження є симетричним і досить добре вивченим, однак слід враховувати, що вимоги до QoS для мови є максимальними і відповідають класам 0 і 1 по Рекомендації MCE-T Y. Табл. 1.3 містить узагальнені технічні вимоги для IP-телефонії.

Таблиця 1.3

Технічні вимоги для IP телефонії.

Показники	Класи якості	
	Найкращий	Високий
Ступінь задоволеності користувачів	Дуже задоволені	Задоволені
Діапазон значень, R	90 <R <100	80 <R <90
Використовувані мовні кодеки	G.711 (64 Кбіт / с)	G.711, G.723 (5,3 Кбіт / с), G.729 (8 Кбіт / с)
Час затримки передачі пакету	<100мс	<150мс
Варіація часу затримки передачі пакета	<10мс	<50мс
Значення коефіцієнта втрат пакетів	1x10-3	2,5x10-3
Частка помилок в IP пакетах (IPER)	1x10-4	1x10-4
Клас якості за ITU-T Y.I541	Клас 0	Клас 1

Відеотелефонне навантаження пред'являє додаткові вимоги до смуги пропускання відеоінформації, проте абсолютні значення значно залежать від обраного режиму відео (частота кадрів і розширення).

1.2 Забезпечення якості обслуговування мультисервісних корпоративних мереж

1.2.1 Дослідження загальної структури мультисервісної корпоративної мережі наступного покоління

Перехід до інформаційного суспільства і пов'язаний з цим розвиток та вдосконалення відповідних інформаційно-комунікаційних платформ і технологій призвели до створення мультисервісних телекомунікаційних систем і мереж, здатних забезпечити передачу різнорідної інформації (мультимедіа, дані та ін.) із заданими показниками якості обслуговування. У зв'язку з цим на ринку зв'язку постійно оновлюються зразки комутаційного, серверного і кінцевого обладнання, безперервно удосконалюється програмне забезпечення (ПЗ) мережевого обладнання та окремих терміналів [1].

Більшість із відомих корпорації світу прийняли рішення про необхідність створення гнучкої та надійної системи управління конвергентними телекомунікаційними мережами [34]. Розширення номенклатури інфокомунікаційних послуг зумовило появу і практичну реалізацію концепції побудови мереж наступного покоління (Next Generation Network, NGN). Відмінною рисою NGN рішень є поділ функцій надання сервісів і транспортування контенту [231]. В рамках рекомендацій ITU-T NGN визначена як мережа пакетної комутації, яка здатна надавати телекомунікаційні послуги з можливістю використання декількох високошвидкісних транспортних технологій, що забезпечують якість обслуговування і незалежність функцій надання послуг і транспортування пакетів. Однією з головних задач, які повинна виконувати NGN, є забезпечення якості обслуговування при мінімальному використанні (завантаженості) мережевих ресурсів, що має спричинити здешевлення вартості наданих послуг зв'язку в цілому, а також сприятиме залученню більшої кількості користувачів[126-128].

Інфраструктура NGN включає в себе такі рівні (рис.1.3.) :

- рівень управління послугами;
- рівень транспорту;
- рівень доступу.

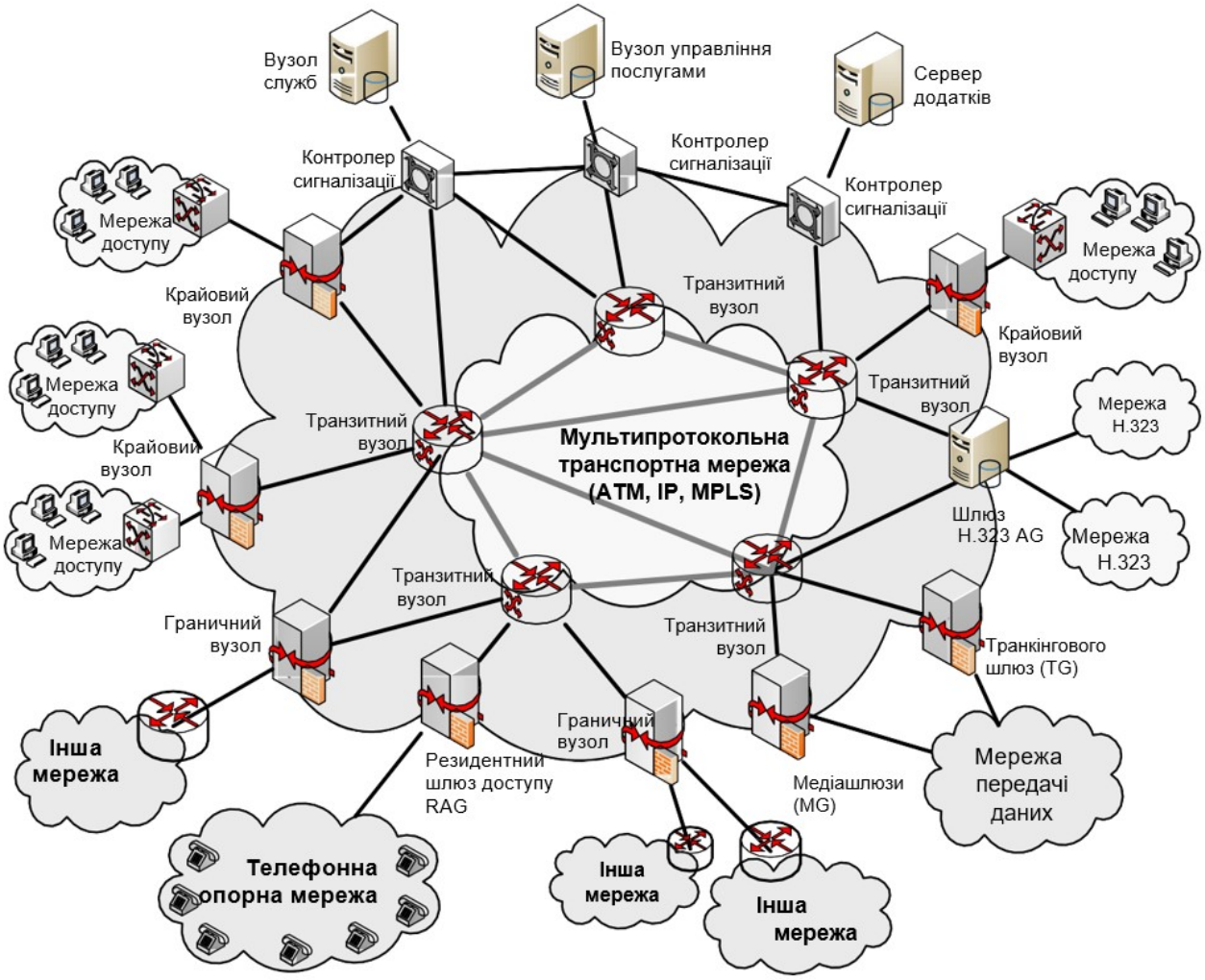


Рис. 1.3. Архітектура мережі зв'язку, відповідно до концепції NGN

Рівень управління послугами складається із значної кількості серверів послуг та управління мережею для якісного надання послуг користувачам мультисервісної телекомунікаційної мережі. Саме на цьому рівні вирішується завдання з підтримки існуючого переліку послуг, а також завдань щодо впровадження нових сервісів з мінімальними витратами і в мінімальні терміни [33].

Рівень транспорту функціонує на основі таких технологій територіально-розподілених мереж (Wide Area Network, WAN), як IP (Internet Protocol), MPLS (MultiProtocol Label Switching) [18] і, все рідше, ATM (Asynchrony Transfer Mode). Основне завдання цього рівня є організація інформаційної взаємодії між мережами доступу, до яких підключені абонентські пристрої. Технології цього рівня в основному базуються на комутації пакетів і овикористовують механізми забезпечення наскрізного QoS [1-5,15-17, 21, 41,42, 45].

Рівень доступу відповідає відповідає за безпосереднє отримання користувачами запитуваних сервісів та їх взаємодії з використанням можливостей і засобів транспортного рівня NGN. Описана вище градація за рівнями дає змогу реалізувати на практиці мультисервісне рішення з підтримкою різних типів якості обслуговування.

На сучасному етапі проблеми побудови мультисервісних мереж приділяється велика увага. Складність полягає у виборі адекватної моделі мережі призначеного для різних користувачів зрізними потребами та вимогами до якості обслуговування [123]. На даному етапі розвитку інфокомунікацій існують відмінності підходів до побудови та моделювання таких мереж. Сучасні мультисервісні мережі повині орієнтуватися на користувачів, оскільки група користувачів яка орієнтована на послуги може мати різні вимоги щодо якості обслуговувування. Таким чином, при побудові корпоративних мультисервісних мереж методи управління ресурсами та трафіком повині забезпечувити висунуті вимогам користувачам, для забезпечення необхідної якості обслуговування, що потребує необхідних механізмів динамічної пріоритезації інформаційних потоків. Подальший прогрес по розширенню сфери застосування сучасних інформаційно-мережевих засобів телекомунікації лежить на шляхах підвищення ефективності та забезпечення більш високої якості використання мережевих ресурсів.

1.2.2 Класифікація основних показників якості обслуговування та мережевих ресурсів

Сьогодні методи забезпечення QoS займають одне з найважливіших місць в арсеналі технологій мереж з комутацією пакетів, оскільки без їх застосування неможлива робота сучасних мультимедійних додатків. Ці методи оперують параметрами, які характеризують швидкість передавання даних, затримку передавання і втрату пакетів. Це пояснює, чому якість обслуговування в мережах IP залишається предметом постійної уваги міжнародних організацій стандартизації в електрозв'язку [2].

Незважаючи на те, що пропускна здатність та надійність сучасних каналів зв'язку та мережевого обладнання, завдяки успіхам технологій фізичного рівня OSI (Open Systems Interconnection), невпинно поліпшуються, на верхніх рівнях, особливо на мережевому та транспортному, ці ресурси не завжди розподіляються належним чином. Перш за все це стосується врахування необхідності правильної конфігурації мереж із забезпечення диференційованої якості обслуговування та відповідного управління канальним та буферним ресурсом мультисервісної телекомунікаційної мережі.

Для забезпечення необхідної якості обслуговування в мережах IP розроблено безліч механізмів, методів і протоколів, зокрема механізми класифікації та маркування вхідного трафіку, механізми формування та управління інтенсивністю трафіку, механізми резервування ресурсів, механізми запобігання перевантажень і управління трафіком в разі їх виникнення і безліч інших. Щоб максимально ефективно використовувати інструментарій QoS необхідно добре розуміти основні концепції та знати можливості відповідних технологій. Успішна конфігурація мережевих пристроїв та впровадження механізмів QoS, дозволяє максимально оптимізувати продуктивність мереж і забезпечити стабільне функціонування нового покоління мультимедійних і голосових додатків. Тому важливим стає завдання вивчення основ технології забезпечення QoS [163-165].

В сучасних IP-мережах, що реалізують принципи побудови NGN, виділяють наступні основні типи якості обслуговування, що використовуються для підтримки різних мережевих сервісів (рис. 1.4):

- best effort service, обслуговування по можливості, при якому ніяких гарантій надання сервісу не надається;
- сервіс з перевагою або диференційоване обслуговування (Differentiated Service, DiffServ), при якому ступінь задоволення QoS- вимог залежить від класу (пріоритету) трафіку;
- гарантований сервіс (Guaranteed Service) або інтегроване обслуговування (Integrated Service, IntServ), при якому забезпечуються гарантії в задоволенні QoS-вимог на основі резервування мережевих ресурсів [177].

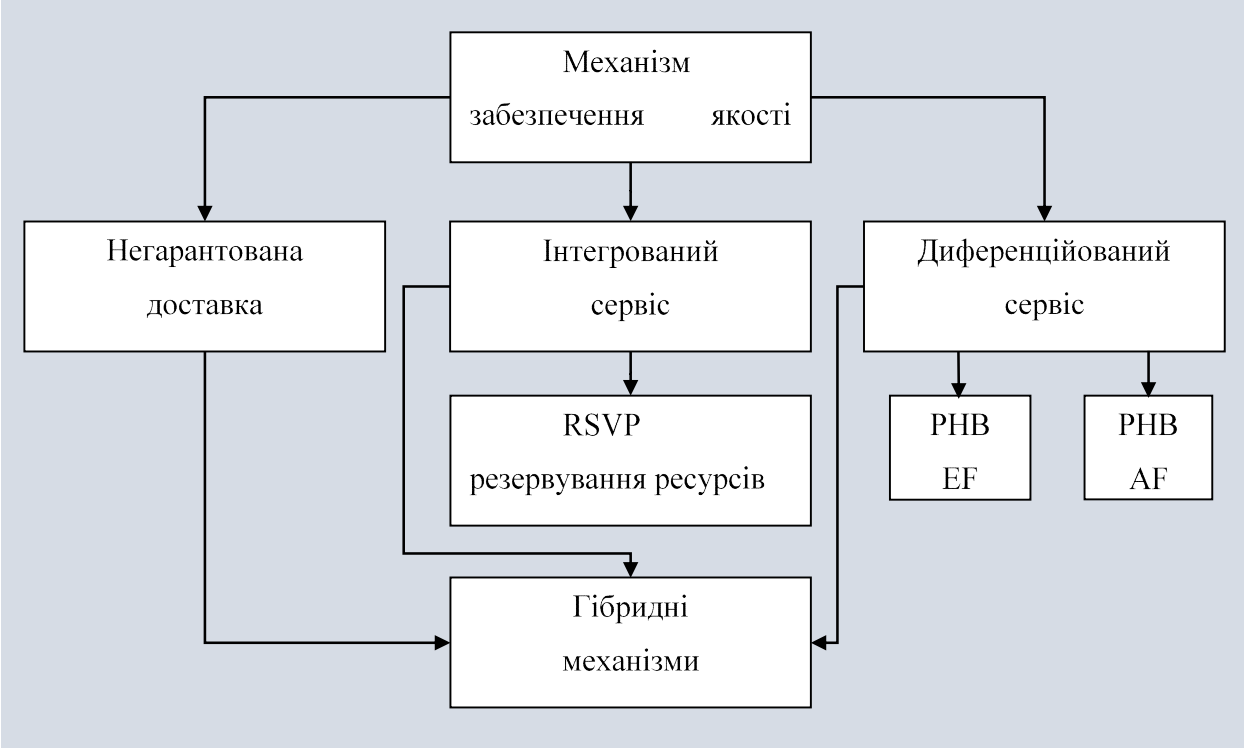


Рис. 1.4. Класифікація методів забезпечення якості обслуговування

Простота пріоритетності трафіку в DiffServ та можливість масштабування, в порівнянні з IntServ, забезпечують набагато менші витрати на реалізацію; підвищену надійність за рахунок того, що класифікація

відбувається на кордоні DiffServ-домена без виконання службових запитів; визначають гнучкість технології DiffServ. Однак, дана технологія не дає повної гарантії забезпечення QoS, а лише забезпечує відносне збільшення смуги пропускання для більш пріоритетних потоків [69-71].

Таким чином, забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS) в сучасних мультисервісних телекомунікаційних мережах було й залишається актуальною науковою та практичною задачею, оскільки спектр інфокомунікаційних послуг безперервно розширюється, а їх вимоги щодо QoS стають все більш жорсткими. Результати аналізу структури сучасного мережевого трафіку (рис.1.5) з точки зору складу сервісних потоків і додатків дали змогу зробити висновок про те, що число мультимедіа контенту в телекомунікаційній мережі постійно зростає, як і збільшується число додатків, для яких необхідно забезпечити гарантії за якістю обслуговування [23-25, 106, 110].

Рис. 1.5. Структура сучасного мережевого трафіку з точки зору складу сервісних потоків і додатків

Структурний склад переданого трафіку також буде зазнавати зміни. Якщо на початкових етапах переходу до концепції NGN домінував трафік даних, то тепер найбільше навантаження створює відео-трафік, частка якого згідно з прогнозами далі зростатиме. Також відзначається тенденція зростання частки інтернет-трафіку, що доставляється користувачам системами CDN (Content Delivery Networks) [44, 115-117].

З точки зору характеристики основних мережевих ресурсів варто зазначити, що в загальному випадку має місце їх класифікація, представлена на рис. 1.6.

Рис. 1.6. Класифікація мережевих ресурсів

До **апаратних ресурсів**, перш за все відносять:

- пропускну здатність інтерфейсів маршрутизаторів, яка може досягати в перспективних рішеннях десятки терабіт за секунду (Тбіт / с);
- продуктивність самого маршрутизатора, яка виросла від десятків пакетів за секунду (70-і роки 20-го століття) до мільйонів / мільярдів пакетів за секунду (початок 21 століття);
- буфер черги маршрутизатора, в якому очікують свого обслуговування пакети при перевантаженні каналу зв'язку. Його розмір варіюється в межах десятків пакетів, з одного боку, для мінімізації ймовірності втрат пакетів, а з іншого - для керованості величиною середньої затримки пакетів.

Програмні ресурси - це, перш за все, програмне забезпечення комутаційного обладнання (комутаторів і маршрутизаторів), серверів послуг і терміналів користувачів. Всі керуючі протоколи і механізми фактично є частиною спеціального програмного забезпечення маршрутизатора або комутатора.

Мережевий трафік, зміст таблиць маршрутизації і баз даних про стан телекомунікаційної мережі - це **інформаційний ресурс**, який також перерозподіляється з метою забезпечення збалансованої завантаженості телекомунцікаційної мережі.

Ефективне управління перерахованим мережевим ресурсом, особливо з точки зору його перерозподілу в інтересах потоків того чи іншого додатку або сервісу, спрямовано, перш за все, на підвищення якості обслуговування основних показників QoS (рис. 1.7). Основними показниками QoS є показники продуктивності (швидкісні показники), показники тимчасової прозорості (тимчасові показники) і показники семантичної прозорості (показники надійності і достовірності).

До основних показників продуктивності (швидкісні показники) мережі зазвичай відносять мінімальну, максимальну і середню швидкість передачі пакетів, що вимірюється, як правило, в біт / с (кбіт / с Мбіт / с). Ці значення, як правило, вказуються в угоді про рівень сервісу (Service Level Agreement, SLA) [206-207, що укладається між користувачем і провайдером. У цьому ж документі можуть прописуватися і необхідні значення часових показників-середньої затримки (IP packet transfer delay, IPTD) і джитера пакетів (IP packet delay variation, IPDV), але вже при наданні мультимедіапослуг.

Рис. 1.7. Класифікація показників QoS

У рекомендаціях ITU-T Y.1540 і Y.1541 вказані орієнтовні значення для міжкінцевих часових показників, які можуть варіюватися від десятків до сотень мілісекунд в залежності від класу потоку, що підлягає обслуговуванню. До показників надійності традиційно відносять ймовірність втрат пакетів або, наприклад, ймовірність доставки пакета не за адресою. Як показано в табл. 1.4 сучасні мережеві додатки по-різному чутливі до зміни чисельних значень основних показників якості обслуговування [30,162, 191].

Мультимедійним трафіком є цифровий потік даних, який містить різні види повідомлень. Залежно від типу наданого сервісу виділяються дві основні категорії мультимедійного трафіку.

1. Трафік реального часу (далі ТРЧ), що надає мультимедійні послуги для передачі інформації між користувачами в реальному масштабі часу.

2. Трафік звичайних даних (далі ТЗД), який утворюється традиційними розподіленими послугами сучасної телекомунікаційної мережі, такими, як

електронна пошта, передача файлів, віртуальний термінал, віддалений доступ до баз даних та ін.

Таблиця 1.4

Характер вимог мережевих додатків до рівня QoS

Тип додатку	Надійність	Середня затримка	Джиттер	Швидкість передавання
Електронна пошта	Висока	Низька	Низький	Низька
Передаваня файлів	Висока	Низька	Низький	Середня
Web доступ	Висока	Середня	Низький	Середня
Аудіо за запитом	Низька	Низька	Високий	Середня
Відео за запитом	Низька	Низька	Високий	Висока
Телефонія	Низька	Висока	Високий	Низька
Відеоконференція	Низька	Висока	Високий	Висока

В цьому зв’язку потокам (повідомленням, пакетам) різних застосувань необхідно виділяти різні обсяги мережевих ресурсів, щоб забезпечити диференціацію рівня обслуговування. В сучасних телекомунікаційних мережах реалізовано безліч технологічних засобів (протоколів, механізмів) забезпечення якості обслуговування, заснованих на управлінні доступним мережевим ресурсом і трафіком зокрема.

1.2.3 Засоби забезпечення якості обслуговування на основі управління мережевим ресурсом

Рівень якості обслуговування, що забезпечується тією чи іншою телекомунікаційною мережею, багато в чому визначається як обсягом доступного мережевого ресурсу, так і ефективністю його розподілу. Тому для забезпечення QoS в телекомунікаційній мережі задіюються можливості всіх рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем. При цьому фізичний і

канальний рівні безпосередньо беруть участь у формуванні мережевого ресурсу, який в подальшому необхідно грамотно розподілити вже засобами мережевого і транспортного рівнів [159-161].

На рис. 1.8 перераховані основні засоби мережевого рівня OSI, які беруть безпосередню участь в розподілі доступного канального і буферного ресурсу.

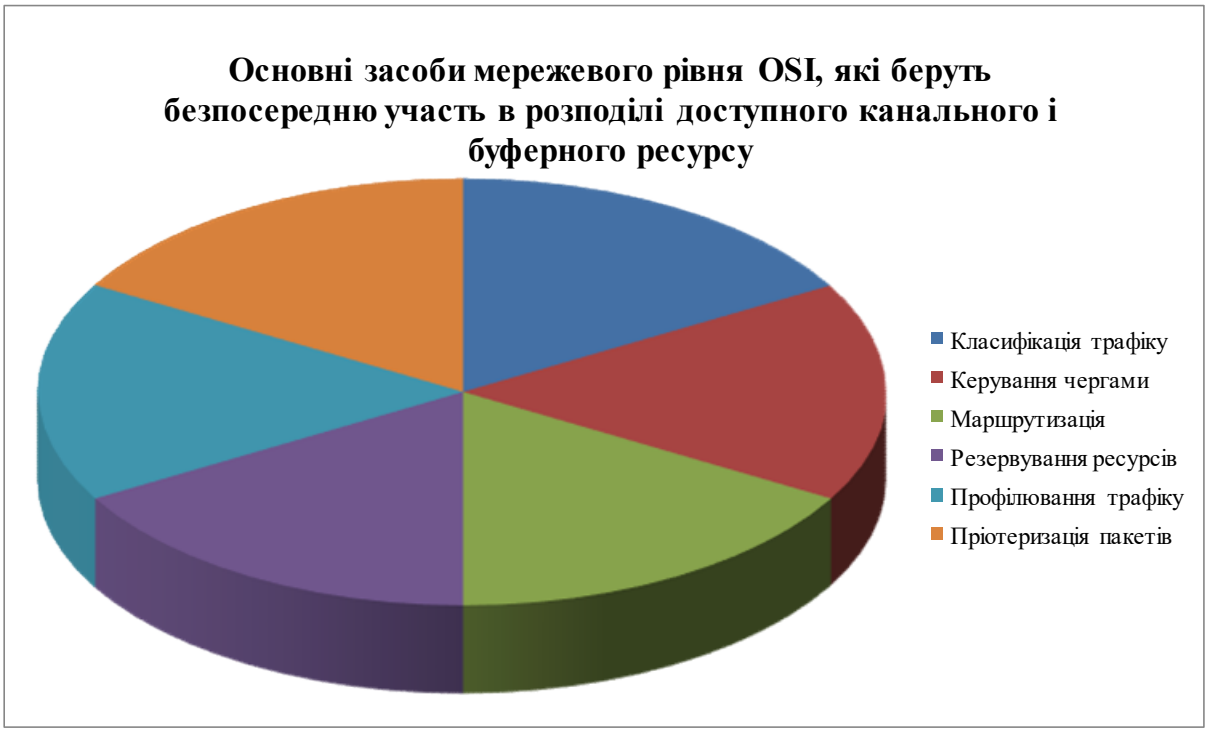


Рис. 1.8. Основні засоби мережевого рівня OSI, які беруть безпосередню участь в розподілі доступного канального і буферного ресурсу

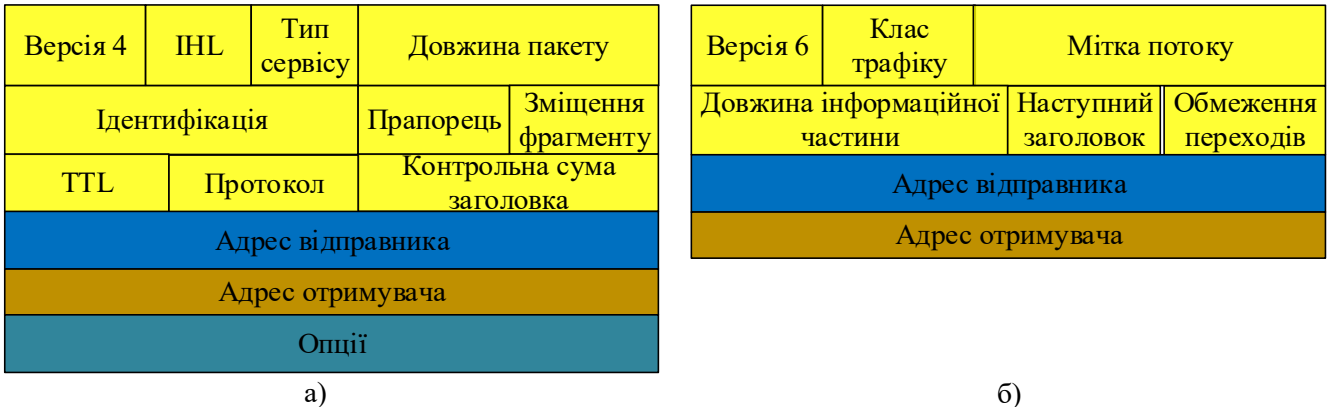
Основою забезпечення якості обслуговування в IP і MPLS-мережах є процеси класифікації та маркування (пріоритетності) пакетів. Лише ефективне рішення даних завдань, що полягає в коректному визначенні типу (класу) переданого контенту і присвоєння відповідного пріоритету, дозволить в подальшому іншим засобам управління трафіком забезпечити належний розподіл мережевого ресурсу в інтересах даних потоків.

Завдання класифікації полягає у визначенні класу (типу) переданого трафіку шляхом аналізу вмісту заголовка IP-пакета і / або характеристик потоку

пакетів в цілому. Ідентифікація класу потоку, як правило, ґрунтується на аналізі значної кількості параметрів, до яких, перш за все, відносять такі:

- IP-адреса джерела пакету;
- IP-адреса одержувача пакета
- MAC-адреси джерела і одержувача пакетів;
- стандартний або розширений список доступу до джерел / адресатів;
- номери портів джерела або одержувача пакетів;
- зміст полів пріоритету IP-пакета: DSCP або IP Precedence;
- код довжини пакета;
- 0-99 QoS-group;
- зміст поля CoS.

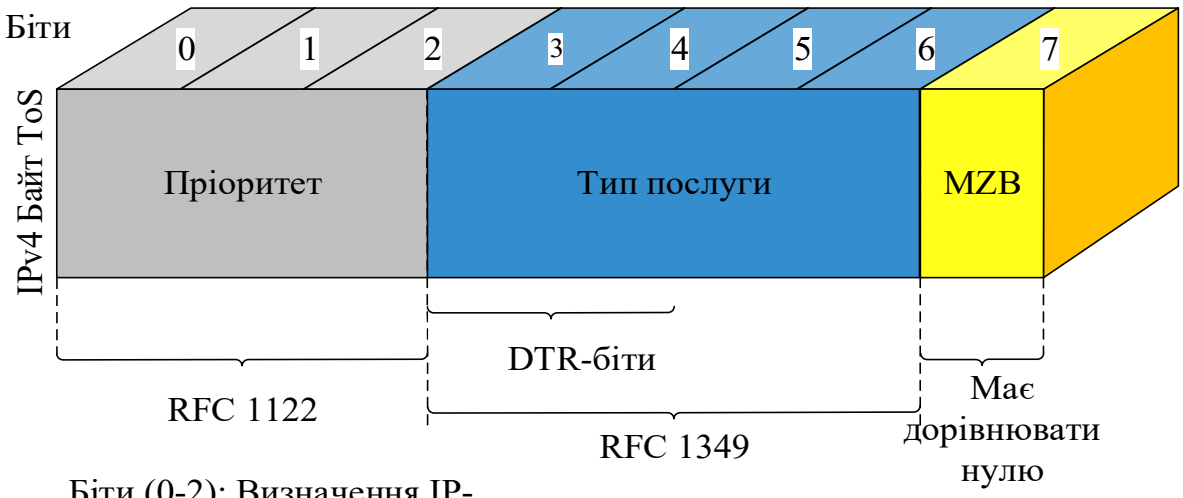
Пріоритезація - основа моделі DiffServ, тому помилки при класифікації трафіку приводять до неправильного присвоєння пріоритету, в подальшому можуть помітно знизити ефективність розподілу мережевого ресурсу і забезпечення якості обслуговування. Пріоритет пакета записується в байті типу обслуговування (Type of Service, ToS) в заголовку пакета IPv4 або байті класу трафіку (Traffic Class) пакета IPv6. За це відповідають поля DSCP (Differentiated Services Code Point) і IP Precedence [179-182](рис. 1.9).



а) б)

Рис. 1.9 Заголовки IPv4 (а) і IPv6 (б)

На рисунку 1.10 продемонстровано, яких значень може набувати байт ToS в пакетах IPv4 та IPv6 [215-217].



Біти (0-2): Визначення IP-Пріоритету
111 – контроль мережі
110 – міжмережевий контроль
101 – CRITIC/ECP
100 – миттєве відкидання
011 – відкидання
101 – негайний
001 – пріоритетний
000 – звичайний

Біти (3-6): Визначення типу сервісу
0000 – всі нормальні
1000 – мінімальна затримка
0100 – максимальна пропускна здатність
0010 – максимальна надійність
0001 – мінімальні грошові затрати

Рис. 1.10. Оригінальний байт ToS в IPv4

Для маркування застосовують 6-товий шаблон (Differentiated Services Code Point, DSCP), структуру якого показано на рисунку 1.11.

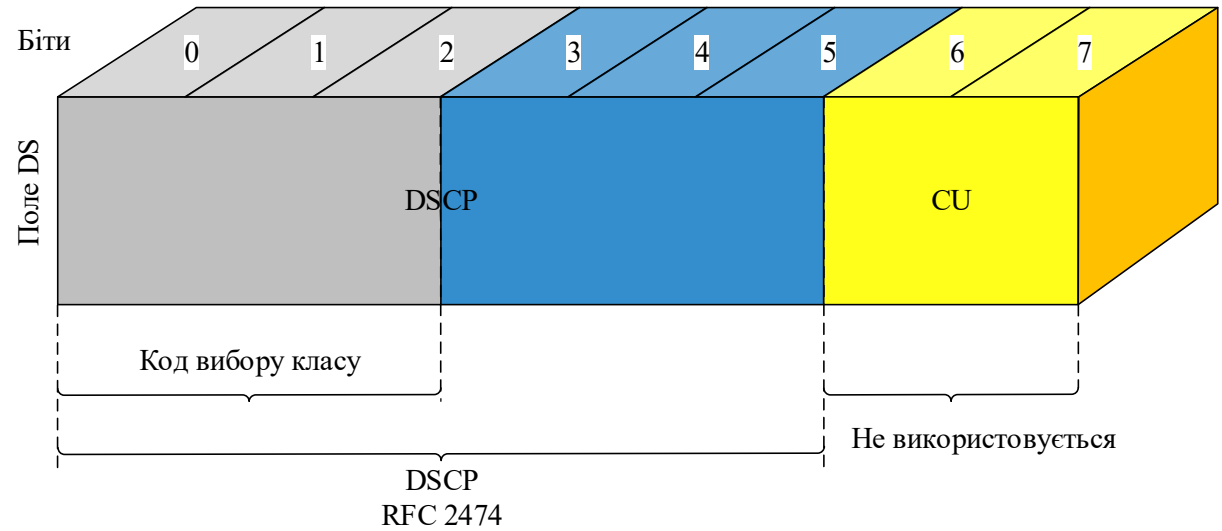


Рис. 1.11. Кодове поле Diffserv

Маркування пакетів може здійснюватися на прикордонному маршрутизаторі транспортної мережі (найчастіше), на комутаторі з підтримкою функцій третього рівня або на «інтелектуальному» термінальному пристрої, наприклад, на VoIP-телефоні [158].

Протоколи маршрутизації, основними з яких в IP-мережах є RIP (Routing Information Protocol), IGRP (Interior Gateway Routing Protocol), OSPF (Open Shortest Path First), IS-IS (Intermediate System to Intermediate System), BGP (Border Gateway Protocol), EGP (Exterior Gateway Protocol) і I-PNNI (Integrated Private Network to Network Interface), відповідають за розрахунок одного або безлічі маршрутів між заданою парою (парами) маршрутизаторів телекомунікаційної мережі. Подібні протоколи, грунтуючись на постійному моніторингу стану мережі (її топології та завантаженості), формують таблиці маршрутизації, відповідно до яких потоки або окремі пакети автоматично перенаправляються до одержувачів [38, 39].

Позитивною рисою маршрутних протоколів є те, що збирання, обробка інформації про стан мережі і формування маршрутних таблиць (МТ) здійснюються при мінімальному втручанні адміністратора мережі, чого не скажеш про більшість інших засобів управління трафіком. У функції адміністратора входить коригування таймерів оновлення та констант (variance), що відповідають за балансування навантаження [184-189].

Недоліком більшості протоколів маршрутизації залишається використання досить примітивних за своїми можливостями алгоритмів Дейкстра і Беллмана-Форда розрахунку найкоротшого шляху на графі, які орієнтують на реалізацію одного шляху маршрутизації і не здійснюють облік характеристик переданих потоків пакетів [41, 190].

Перспективні рішення в області маршрутизації, наприклад, протокол CSPF (Constrained Shortest Path First), дозволяє враховувати не тільки топологію телекомунікаційної мережі, а й завантаженості каналів зв'язку і буферів черг на її маршрутизаторах. Це забезпечується на етапі формування маршрутних

метрик, які повинні враховувати як номінальну, так і доступну пропускну здатність каналів зв'язку. Можливість використання композитних метрик відкриває потенціал з обліку безлічі показників якості обслуговування при розрахунку шуканого маршруту.

Важливий відбиток на розвиток більшості засобів управління трафіком, забезпечення якості обслуговування в цілому і протоколів маршрутизації зокрема наклала технологія Traffic Engineering (TE) . Її метою є забезпечення збалансованої завантаженості мережевих ресурсів (канальних, буферних, обчислювальних) в ході використання розрахованої кількості шляхів, тому що балансування навантаження передбачає реалізацію багатоколійні стратегії маршрутизації. Практичне використання технології Traffic Engineering безсумнівно призводить до ускладнення маршрутних рішень, тому що необхідно розраховувати і підтримувати в ході управління не один, а велику кількість маршрутів. Але це компенсується поліпшенням якості обслуговування в телекомунікаційній мережі, особливо при високому навантаженні на мережу.

Варто зазначити, що протоколи маршрутизації здійснюють розрахунок таблиць маршрутизації і їх використання, а ось управління трафіком уздовж обраного маршруту вже покладається на засоби управління чергами та резервування ресурсів на кожному конкретному маршрутизаторі (рис. 1.12).Як правило, на прикордонних маршрутизаторах виконується дуже важлива функція, пов'язана з профілюванням трафіку. Вона реалізується з допомогою механізмів Traffic Shaping / Policing, заснованих на алгоритмах token bucket і leaky bucket, і виконується з метою обмеження швидкості надходження пакетів в мережу через можливе перевантаження або порушення SLA-договору.

Доповнюють функціонал засобів забезпечення якості обслуговування (особливо в умовах можливого перевантаження) механізми управління чергами, які фактично відповідають і за вирішення завдань з розподілу пропускної здатності каналів зв'язку між потоками користувачів.

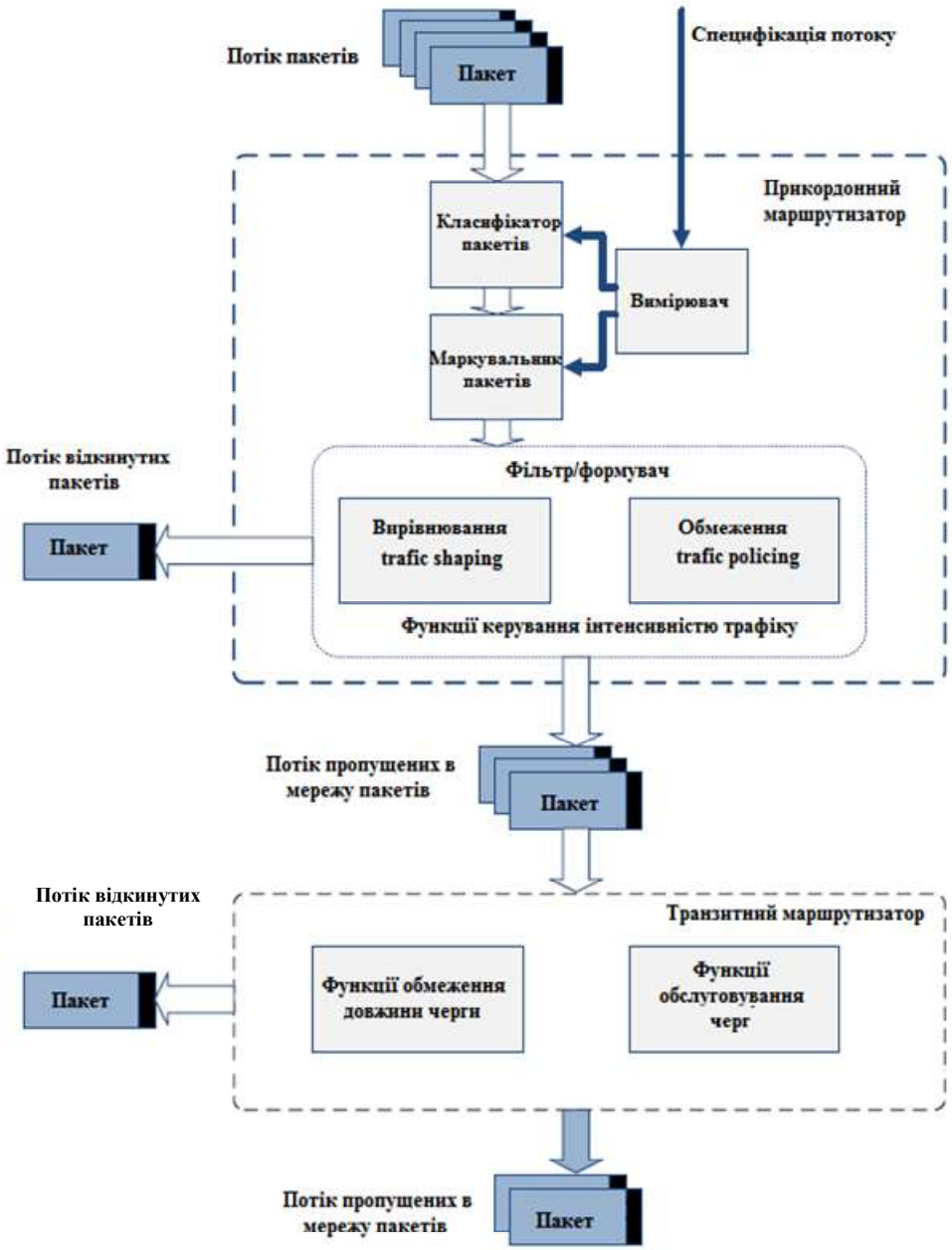


Рис. 1.12. Загальна схема обробки пакетів на маршрутизаторах телекомунікаційної мережі

Як показав проведений аналіз [114,129-134] , в сучасному комутаційному обладнанні реалізована велика кількість механізмів управління чергами як з точки зору їх формування та обслуговування (FIFO, PQ, CQ, FQ / WFQ, CBQ, LLQ), так і запобігання перевантаження (RED, WRED, ECN, SPD). Вони відрізняються своїми можливостями по диференціації обслуговування,

можливостями по налаштуванню і ефективністю в цілому. Рішення щодо включення того чи іншого механізму на конкретному інтерфейсі приймає адміністратор мережі [136-140].

1.3 Механізми та підходи управління чергами на маршрутизаторах телекомунікаційної мережі

Умовно механізми управління чергами можна розділити на дві групи: механізми обслуговування черг і механізми превентивного обмеження довжини черги (рис. 1.13).

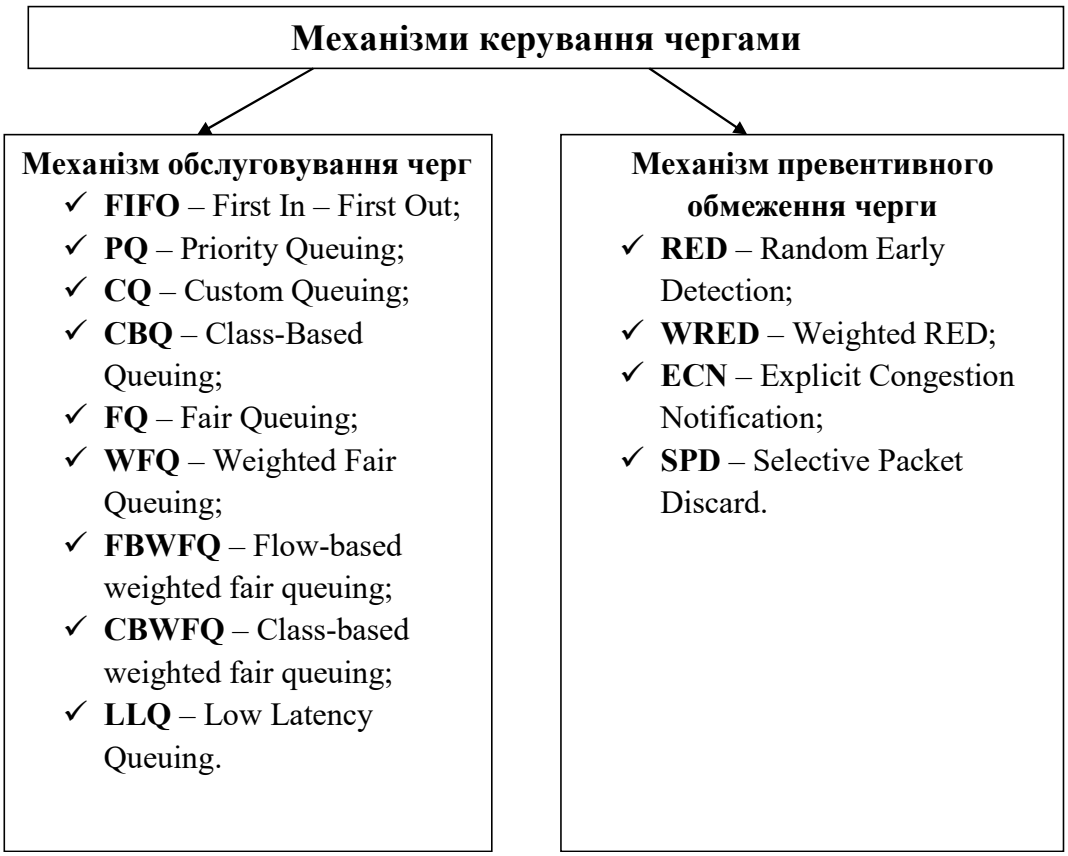


Рис. 1.13. Класифікція механізмів управління чергами

За їх допомогою можна визначити число організованих на інтерфейсі черг, виставити максимально можливу довжину черги, контролювати завантаженість у черзі і управляти процесом відкидання пакетів в разі

перевантаження інтерфейсу. Ряд механізмів допускають настройку порядку черговості обслуговування пакетів.

Важливо відзначити, що деякі механізми вирішують покладені на них завдання в автоматичному режимі, а деякі з технологічних засобів управління чергами вимагають постійного втручання адміністратора мережі. Зупинимося на перевагах і недоліках основних механізмів управління чергами, порівнявши їх і визначивши область їх доцільного застосування.

Механізм FIFO (First In, First Out) заснований на однойменному алгоритмі. При його використанні на інтерфейсі мережевого пристрою організовується одна черга, розмір якої становить 40 пакетів. Відповідно черговість обробки пакетів повністю визначається порядком їх поступлення в чергу та залежить від пріоритета пакету, класу та розміру. Відсутність механізмів диференціації в обробленні є основним недоліком даного рішення, проте цей механізм широко використовується на практиці, тому що його реалізація вносить мінімальні затримки на обробку пакетів і практично не займає процесорний час маршрутизатора [194-195]. Наприклад, в маршрутизаторах, вироблених компанією Cisco, даний механізм включається «за замовчуванням» на високошвидкісних інтерфейсах, що мають продуктивність 2 Мбіт / с і вище. Це визначається тим, що ймовірність його перевантаження невисока і немає сенсу організовувати систему черг і необгрунтовано витрачати час на обробку пакетів в них. В умовах ймовірного перевантаження інтерфейсу використання механізму FIFO вкрай небажане. Крім того, цей механізм використовується при обробці пакетів в межах кожної окремої черги, організованої за допомогою інших механізмів, наприклад, CQ, PQ або WFQ [135]. Механізм пріоритетних черг (Priority queueing, PQ) містить чотири черги: {high | medium | normal | low}, розміри яких “за замовчуванням” становлять 20, 40, 60 і 80 пакетів відповідно. Планувальник пакетів працює за таким принципом: пакети з даної черги почнуть оброблятися в тому випадку, коли більш пріоритетні черги в цей же момент часу порожні. Таким чином,

системний адімінстратор, як і в FIFO, не може вплинути на черговість обробки. Отже, можливості по диференціації обслуговування в механізмі PQ вище, ніж в механізмі FIFO. Якщо направити чутливий до затримки потік VoIP в чергу {high}, то цим забезпечиться максимально високий рівень якості обслуговування. Однак неправильно сконфігуровані списки доступу можуть послужити причиною повного блокування обслуговування пакетів в фонових чергах, що обмежує використання PQ на практиці.

В обладнанні також реалізований механізм звичайних черг (Custom Queuing, CQ), за допомогою якого вже організовується 16 черг (і 1 системна). Заповнення черг, як і в разі застосування PQ, здійснюється в ході формування ACLs. Обслуговування черг, тобто визначення черговості передачі пакетів з черги в канал, здійснюється в карусельних режимі (Round Robin), але число відправлених пакетів за один цикл перегляду черги регулюється за допомогою керуючого параметра - лічильника байт (Byte Counter). Цей лічильник «за замовчуванням» для кожної черги дорівнює 1500 байт. Збільшуючи або зменшуючи значення даного параметра, адміністратор може регулювати рівень якості обслуговування пакетів в черзі, що налаштовується. До недоліків механізму CQ варто віднести відсутність обліку пріоритету пакета та інших його параметрів при організації процесу обслуговування.

Сімейство механізмів «справедливих» або «чесних» черг включає в себе рішення FQ (Fair Queuing), WFQ (Weighted FQ) і FB-WFQ (Flow-based WFQ). Незаперечною перевагою даних механізмів є підтримка «за замовчуванням» до 256 черг (з можливістю адміністративного збільшення до 4096). Це значно перевищує можливості по диференціації обслуговування вище розглянутих рішень. Формування та обслуговування черг пакетів в даному випадку здійснюється автоматично, тобто практично без втручання адміністратора, який додатково може ще змінювати розмір буфера черги [196].

Механізм FQ при визначенні порядку обслуговування шляхом розрахунку і порівняння порядкових номерів пакета віддає перевагу коротким пакетам, за

допомогою яких циркулює мультимедійний трафік, чутливий до затримок і джитеру (табл. 1.1). У механізмі WFQ на порядок обслуговування також впливає додатково і пріоритет пакета, який через вагу пакета впливає на розрахунок порядкового номера пакета.

З огляду незаперечних переваг механізму WFQ, до числа яких, перш за все, відносять високу диференціацію обслуговування (організовує 256 черг); автоматичне функціонування (і при формуванні черг, і при їх обробці); облік довжини пакета і його пріоритету, саме його рекомендують як рішення «за замовчуванням» на низько швидкісних інтерфейсів, що мають продуктивність менше 2 Мбіт / с.

У разі обробки мультимедійного трафіку, коли важливо враховувати не тільки пріоритет пакетів, а й інтенсивність самого потоку, доцільно використовувати механізм FB-WFQ, тобто засновані на потоці зважені чесні черги. В основу даного рішення покладено математичний вираз для розрахунку B_j, тобто пропускної здатності, виділеної для кожного потоку з j-м IP-пріоритетом. Все більше уваги останнім часом приділяється технологічним рішенням з управління трафіком, заснованим на класах обслуговування. Механізм CBQ (Class-Based Queuing) передбачає організацію класових черг і виділення їм заданої частини пропускної здатності інтерфейсу в явному вигляді, а не побічно, як в механізмі CQ, через лічильник байт. Класи черг формуються за допомогою все тих же списків доступу. Наприклад, в механізмі CBWFQ (Class-Based WFQ) організовується 64 класових черги, в т.ч. одна черга «за замовчуванням», яка може працювати в режимі WFQ, розподіляючи між некласифікованими потоками 25% від пропускної здатності інтерфейсу. Частина пропускної здатності інтерфейсу, що залишилася, може адміністративно за допомогою команди «bandwidth» перерозподілятися між класовими чергами. У механізмі LLQ (Low Latency Queuing), також відомому як PQ-CBWFQ, в доповненні до черг CBWFQ вводиться додаткова пріоритетна черга, яка визначається командою «priority» для виділення ресурсів.

Рішення, засновані на класах, дозволяють організувати досить велике число черг з наперед заданим рівнем диференціації, тому що і в класових чергах можна використовувати режим роботи WFQ. Але рішення задач по формуванню (заповненню) черг шляхом класифікації трафіку та визначення порядку обслуговування пакетів повністю покладається на адміністратора мережі. Тому ефективність одержуваних рішень повністю залежить від його досвіду і рівня кваліфікації.

У табл. 1.5 наведені результати порівняльного аналізу і коротка характеристика вищерозглянутих механізмів обслуговування черг.

Таблиця 1.5

Результати порівняльного аналізу і коротка характеристика вище розглянутих механізмів обслуговування черг

Властивість механізму	Назва механізму					
	FIFO	PQ	CQ	FQ/WFQ, FB-WFQ	CBWFQ	LLQ
Число черг (за Замовчуванням)	1	4	16	256 (можна збільшити до 4096)	64	64+1
Формування черги	Авт.*	Ручн., CLI-ACLs	Ручн., CLI-ACLs	Авт.	Ручн.**, CLI-ACLs	Ручн., CLI-ACLs
Обслуговування черги (планувальник)	Авт.	Strict Priority	Round Robin, Byteco unter	Авт.	Ручн., CLI	Ручн., CLI
Забезпечення QoS-гарантій	Немає	Немає	Немає	Немає	Є	Є

* Авт. – автоматичнее рішення;
** Ручн. – ручна конфігурація.

На інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж також налаштовуються і функціонують засоби запобігання перевантаження черг на основі превентивного обмеження довжини черги. Ці

засоби ще називають механізмами активного управління чергою (Active Queue Management, AQM), на відміну від схеми Tail drop, яка реалізує пасивну стратегію обмеження довжини черги по її фактичному переповненню [246-250].

Найбільш поширеними AQM-механізмами є:

- механізм випадкового раннього виявлення - RED (Random Early Detection);
- механізм зваженого випадкового раннього виявлення - WRED (Weighted RED);
- механізм зваженого випадкового раннього виявлення на основі потоку - Flow WRED;
- механізм явного повідомлення про перевантаження - ECN (Explicit Congestion Notification);
- механізм вибіркового відкидання пакетів - SPD (Selective Packet Discard).

До основних цілей і завдань AQM-механізмів варто віднести такі:

1. Забезпечення керованості процесом боротьби з перевантаженням на інтерфейсі маршрутизатора.
2. Мінімізація ймовірності виникнення ефекту «глобальної синхронізації», що приводить до неефективного використання пропускної здатності TCP-з'єднання.
3. Забезпечення диференціації в відкиданні пакетів відповідно до їх пріоритету (WRED) або типом трафіку (SPD).
4. Зниження ймовірності повторної передачі пакетів/сегментів протоколом TCP.
5. Поліпшення якості обслуговування в мережі в цілому.

Для досягнення поставлених цілей механізм RED, грунтуючись на постійному моніторингу за завантаженістю черги, послідовній роботі алгоритмів визначення середньої довжини черги і розрахунку ймовірності відкидання пакетів, починає випадковим чином відкидати пакети з черги, не чекаючи її повного навантаження, тобто завчасно (превентивно). Ступінь

превентивності регулюється адміністративно шляхом завдання значення мінімального порогу для середньої довжини черги ($Ѳ_{min}$).

У механізмі WRED облік пріоритету оброблюваних пакетів (табл. 1.6) здійснюється шляхом диференційованої настройки мінімального і максимального порогу ($Ѳ_{max}$) для середньої довжини черги або знаменника граничної ймовірності (δ). У механізмі SPD замість пріоритету пакета критерієм відкидання пакетів є тип трафіку (керуючий, призначений для користувача або не пройшов перевірку на коректність).

Таблиця 1.6

Значення керуючих параметрів WRED «за замовчуванням»

IP-пріоритет	Мінімальне значення черги, $Ѳ_{min}$	Максимальне значення черги, $Ѳ_{max}$	Знаменник граничної імовірності, δ	Максимальний відсоток відкинутих пакетів, 1/δ
0	20	40	10	10%
1	22	40	10	10%
2	24	40	10	10%
3	26	40	10	10%
4	28	40	10	10%
5	31	40	10	10%
6	33	40	10	10%
7	35	40	10	10%
RSVP	37	40	10	10%

У механізмі ECN передбачається явне повідомлення TCP-джерела про перевантаження шляхом встановлення спеціальних ECN-біт в поле ToS тих пакетів, які механізм WRED вирішив відкинути з черги. Це в більшості випадків дещо покращує рівень QoS, тому що зменшується число відкинутих пакетів і не витрачається час на їх повторну передачу за допомогою транспортного протоколу.

Відповідно коли пакет належить потокові, що перевищив справедливу частку ресурсів з урахуванням коефіцієнта масштабування, механізм WRED

збільшує імовірність відкидання цього пакета шляхом зменшення відповідного максимального граничного значення:

$$\Theta_{\max new} = \Theta_{\max} + \frac{\Theta_{\max old} - \Theta_{\min}}{2}. \quad (1.1)$$

Ненульова імовірність відкидання пакета розраховується на підставі мінімального $\Theta_{\min}$ і нового максимального $\Theta_{\max new}$ граничного значення. Оскільки результатом зниження максимального граничного значення є істотне збільшення кута нахилу кривої імовірності відкидання (рис. 1.14), шанси пакета бути відкинутим різко зростають.

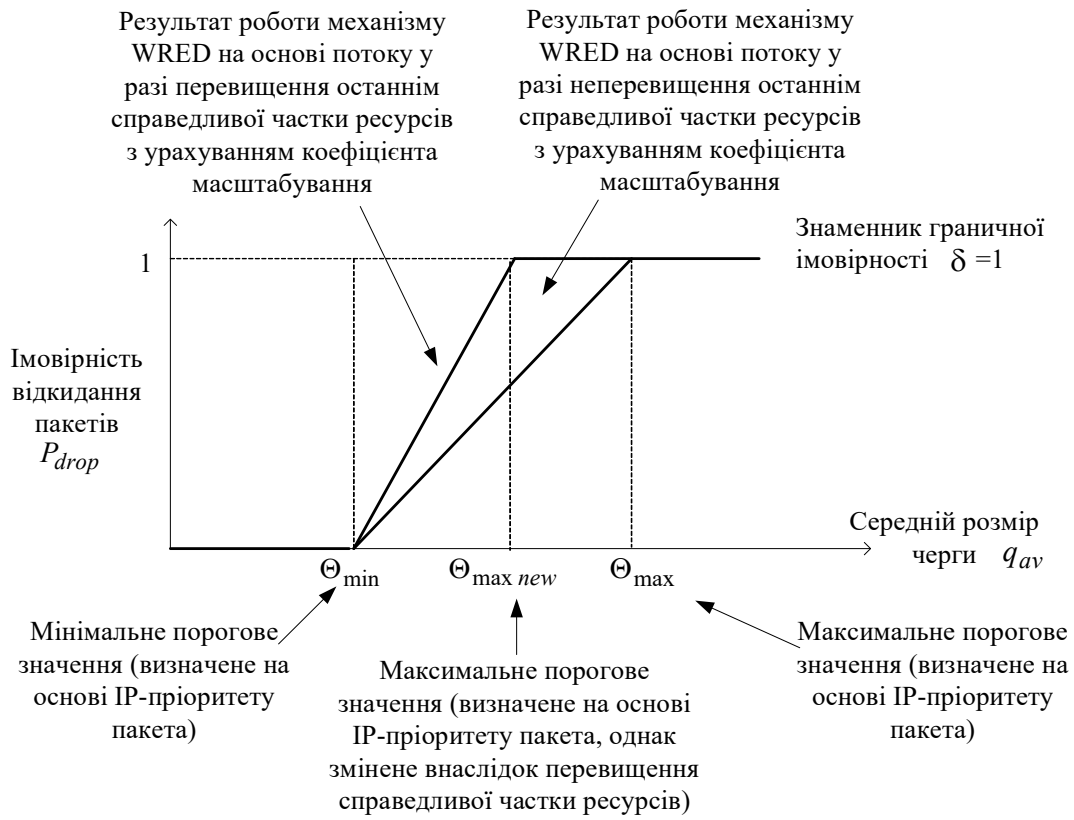


Рис.1.14. Графік імовірності відкдання пакета при викорисанні механізму WRED

Коли середній розмір черги перевищує максимльне граничне значння $q_{av} > \Theta_{\max}$, механізм WRED на основі потоку відкидає всі пакети, призначені для постановки в чергу.

На ринку AQM-рішень також присутньо безліч модифікацій механізму RED/WRED, що відрізняються, як правило, порядком розрахунку ймовірності відкидання пакетів при прийдешньому перевантаженні інтерфейсу. До подібних рішень, перш за все, відносять RED зі стабілізацією (Stabilized RED, SRED), випадкове експоненціальне маркування (Random Exponential Marking, REM), RED з двійковою лінійною функцією відкидання пакетів з різними нахилами (Double Slope RED, DSRED), справедливий RED (Fair RED, FRED), RED зі справедливою буферизацією (Fair Buffering RED, FBRED), RED з порогом на основі класів трафіку (Class based threshold RED, CBT-RED), RED з балансуванням (Balanced RED, BRED) [149-150].

Загальним недоліком сімейства механізмів RED є використання ручних налаштувань, які помітно знижують оперативність реакції на можливе перевантаження інтерфейсу і призводять до того, що результативність управління цілком залежить від кваліфікації мережевого адміністратора. Крім того, до недоліків відомих AQM-механізмів варто віднести відсутність узгодженості в роботі з іншими механізмами управління чергами [143-148], наприклад, з FIFO, PQ, CQ, FQ/WFQ, LLQ, а також з родинними засобами боротьби з перевантаженням. Причиною цього є використання евристичних схем і недосконалих математичних моделей обслуговування черг і боротьби з перевантаженням черги, що є основною причиною зниження продуктивності TCP- з'єднань, зростання середньої затримки пакетів, джитера і числа необґрунтовано відкинутих пакетів [101-104]. Даний клас рішень постійно вдосконалюється і знаходить все нові сфери застосування.

1.4 Аналіз відомих математичних моделей і методів управління ресурсами телекомунікаційної мережі для забезпечення QoS

В процесі планування та проектування мультисервісних телекомунікаційних важливим завданням є гарантування якості

обслуговування, що вимагає застосування гнучких механізмів управління інформаційними потоками.

Як буде показано в наступному розділі 2, в останній час, в процесі моделювання та розроблення інфокомунікаційних систем успішно використовувалась теорія телетрафіку з основою теорії масового обслуговування. Яка більшості є призначеною для опису процесів в телекомунікаційних мережах з комутацією каналів, таких як телефонні мережі.

В таких системах математичною моделю телетрафіку є використання пуассонівських потоків. Проблемам управління інформаційними потоками в мережах з комутацією пакетів розглядається та вирішується у багатьох наукових роботах. Можна відзначити роботи Крилова В.В., Пальма К., Хинчина А.Я., Советова Б.Я., Яковлєв С. А. та ін. В 1993 році вчені W.Leland, M.Taqqu, W.Willinger, R. Braden, S. Shenker і D.Wilson представили результати досліджень, які кардинально відрізнялися від існуючих моделей телетрафіку для телекомунікаційних мультисервісних мереж з комутацією пакетів [56-58]. Згадані дослідники вивчили трафік в інформаційній мережі корпорації Bellcore і виявили, що потоки в ній не можна апроксимувати найпростішими і, як наслідок, вони вже мають зовсім іншу структуру, ніж прийнято в класичній теорії телетрафіку [170-176].

Було встановлено, що мультисервісний трафік має володіє властивістю самоподібності. В результаті чого, розрахунок параметрів розподілу трафіку в системах пакетною комутацією, за класичними формулами дає некоректні результати. З урахуванням зростання різноманітних сервісів і обсягу інформації, що проходить в мережах зв'язку, алгоритми та методи управління ресурсами, засновані на найпростіших потоках є неефективними [120-121].

Таким чином, дослідження W. Leland, M.Taqqu, W.Willinger і D.Wilson послужили початком робіт, присвячених трафіку як самоподібному процесу. Існує велика кількість робіт зарубіжних і вітчизняних вчених, присвячених дослідженням трафіку як самоподібного процесу [107-110]. Серед зарубіжних

вчених, що активно займаються цією проблемою, можна виділити авторів, яким належать найбільш фундаментальні праці в цьому напрямку: K. Park, B. Ryu, V. Paxson, R. Mondragon та В.І. Неймана, Б.С. Цибакова, М.А. Буранова, О.І. Шелухіна, та ін. [52-53, 59-60]. Суттєва проблема полягає в тому, що самоподібні процеси важко математично формалізувати, відповідно отримання аналітичних виразів для опису станів системи з самоподібним трафіком є складним з точки зору обчислень завданням. В існуючих наукових працях по-різному підходять до вирішення цієї проблеми. Зокрема, в роботах [61-63] запропоновано для моделювання та дослідження систем із самоподібним трафіком скористатись відомими залежностями для добре досліджених систем масового обслуговування на основі наближення певних характеристик функцій розподілів самоподібної та добре формалізованих моделей трафіку[108]. Інший підхід, який висвітлюється в [64-65] та користується все більшою популярністю, полягає у моделюванні самоподібного трафіка та подальшому дослідженні функціонування системи обслуговування такого трафіка на основі розроблених моделей [112-113].

Обидва методи мають свої переваги та недоліки. Так, при використанні методу статистичного імітаційного моделювання постає питання адекватності отриманих результатів, перевірка якої є окремим достатньо громіздким завданням. На основі методу наближення постає питання, наскільки допущене наближення впливає на розкид параметрів якості обслуговування, які необхідно дослідити. Отримання таких залежностей є на сьогодні невирішеним завданням

При створенні інфраструктури організації надання мультисервісних послуг (Інтернет, інтерактивне телебачення, телефонія та ін.), одним із актуальних завдань, яке змушений вирішувати оператор зв'язку, є управління інформаційними потоками, тобто трафік, який буде проходити в розроблюваній мережі. Підтримка різних типів сервісів висуває особливі вимоги до використання певних технологій і підходів при реалізації такої інфраструктури.

Відповідно і завдання управління пропускною спроможністю каналу зв'язку є першочерговим при організації доступу до мультисервісних послуг.

Одним з основних ускладнень при організації системи управління трафіком є завдання забезпечення заданої якості обслуговування в процесі розподілу пропускної здатності каналу зв'язку. Іншими словами, для визначення тарифної політики, яка передбачає визначення відповідних швидкостей доступу до послуг зв'язку, провайдер повинен продумувати методи розподілу пропускної здатності загального каналу зв'язку. Основну складність в процесі реалізації таких методів в реальній мережі становить відсутність теоретичної бази управління каналом зв'язку для вирішення подібного роду завдань [66,141-142].

Телекомунікаційні оператори у своїй діяльності в більшості випадків користуються емпіричними методами, пов'язаними з результатами збору мережевої статистики споживання ресурсу кінцевими клієнтами. Найчастіше великі оператори залучають аналітичні компанії для розв’язання подібного роду завдань. Таким чином, завдання розробки методів управління трафіком в мережі оператора зв'язку є актуальним і нетривіальним при організації доступу до мультисервісних послуг [67].

До теперішнього часу відомо досить багато підходів до математичного опису процесів управління чергами, що відрізняються постановкою завдання, типом використовуваного математичного апарату, очікуваної точності розрахунків і рівнем складності обчислення шуканих значень. Велику роль у виборі підходу також відіграє область застосування методів - для вирішення задач аналізу можливих варіантів і стратегій управління чергами або завдань синтезу, пов'язаних з перспективою подальшої практичної реалізації в нових мережевих механізмах. Найбільш адекватним при описі процесів управління чергами є підхід, заснований на використанні апарату диференційно різницевих або інтегральних рівнянь стану інтерфейсу. При цьому під станом інтерфейсу може розумітися середня довжина черги, коефіцієнт завантаженості, середня

швидкість передачі пакетів і т.д. Одним із прикладів подібних рішень є застосування нелінійних диференціальних рівнянь для опису динаміки зміни завантаженості черг інтерфейсу, отриманих на основі різного роду апроксимацій (табл. 1.7) [68-70].

Для прикладу, використання апарату нелінійних диференціальних рівнянь для врахування динаміки процесів, що проходять на інтерфейсі, є незаперечною перевагою розглянутих підходів. Однак рішення в реальному часі систем диференційних (в т.ч. нелінійних) рівнянь не завжди можливе. Це істотно підвищує вимоги до обчислювальної потужності маршрутизатора, а значить, і його вартості. Тому подібні моделі і методи доцільно використовувати при вирішенні завдань аналізу або для отримання своєрідного еталону для порівняння з ним субоптимальних (спрощених) рішень з можливістю кількісної оцінки розрахункової похибки [71-75].

Завдання оцінки завантаженості буфера системи розподілу інформації виникає на етапі проектування мультисервісних мереж і вибору мережевих пристроїв для задовільного обслуговування абонентів, а також під час функціонування мережі з метою динамічного управління чергами. В даних роботах для її вирішення розроблена імітаційна модель [92-95, 111], яка служить для проектувальника інструментом розрахунку параметрів мережевого обладнання. Дана задача розв’язується не у реальному масштабі часу.

Іншим аспектом забезпечення якості обслуговування є управління розподілом ресурсів мережі в залежності від класів трафіку, які у ній визначені [96-100]. Для цього необхідно розв'язувати задачу динамічної пріоритезації класів трафіку та сервісно-орієнтованого планування ресурсів узгоджено. Тобто, вхідні дані для першої задачі є результатом розв'язування другої

У роботах обґрунтовується можливість застосування нейронних мереж і методів нечіткої логіки для організації управління чергами, зокрема відкидання пакетів на транзитних маршрутизаторах телекомунікаційної мережі [86]. Застосування такого підходу спрямоване на підвищення рівня обґрунтованості

рішень по відкидання пакетів за рахунок застосування нейронних мереж, що постійно навчаються, які здатні адаптуватися до зміни пропускної здатності інтерфейсу і рівня його завантаженості [76-78]. Однак питання швидкості навчання подібної системи вимагають додаткових досліджень, тому що управління чергою реалізується в мілісекундному масштабі часу з огляду на високу динаміку зміни стану інтерфейсу. Крім того запропоновані методи орієнтують на отримання допустимих, але не оптимальних рішень, що може сприяти неефективному використанню доступного мережевого (канального і буферного) ресурсу.

Компромісним варіантом з точки зору рівня адекватності математичного опису процесів управління чергами та очікуваної обчислювальної складності одержуваних рішень може служити підхід, представлений в роботах [79-83, 109]. Він заснований на оптимізаційній постановці завдання управління чергами з точки зору збалансованого використання доступного ресурсу і завантаженості черг. Крім того, ці рішення дозволяють забезпечити узгоджене рішення основних інтерфейсних завдань. Проте дане рішення є важкореалізованим на існуючих мультисервісних мережах.

Одним з недоліків даних рішень є відсутність обліку можливості агрегування потоків при формуванні черг, що є важливим моментом при їх практичній реалізації, тому що напрямок в одну чергу потоків різних класів (пріоритетів) може порушити основні принципи диференційованого обслуговування в телекомунікаційних системах [85-87]. Крім того, необхідно адаптувати отримані раніше рішення на новий клас мереж - на активні мережі [84], в рамках яких час перебування пакета в черзі може використовуватися в ході його розподіленої обробки при наданні нових інформаційно-комунікаційних сервісів.

Незважаючи на безліч робіт, присвячених дослідженням трафіку і методам його управління, до цього часу залишається велика кількість питань і невирішених завдань. Можна виділити основні з них [88-91]:

- відсутність суворої теоретичної бази, яка б прийшла на зміну класичній теорії масового обслуговування в процесі проектування сучасних систем розподілу інформації в мультисервісних мережах зв'язку;
- відсутність єдиної загальновизнаної моделі самоподібного трафіку;
- не існує достовірної і визнаної методики розрахунку параметрів і показників якості систем розподілу інформації при впливі ефекту самоподібності;
- відсутні алгоритми і механізми, що забезпечують якість обслуговування в умовах самоподібного трафіку.

1.5 Проблематика дослідження та формулювання вимог до перспективних рішень в області управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж

Дослідження параметрів потоку сучасних телекомунікаційних мультисервісних мереж) [50-54] показує, що припущення про справедливість Марківських властивостей процесів надходження і обслуговування трафіку можуть реалізовуватися на практиці лише при малих навантаженнях, в умовах низького навантаження і невисоких швидкостях передавання даних (як правило при відсутності медіатрафіку). Причини невідповідності властивостей реального трафіку гіпотетичним Марківськими властивостями досить докладно описані в роботах багатьох авторів [55], де показано, що трафік сучасних мереж має фрактальні властивості, зумовленими в першу чергу кореляційними зв'язками параметрів трафіку і «важкими» хвостами розподілів , що описують статистику часових параметрів заявок на обслуговування на кожному рівні мережі. Звідси випливає, що актуальними завданнями для дослідження і моделювання роботи мультисервісних мереж зв'язку є:

- моніторинг роботи мережі на інфраструктурному, проміжному і базовому рівні моделі,

- аналіз трафіку на кожному рівні, що враховує фрактальний характер трафіку,
- синтез методів розрахунку ймовірнісно-часових параметрів вузлів при обробці фрактального трафіку у мережевих пристроях з метою побудови адекватного прогнозу значень імовірнісно-часових параметрів для вироблення управляючих впливів на режим функціонування мережі в реальному масштабі часу.

Для оцінки якості функціонування мультисервісної мережі необхідно оперуватися набором критеріїв висунутих для забезпечення ефективного використання мережевих ресурсів, що дасть змогу забезпечити низькі затримки обслуговування, високі пропускні здатності, захищеності даних в процесі передавання інформації. Традиційний підхід побудови інфокомунікаційних систем, пов'язаний із чіткою регламентацією на всіх рівнях мережевої взаємодії, для гарантування високої якості обслуговування необхідно планувати мережу із запасом ресурсів [116]. Оскільки такий підхід викликаний властивістю самоподібності мультисерісного трафіку, що характеризується суттєвими локальними флуктуаціями пропускної здатності (пачковим трафіком) та “тяжкими хвостами”. Тому в процесі організації та плануванні міжмережевої взаємодії крім середнього значення пропускної здатності необхідно враховувати її пікові значення. В результаті в мережі потрібно передбачити значні запаси за критерієм пропускної здатності, як наслідок таке рішення призводить до негнучкого використання мережевих ресурсів мультисервісної інфраструктури. Вирішити зазначений недолік можна за допомогою так званого інтелектуального управління телекомунікаційними мережами, який включає в себе звичайні механізми управління ресурсами, так і механізми зміни параметрів протоколів взаємодії мережі, конфігурації мережі, а також адаптації до вимог користувачів [208]. Під ними розуміється набір спеціальних засобів управління режимами і інтелектуальним вибором відповідного засобу в конкретному випадку з урахуванням внутрішнього стану

мережі, впливу факторів, що обурюють і необхідності перерозподілу мережевих ресурсів між різними користувачами і інформаційними додатками.

Перерозподіл мережевих ресурсів, зокрема, пропускної здатності віртуальних каналів досягається за рахунок статистичного мультиплексування з поділом пропускної здатності між різними мережевими послугами [72]. Методи управління перерозподілом пропускної здатності забезпечують збалансування інформаційних потоків по цих каналах з урахуванням поточного завантаження і доступної пропускної здатності фізичного каналу зв'язку в умовах досягнення заданих значень характеристик, зазвичай формуються у вигляді імовірнісних показників якості. Через статистичну природу мережевого трафіку необхідні характеристики продуктивності в кожному з віртуальних з'єднань або каналів не можуть бути забезпечені за рахунок гарантованого виділення мінімальної пропускної здатності і необхідного коригування цього значення на основі оперативної інформації про стан мережі. Одним з можливих підходів щодо вирішення цієї проблеми є управління статистичними розподілом в наступній послідовності: вибору цільових функцій, що характеризують ймовірність втрат даних через невідповідність виділеної пропускної здатності і поточного значення трафіку; контролю за числом дозволених віртуальних з'єднань для кожного класу сервісу; оптимізації (оптимального перерозподілу пропускної спроможності між чергами в мережевих вузлах) на основі обраного імовірнісного показника якості. Реалізація зазначеного імовірнісного підходу наштовхується на серйозні труднощі методологічного та обчислювального характеру. Тому необхідні подальші дослідження щодо вдосконалення методів оптимізації рішення даного завдання на основі оперативної оцінки стану окремих мережних пристроїв і мережі в цілому, а також з урахуванням властивостей інформаційних потоків. До числа перспективних інформаційних технологій слід віднести новий підхід по управлінню інформаційними ресурсами за допомогою так званих програмних модулів (інтелектуальних

агентів), що забезпечують управління мережними ресурсами з урахуванням вимог користувачів.

Як правило, управління інформаційними потоками в мультисервісній мережі підпорядковується наступній логічній послідовності:

- користувач генерує навантаження, яке буде передавати дані в мережу протягом деякого часу. Серед параметрів повинні бути специфіковані «пікова швидкість передачі», «середня швидкість передачі», максимальна допустима затримка і т.п .;
- якщо мережа має достатню кількість ресурсів для забезпечення запитаних параметрів, то цей потік починає передавати дані в мережу, інакше запит відкидається;
- маршрутизатор проводить класифікацію пакетів з метою визначення приналежності потокам і класами обслуговування, в результаті чого стає можливим моніторинг навантаження кожного потоку і визначення відповідності поточних значень параметрів заявленим вимогам;
- мережа проводить моніторинг навантаження, що надходить від цього потоку, і якщо значення її параметрів перевищують задані в початковий момент, то застосовуються певні механізми щодо обмеження навантаження, звані функціями «політики управління навантаженням» (policing), описані детально нижче.

Однією з найважливіших функцій мереж з комутацією пакетів є статистичне мультиплексування, що полягає в тому, що дані декількох потоків «змінної швидкості» (Variable Bit Rate, далі - VBR) можуть передавати дані через один спільний канал, розмір смуги пропускання якого менше, ніж сума пікових швидкостей всіх потоків. Як приклади трафіку VBR- потоків можна привести передачу відео, кодованого, наприклад, за допомогою кодека MPEG, де розмір кадрів і, відповідно, розмір пакетів залежить від переданого типу кадру. Очевидно, що пакети агрегованих потоків спільно використовують не тільки смугу пропускання каналу, а й ресурси мережевих пристроїв (буферний

ресурс, частота центрального процесора і т.д). Агреговані потоки конкурують між собою за мережеві ресурси, і чим більше конкурентів, тим менше ймовірність, що деякому потоку дістануться ресурси, що задовольняють запитувані їм параметри якості обслуговування. Тому в перспективних телекомунікаційних мережах необхідно реалізувати певні механізми, що дають змогу регулювати кількість конкуруючих потоків в залежності від необхідних ними параметрів якості обслуговування і доступних мережевих ресурсів [1, 4, 6, 8, 10, 23, 24, 25].

Безліч робіт присвячені вирішенню різних завдань мережевого управління, а саме по агрегації трафіку, оптимізації мережевих потоків, досягнення максимальної завантаженості мережі. Проте жодна із них не враховує вимоги до транспортування інформаційних потоків, що пред'являються з боку динамічно змінних бізнес-процесів корпоративної мережі. Вирішення всього комплексу завдань адаптивного автоматичного керування потоками при зміні значущості бізнес-процесів складно реалізувати на основі управління за допомогою існуючих методів та мережевих технологій, оскільки зміна критеріїв оптимальності керуючих рішень вимагає постійного експертного та адміністративного втручання. Крім того, основним недоліком таких систем є їх схильність до нижніх рівнів моделі OSI, не пов'язаних безпосередньо з підтримкою бізнес-процесів. Отримання необхідної якості обслуговування за рахунок централізованого управління досягається для кожного з визначених потоків, але при цьому фонові потоки без урахування переданої в них інформації можуть вимагати такої ж якості обслуговування, що і високопріоритетні. Це не дозволяє будувати системи управління мережами, що оптимізують завантаженість каналів зв'язку з урахуванням відомих пріоритетів інформаційних потоків і вимог до якості передачі, висунутих з боку бізнес-процесів. Важливо відзначити, що основним недоліком всіх описаних засобів управління чергами та боротьби з перевантаженнями є реалізація статичної ручної стратегії розподілу канальних ресурсів, процес управління

яких не завжди адекватний профілю вхідного трафіку, оскільки не враховує властивостей потоку. Крім того, в процесі управління не координуються рішення, отримані на окремих мережевих вузлах. Перспективні методи управління інформаційними потоками даних в сучасних мережах використовуються в рамках передових концепцій мережевого управління, таких як Traffic Engineering (TE), Active Network (AW), Network Engineering (NE). Які частково дають змогу усунути обмеження існуючих протокольних рішень щодо управління мережевими ресурсами. При використанні активних мереж основний акцент робиться на застосуванні мережевих методів управління в поєднанні з методами математичного і динамічного програмування, в NE для потоків з великим ступенем агрегації застосовують апарат диференціальних інтегральних рівнянь. Вказані методи дають змогу забезпечити раціональне використання ресурсів телекомунікаційної мережі, підвищити її загальну продуктивність, проте жоден із них не враховує ймовірнісно-часові характеристики агрегованих та окремо взятих потоків даних, що висуває потребу у використанні більш інформативних моделей мережі. Базуючись на результатах аналізу можна зробити висновок про необхідність розробки нових моделей і методів адаптивного управління потоками даних та мережевими ресурсами, спрямованих на забезпечення ефективної роботи мультисервісної мережі.

Як показав проведений аналіз, для підвищення рівня якості обслуговування та ефективного розподілу доступного мережевого ресурсу до перспективних моделей управління ресурсами висувається ряд важливих вимог, до основних з яких варто віднести наступні (рис. 2.9):

- урахування та вивчення потокової структури сучасного мережевого трафіку, у зв’язку із зростанням мультимедійних даних;
- оптимізаційна постановка і розв’язання завдання управління чергами, пов'язана з необхідністю збалансованого використання доступного мережного (буферного і канального) ресурсу;

- підтримка диференціації обслуговування пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційної мережі відповідно до їх QoS-вимог;
- реалізація динамічних стратегій управління чергами;
- забезпечення справедливості обслуговування пакетів одного і того ж потоку;
- підтримка розподілених рішень з управління чергами;
- простота алгоритмічно-програмної та апаратної реалізації;
- віртуалізація мережевих пристроїв;
- виявлення аномалій мережевого трафіку;
- забезпечення узгодженого вирішення наступних взаємопов'язаних інтерфейсних завдань:

– класифікація та маркування пакетів;

– динамічне створення та конфігурація черг на інтерфейсі мережевих пристроїв;

– агрегування потоків і розподіл пакетів по чергах інтерфейсу з урахуванням параметрів переданих потоків, вимог до якості обслуговування, характеристик створюваних черг і інтерфейсу в цілому;

– визначення черговості передавання пакетів з черг в канал зв'язку;

– розподіл пропускної здатності інтерфейсу між окремими чергами;

– превентивне (завчасне) обмеження довжини черги.

Таким чином, актуалізується проблематика адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі приймаючи до уваги цільове призначення бізнес-процесів, флуктуаційний характер та пікові значення інтенсивностей потокового навантаження різних типів, що в процесі динамічного програмного конфігурування ресурсів забезпечило б виконання вимог до продуктивності мережі, оперативності доставки даних і якості обслуговування користувачів.

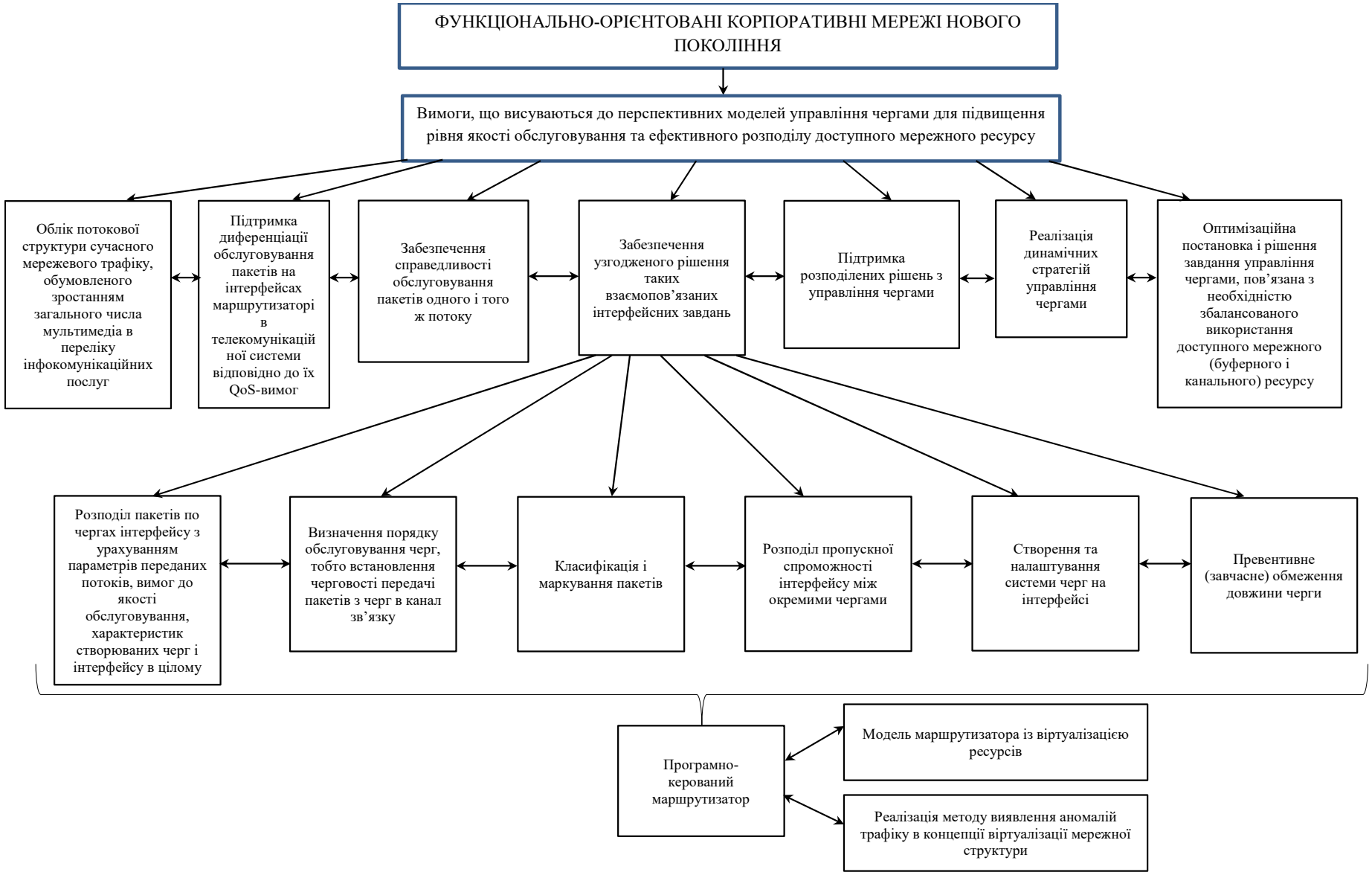


Рис.1.15. Структурна схема проведення дисертаційного дослідження на ї вирішення сформульованої проблеми

Висновки до 1-го розділу

1. Проведено аналіз сучасних методів забезпечення якості обслуговування в телекомунікаційних мультисервісних мережах. Розглянуто параметри QoS, які є основними в процесі надання послуг користувачами мережі та сучасних технологій забезпечення гарантованої якості обслуговування в процесі передавання інформації.

2. Проведено аналіз досліджень мультисервісного трафіку в мультисервісній системі з метою аналізу показників його самоподібності для конкретних типів трафіку.

3. Розглянуто значну кількість механізмів, методів і протоколів, зокрема механізми класифікації та маркування вхідного трафіку, механізми формування та управління інтенсивністю трафіку, механізми резервування ресурсів, механізми запобігання перевантажень і управління трафіком в разі їх виникнення та багато інших. Щоб максимально ефективно використовувати інструментарій QoS необхідно добре розуміти основні концепції та знати можливості відповідних технологій. Успішна конфігурація мережевих пристроїв та впровадження механізмів QoS, дозволяє максимально оптимізувати продуктивність мереж і забезпечити стабільне функціонування нового покоління мультимедійних і голосових додатків. Тому важливим стає завдання вивчення основ технології забезпечення QoS.

4. Розглянуто основні недоліки та переваги при застосуванні існуючих алгоритмів обслуговування черг в маршрутизаторах. Сформульовано основні невирішенні завдання в галузі забезпечення якості обслуговування в мультисервісних телекомунікаційних мережах.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ, МЕТОДИ І АЛГОРИТМИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ГНУЧКОСТІ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ

2.1 Формалізація завдання адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі

Встановлено, що при проектуванні інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж необхідно зосередитись на виборі кількості параметрів якості обслуговування, які необхідно враховувати в процесі синтезу інформаційно-комунікаційних мереж. Кількість параметрів, які характеризують якість функціонування реальної системи, може бути дуже різноманітною та великою. Врахування більшості кількості якості в процесі оптимізації мультисервісних телекомунікаційних мереж призводить до отримання адекватних результатів з точки зору функціонування системи. Відповідно згідно даного твердження на практиці вибирається оптимальна кількість показників якості функціонування, які необхідно враховувати для синтезу телекомунікаційних мереж. Введення додаткових показників якості призводить не до покращення, а до погіршення результатів оптимізації телекомунікаційних мультисервісних мереж нового покоління. Проте більшість сучасних мереж враховують стандартні параметри якості обслуговування, для проведення оптимізації кожен з яких має свої допустимі значення згідно встановлених рекомендацій електрозв’язку. Зміна парадигми в концепції послуг, яка була пов'язана із загальною зміною концепції мереж NGN, виражається в першу чергу в тому, що ролі оператора і користувача значно змінилися. Тепер користувач і оператор виступають як союзники в єдиному процесі інформатизації, і таку взаємодію можна вважати еволюцією сучасних методів надання послуг. Отже, розробляючи нову систему управління послугами,

раціонально використовувати системний підхід: проблему забезпечення якості потрібно вирішувати не ізольовано, а в єдності зв'язків з навколишнім середовищем - користувачем. Задоволення вимог користувача включає в себе як технічні аспекти (параметри якості функціонування мережі), так і нетехнічні (обслуговування користувачів). У процесі управління послугами необхідно відстежувати як відповідність характеристик послуг нормативним показникам, так і виробляти при необхідності корекцію нормативів.

Структура, призначення елементів, сукупність задач, умови функціонування різних підсистем дозволяють визначити основні фактори, які обумовлюють застосування і розробку інформаційних технологій, спрямованих на забезпечення ефективної роботи всієї системи [1].

- Основними факторами, які впливають на зміни часу передавання пакету даних, є [111]: інтенсивність інформаційних пакетів (λ); час комутації пакету ($t_к$), - залежить від мережевого пристрою і визначається його технічними характеристиками; пропускна здатність каналу передавання даних ($К_у$); об’єм пакетних даних ($V_р$); тривалість черги пакетів ($n_о$); коефіцієнт завантаженості каналу службовою інформацією – ($к_{зс}$).
- Факторами, характерними для застосування адаптивного управління потоками даних, є флуктуаційний характер процесів передавання інформації, наявність довготривалих залежностей статистичних характеристик інформаційних процесів, збільшення коефіцієнта відхилення пікових значень інтенсивності інформаційного потоку [10].
- Традиційні методи перерозподілу мережевих ресурсів припускають, що профіль трафіку інформаційних потоків згладжується. Проте існуючі методи управління перевантаженнями не враховують властивостей трафіку, тому процес управління не завжди адекватний профілю трафіку.

В основі композитної моделі інфраструктури лежить принцип поділу (декомпозиції) мережі на модулі (мережні пристрої та канали зв'язку). Отже, для оцінювання ефективності функціонування мультисервісної телекомунікаційної мережі за основу беруться такі параметри: середня тривалість передавання інформаційних повідомлень, продуктивність та завантаженість мережі; параметри надійності, вартості та інші. Таким чином, функція для оцінювання ефективності функціонування інформаційних корпоративних мереж є багатопараметричною, саме тому для простоти її розрахунку вибираються найбільш важливі несуперечливі показники.

Нехай $P = \left\{P^{(1)},...,P^{(i)},...,P^{(I)}\right\}$ – множина таких параметрів, dim $P=I$, кожен з яких, в свою чергу, визначається сукупністю часткових параметрів:

$$P^{(i)} = \left\{P_1^{(i)},...,P_j^{(i)},...,P_{Jj}^{(i)}\right\},$$

$$dim\, P^{(i)} = J_i; i = \overline{1,I}; j = \overline{1,J_i}\,. \qquad (2.1)$$

Функція оцінювання ефективності функціонування мережевого пристрою функціонально-орієнтованої корпоративної мережі на підмножині параметрів записується у вигляді:

$$F = F(P_0), P_0 \subset P\,, \qquad (2.2)$$

де P_0 – підмножина параметрів, які є критичними при функціонуванні інформаційної мережі.

Некритичні параметри з підмножини $P_{HK}=P\backslash P_0$, характеризуються за допомогою функції оцінювання:

$$F_k = F_k(P_0; P_{HK}), k = \overline{1,K;} \qquad (2.3)$$

$$F(P_0) \to sup, \qquad (2.4)$$

при цьому оцінювання некритичних параметрів з P_{HK} визначають обмеження відповідного оптимізаційного завдання:

$$F_k(P_0; P_{HK}) \Re H_k\,, \qquad (2.5)$$

де $\Re$ - відношення, яке може бути як строгого, так і нестрогого порядку і приймати значення з множини {"≥", "≤", ">", "<"}; $k = \overline{1,K}$, H_k – гранична оцінка

для k-го некритичного параметра. В більшості випадків для корпоративних мереж критичними є часові параметри якості обслуговування, і, крім цього, потрібно враховувати вимоги щодо: надійності, вартості, захищеності, пропускної здатності, стійкості до завад і т.д. Множина P визначається наступним чином:

$$P = \left\{ P_1 , P_2 , P_3 , P_4 \right\}, \tag{2.6}$$

де P_1 – час затримки повідомлення, P_2 – час комутації, P_3 – розмір інформаційного повідомлення, P_4 – пропускна здатність каналів зв'язку.

Розглянемо процес оброблення інформаційних повідомлень у вузлах функціонально-орієнтованих корпоративних мереж. Для n-го інформаційного повідомлення ($n = \overline{1, N}$), що обробляється m-м каналом (K) мережі ($m = \overline{1, M}$) вводиться булева функція:

$$Q(n,m) = \begin{cases} 1, \text{ якщо канал m обслуговує повідомлення n;} \\ \\ 0, \text{ в протилежному випадку.} \end{cases} \tag{2.7}$$

Нехай:

$$P_1 = \{ t_{n,m}^{(7)} \}; P_2 = \{ t_{n,m}^{(k)} \}; P_3 = \{ V_n \}; P_4 = \{ C_{n,m} \}. \tag{2.8}$$

Крім цього, визначається обмеження на час доставки даних мультисервісної мережі – T_n і доступну пропускну здатність мережі – B_m.

Тоді узагальнений параметр ефективності функціонування інфраструктури відносно оперативності обміну інформацією в мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мережах можна представити як сумарний час оброблення інформаційних повідомлень на фіксованому часовому інтервалі:

$$F(P_0) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} Q(n,m) \cdot (t_{n,m}^{(7)} + t_{n,m}^{(k)} + \frac{V_n}{C_{n,m}}). \tag{2.9}$$

Окремі параметри з множини P_1, P_2 і P_4 залежать від вибору алгоритму обслуговування черг та апаратної продуктивності мережного пристрою S. Тоді

критерієм вибору найбільш ефективного мережевого пристрою є вимога мінімізації узагальненого параметра ефективності – сумарного часу оброблення інформаційних повідомлень за фіксований інтервал часу:

$$F(P_0, S) \xrightarrow[S]{} min, \tag{2.10}$$

при обмеженнях, які накладаються характеристиками мережі:

$$\sum_{n=1}^{N} Q(m,n) \cdot C_{n,m}(S) \le B_m, m = \overline{1, M}, \tag{2.11}$$

і обмеженнях, які накладають технічні характеристики відносно оперативності доставки повідомлень:

$$\sum_{m=1}^{M} Q(m,n) \cdot (t_{n,m}^{(3)}(S) + t_{n,m}^{(k)}(S) + \frac{V_n}{C_{n,m}(S)}) \le T_n, n = \overline{1, N}. \tag{2.12}$$

Таким чином, для оцінювання ступеня ефективності передавання даних в процесі обслуговування черг в мережевих пристроях корпоративної мережі наведено параметри і критерій ефективності передавання даних. Зокрема, в процесі розроблення методів адаптивного управління особливу увагу потрібно приділяти формуванню множини критичних і некритичних параметрів, які формують узагальнений критерій ефективності. Крім того, нелінійний характер змін деяких параметрів ефективності вимагає удосконалення методів та алгоритмів збалансованого використання доступного мережного (буферного і канального) ресурсу для розв’язання відповідних оптимізаційних завдань.

Проведений аналіз основних вимог, висунутих до мереж нового покоління, визначив, що існуючі інформаційні технології, на яких засновані методи управління розподілом трафіку в інформаційно-телекомунікаційних мережах, в умовах зростаючих об’ємів циркулюючої інформації, а також при динамічній зміні структури системи передачі даних нездатні забезпечити вимоги щодо оперативності обміну інформацією.

Аналіз основних факторів, які впливають на управління розподілом трафіку, показав необхідність розробки інформаційної технології, яка

орієнтована на адаптивне управління з метою підвищення оперативності передавання інформації в телекомунікаційних мережах.

Разом з тим слід відзначити, що практичне застосування запропонованих моделей потребує деяких додаткових досліджень. Зокрема, при розробці методів адаптивного управління необхідно приділити увагу формуванню множини критичних і некритичних показників, які використовуються при формулюванні узагальненого критерію ефективності. Крім того, нелінійний характер змін деяких показників ефективності потребує удосконалення математичного апарату вирішення відповідних оптимізаційних задач.

Результати роботи можуть застосовуватися при розробці методів адаптивного управління ресурсами у мережевому пристрої для спеціалізованих мультисервісних інформаційних корпоративних мереж з високими вимогами по оперативності і надійності обміну інформацією в мережах нового покоління.

2.2 Метод узгодженого розв’язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами у відповідних мережевих інтерфейсах телекомунікаційних вузлів

В телекомунікаційних мережах найбільш критичний вплив на розбірливість голосу, якість сприйняття відео-зображення відіграють затримки і втрати пакетів в чергах мережевих пристроїв . Саме тому більшість науково-технічних досліджень, пов'язаних з процесом оптимізації механізмів управління чергами шляхом удосконалення та розроблення нових математичних моделей, методів та алгоритмів є важливими і актуальними.

Для дослідження та моделювання завдань алгоритмів обслуговування черг в мережевих пристроях припустимо, що кількість пріоритетів трафіку в структурі корпоративної телекомунікаційної мережі становить M та не перевищує можливостей маркування у полях заголовків пакетів ToS, DSCP (див. рис 1.9). Також приймемо до уваги, що максимальне число черг у мережевих пристроях також відомо і становить (N). Наприклад , в алгоритмі

пріоритетного обслуговування PQ виділяється 4 черги, в алгоритмі зваженого справедливого обслуговування WFQ кількість черг не перевищує 256, а в алгоритмі CBWFQ співпадає з кількістю класів обслуговуваних потоків і дорівнює 64 .

Таким чином , позначимо через a_i (i =1,2, …M) – інтенсивність вхідного потоку i -го класу, який поступає на обслуговування мережевим пристроєм. Крім цього, нехай b_j (j =1,2, ... N) – частка пропускної здатності каналу зв'язку, яка є виділеною для j - ї черги (j =1, … N), що є типовим для алгоритму CBWFQ. Модифікація полягає у нововведених змінних b_j (j= 1, … N), які розраховуються динамічно з контролем за часом перебування в черзі пріоритетних пакетів, адаптуючись до зміни стану навантаження мережного вузла, а не адміністративно, як , наприклад , в CBWFQ .

Під час управління чергами для забезпечення умови відсутності перевантаження в момент часу *t*:

$$\sum_{j=1}^{N} b_j(t) \le \mathrm{b} \quad , \qquad (2.13)$$

де b - пропускна здатність вихідного каналу зв'язку, $b_j(t)$ – частка пропускної здатності вихідного каналу зв'язку, яка є виділеною для j - ї черги в момент часу t (j =1, … N),.

Крім того, з метою запобігання перевантаження мережевого пристрою в момент часу *t* потрібно, щоб виконувалася наступна умова :

$$\sum_{i=1}^{M} a_i(t) \le b \quad . \qquad (2.14)$$

Виконання умови (2.14) забезпечується шляхом превентивного обмеження інтенсивності вхідного трафіку, що поступає на мережевий пристрій NGN, з метою не перевищення пропускної здатності вихідного каналу зв'язку. Ця функція на практиці виконується алгоритмами довільного раннього виявлення перевантаження та обмеження довжини черги RED і WRED.

Забезпечення динамічного процесу обслуговування черг за принципом запропонованого алгоритму можна здійснити шляхом введення керуючої змінної x_i, яка відповідає за частку і -го потоку, що поступає на обслуговування в j - ю чергу. Згідно фізичного змісту x_{ij} записуються наступні умови:

$$x_{ij} \in \{ 0,1 \} \ (i=1,2,....M; \quad j=1,2,....N) \ , \tag{2.15}$$

$$\sum_{j=1}^{N} x_{ij} = 1 \ (i=1,2,...M), \tag{2.16}$$

$$\sum_{i=1}^{M} a_i(t) \cdot x_{ij} \le b_j(t) \le b \ (\ j=1,2, ...N \ ). \tag{2.17}$$

Виконання умови (2.17) забезпечує відсутність втрати пакетів при обслуговуванні мережевим пристроєм. Для уникнення перевантаженості каналу зв’язку пропонується умова (2.14), що виділяється для передавання пакетів тієї чи іншої черги мережевого пристрою в процесі управління ресурсами.

Забезпечення узгодженості у вирішенні завдання обслуговування черг та динамічного розподілу пропускної здатності вихідного каналу зв'язку вирішується у вигляді вектора заданої зміни .

$$\bar{x} = \left[\frac{x_{ij}}{b_j} - \right] \ (i=1,2,...M; \ j=1,2,...N) \ . \tag{2.18}$$

У ході виконання умов (2.17) за рахунок непередбачуваної зміни характеру трафіку в мережевому пристрої виникають черги та затримки пакетів. Для забезпечення допустимих затримок у вузлах вибирають оптимальну загальну буферну ємність.

Важливо пам’ятати, що занадто велика вибрана ємність буфера мережевого пристрою в умовах невеликої пропускної здатності призведе до значних затримок пакетів. З іншої сторони, вибрана занадто мала ємність буфера мережевого пристрою в умовах високої швидкості передавання даних призведе до втрати пакетів за рахунок його переповнення.

Таким чином, для кожної черги визначимо її поточну завантаженість і максимальну ємність, позначивши їх відповідно через n_j і n_j^{max} (j = 1 , … N). Запишемо умови уникнення перевантаження окремих черг по їх пропускній здатності (2.17) використовуючи умови уникнення перевантаження черг по їх довжині. Загальний вигляд шуканих умов виглядатиме як:

$$n_j \le n_j^{max} \ (j=1,2, ...N), \tag{2.19}$$

отже завдання розрахунку середньої довжини черги в процесі обслуговування пакетів у мережевих вузлах полягає у виборі аналітичного виразу.

Для цього необхідно знати модель, якою описується трафік, а саме його характеристики - інтенсивність, довжина пакета і т.д. і алгоритми обслуговування черги в мережевих вузлах , в якості якої на практиці, як правило, реалізується схема FIFO, PQ. Крім того, вибираючи гіпотезу щодо характеристик обслуговування трафіку, можна описати окрему чергу відомою системою масового обслуговування , в рамках якої забезпечується точність та коректність розрахунку її ймовірносно - часових характеристик, в тому числі затримки пакетів та розмір ємностей буферів .

Так, наприклад, при моделюванні процесу обслуговування в окремій черзі різними типами систем масового обслуговування середня довжина черги, опускаючи індекс черги, виражатиметься аналітичними залежностями, викладеними у роботі [152].

Для прикладу розглянемо систему M/M/1/n де на вхід системи надходять виклики з Пуасонівським законом розподілу при суперкомпозиції яких утворюється мультисервісний агрегований потік [153, 164].

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}. \tag{2.20}$$

Отже, для системи M/M/1/n імовірність втрат пакетів у мережевому пристрої:

$$P_{вт_i} = \frac{(1-\rho)\cdot\rho^{n_j}}{1-\rho^{n_j+1}}, \tag{2.21}$$

де ρ – коефіцієнт завантаження вузла;

n_j – кількість місць в буфері маршрутизатора;

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}, \tag{2.22}$$

де λ – інтенсивність поступлення пакетів потоку в маршрутизатор ;

μ – інтенсивність обслуговування пакетів в маршрутизаторі;

Середня кількість пакетів в буфері маршрутизатора :

$$\overline{N} = \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{(1+n_j)\cdot\rho^{n+1}}{1-\rho^{n+1}}, \tag{2.23}$$

Відповідно середній час перебування пакета $\overline{T}$ в маршрутизаторі можна визначити на основі формули Літтла:

$$\overline{T} = \frac{\overline{N}}{\lambda}, \tag{2.24}$$

$$\overline{T} = \left(\frac{\rho}{1-\rho} - \frac{(1+n_j)\cdot\rho^{n_j+1}}{1-\rho^{n_j+1}}\right)\cdot\frac{1}{\rho\mu}. \tag{2.25}$$

Оскільки трафік мультисервісних телекомунікаційних мереж характеризується наявністю довгострокових залежностей інтенсивності навантаження, то для їх опису адекватним вважаються самоподібні (self-similarity) процеси, де вхідний трафік можна описати фрактальним броунівським рухом (модель fBM). Визначення прогнозованого розміру буфера здійснюється на основі формули Норроса для середньої кількості пакетів, які містяться у буфері з безскінченним розміром .

$$N = \rho\cdot\frac{(\rho)^{\frac{H-0.5}{1-H}}}{(1-\rho)^{\frac{H}{1-H}}}, \tag{2.26}$$

де H – параметр Херста потоку, що надходить маршрутизатор.

Обсяг пам’яті буфера маршрутизатора, що потребується, визначається за формулою:

$$\mathrm{Q} = \mathrm{N} \cdot \mathrm{L}_{cp.}, \tag{2.27}$$

де $L_{cp.i}$ - середня довжина пакету.

Де

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{M} a_j x_{ij}}{b_j} \quad , \tag{2.28}$$

При цьому кожному типу трафіку, а значить і кожній черзі, може відповідати своя модель обслуговування, яка не обов'язково відповідає переліку існуючих варіантів СМО. З точки зору забезпечення гарантій QoS за параметром середньої затримки в ряді випадків зручніша нерівність (18) замінити на умову

$$\tau_j \leq \tau_j^{max} \ (\ \mathrm{j} = 1,2, ...\mathrm{N} \ ), \tag{2.29}$$

де середня затримка обслуговування в тій чи іншій черзі може бути розрахована за відомою середньою довжиною черги на основі формули Літтла для будь-якої СМО. Відповідно $\tau_i = \overline{T}$; це дало змогу в термінах запропонованої вище моделі отримати умову у більш детальному вигляді.

$$\frac{n_j + \rho}{\sum_{i=1}^{M} a_j x_{ij}} \leq \tau_j^{\max} \ (\ \mathrm{j}=1,2, ...\mathrm{N} \ ), \tag{2.30}$$

Використання системи умов (2.30) є актуальним у випадку, коли чисельні значення необхідної середньої затримки (як параметра QoS) нормовані по окремих ділянках мережі. Тоді в процесі управління чергами важливо не перевищити ці задані для окремо взятої пари вузлів каналу значення середньої затримки пакетів, що особливо характерно при вирішенні завдань щодо

забезпечення гарантованого QoS в рамках архітектурної моделі NGN нового покоління.

2.3 Модель оброблення інформаційних потоків за удосконаленим алгоритмом управління черг

Для системи, що пропонується в дисертаційній роботі, розглядається набір сервісів із трьох пріоритетів, а саме - відео, голос та Інтернет дані. Припустимо, що найвищий пріоритет в пропонованій системі обслуговування потоків містять пакети голосового трафіку пріоритет *pVoice*=3, відео сервіс реального часу *pVideo*=2, непріоритетним тріфком є пакети сервісу Інтернет даних - *pData*=1. Розглянемо детально процес обслуговування черг за удосконаленим алгоритмом управління [23, 36, 124]. Для цього пакети трьох пріоритетів розподіляються по своїх чергах, а саме голосу, відео та даних. За основу модифікацій береться механізм кругового обслуговування, якому, згідно класу трафіку, конкретній черзі надається вага для обслуговування трафіку шляхом виділення частки загальної пропускної здатності каналу. Для забезпечення гарантованої якості обслуговування вводиться лічильник тривалості перебування пакетів в черзі мережевого пристрою. Як приклад фіксується інтервал часу Δt_k, протягом якого пакети голосового трафіку (Δt_{voice}), чекають в черзі, призначеній для голосових потоків. В умовах, коли визначений час Δt_{voice} для пакетів наближається до закінчення, вони терміново ставляться на першочергове обслуговування в менш пріоритетну чергу для проведення негайного обслуговування. Аналогічно процедура проводиться для інших пріоритетів послуг. Можливий також варіант, коли черги вищого пріоритету простоюють, а нижчого пріоритету перебувають у насиченому режимі, таким чином відбудеться перенаправлення пакетів із черги нижчого пріоритету в чергу вищого пріоритету.

Удосконалений алгоритм обслуговування послуг для моделі з m пріоритетами виглядатиме аналогічно. Створюється m пріоритетних черг для агрегованого трафіку. На першому етапі передавання інформації для кожного пакету сервісу визначається тривалість його перебування в буфері. Якщо тривалість перебування в буфері є більшим ніж Δt_m в такому випадку пакети маркуються як прострочені та поступають в першу позицію найкоротшої менш пріоритетної черги. Такі кроки застосовуються для всіх пакетів, у яких прострочений час перебування у черзі. Даний алгоритм дає змогу ефективно обробляти пріоритетні пакети послуг, при цьому не створюючи суттєвого погіршення якості для передавання непріоритетних послуг

Оскільки для більшості із мережевих пристроїв мережі описуються системою масового обслуговування з втратами, то важливо знати розмір буфера. Для ефективного функціонування системи затримка пакетів у мережевому пристрої (маршрутизатора, комутатора) не повинна перевищувати допустиме значення згідно рекомендацій IY-UT для збереження актуальності інформації. Особливо це стосується потоків реального часу голосу та відео.

Розміри буферів вибираються такими, щоб забезпечувалась умова тривалості чекання пакету , а саме - пакет який став останній в чергу, повинен бути не більш $\Delta t_{m\ \max}$, (тривалості максимальної затримки потоку р-ї пріоритетної групи), для визначення кількості пакетів в буфері потрібно дотримуватись значення границі:

$$\mathrm{N_p(m)} = \lim_{t_{N_p(m)} \to \Delta t_{m\max}} \mathrm{V}_{process_m} \cdot t_{N_p(m)} = \mathrm{V}_{process_m} \cdot \Delta t_{m\max} \tag{2.31}$$

де $\mathrm{N_p(m)}$ -кількість місць в буфері *р-ї* пріоритетної групи від загального буфера в мережевому пристрою $t_{N_p(m)}$ - тривалість оброблення обслуговуючим пристроєм всіх $\mathrm{N_p(m)}$ пакетів з буфера *р-ї* пріоритетної групи, $\mathrm{V}_{process_m}$ - швидкість оброблення пакетів *р-ї* пріоритетної групи. Розглянемо приклад, для пакетів відео потоку

$$N_p(video) = \lim_{t_{N_p(video)} \to \Delta t_{video\max}} V_{process_{video}} \cdot t_{N_p(video)} = V_{process_{video}} \cdot \Delta t_{video\max} \quad (2.32)$$

де $N_p(video)$ -кількість місць у буфері відео потоку.

Після встановлення розміру буфера є потреба пояснити поведінку системи в загальному вигляді. Пакети ставляться у черги різної пріоритетності. Для пріоритетних пакетів вводяться інтервали часу Δt_m та $\Delta t_{m\ max}$, на основі яких формується необхідні довжини черги. Відомо, що $\Delta t_m < \Delta t_{m\ max}$. Пакети, що перебувають в буфері довше Δt_m маркуються простроченими (отримають мітку lim). Розрахувати місця у буфері для пакетів, які будуть простроченими можна за формулою:

$$N_p(m) = V_{process_m} \cdot \Delta t_m \quad . \quad (2.33)$$

Мається на увазі, що пакети, потрапивши на місця черг в інтервалі $[N_p^{lim}(m), N_p^{lim}(m)]$, матимуть мітку lim. Група черг низької пріоритетності складається з черги Інтернет-трафіку, тобто з черг непріоритетних пакетів або низькопріоритетних пакетів. Якщо Інтернет трафік класифікований деяким чином, і пакети різних класів Інтернет трафіку мають різні пріоритети, тоді всі або деякі з них можуть потрапити до групи черг низької пріоритетності. В рамках даної роботи робиться припущення, що події пов’язані з потраплянням пакетів до однієї з черг групи низької пріоритетності вважаються рівноймовірними.

Окремим аспектом обслуговування є врахування моделі поведінки черг системи обробки інформації (обслуговуючого вузла). Стан черги визначається розміром буфера, завантаженістю системи та значеннями порогів відкидання пакетів для боротьби з перевантаженнями.

Довжина черги в критичному випадку не може перевищувати загального розміру буфера при низьких коефіцієнтах використання попереднього сегменту мережі.

$$\sum_{i=3} N_{черги_i} \le N_{буф},\ \rho_{prev} < \rho_1, \quad (2.34)$$

де $N_{черги_i}$ – довжина черги пакетів *i*-го пріоритету; $N_{буф}$ –загальний обсяг буферної пам'яті мультисервісного вузла; ρ_1 – рівень завантаження вузла, відповідає низьким показниками <0,4; ρ_{prev} – рівень завантаження попереднього вузла у на шляху передавання з кінця в кінець.

Для боротьби з перевантаженнями за середнього та високого коефіцієнтів використання попередніх сегментів функціонально-орієнтованої мережі довжина черг різної пріоритетності не повинна перевищувати відповідно другого та першого порогів відкидання з дотриманням імовірності відкидання пакетів не вище заданого для кожного порога рівня. Для цього пропонується в коді DSCP динамічно встановлювати різні комбінації шляхом заміни 4-го, 5-го, 6-го бітів з різними порогами відкидання пакетів.

$$\begin{aligned}
&N_{черги_{voice}} \le N_{\lim_{1voice}},\ \rho_1 < \rho_{prev} < \rho_2,\ \mathrm{p}_{loss} \le p_{\lim_1} \\
&N_{черги_{voice}} \le N_{\lim_{2voice}},\ \rho_{prev} > \rho_2,\ \mathrm{p}_{loss} \le p_{\lim_2} \\
&N_{\lim 2_{voice}} < N_{\lim_{1_{voice}}} < N_{буф_{voice}} \\
&N_{черги_{video}} \le N_{\lim_{1_{video}}},\ \rho_1 < \rho_{prev} < \rho_2,\ \mathrm{p}_{loss} \le p_{\lim_1}, \\
&N_{черги_{video}} \le N_{\lim_{2_{video}}},\ \rho_{prev} > \rho_2,\ \mathrm{p}_{loss} \le p_{\lim_2} \\
&N_{\lim 2_{video}} < N_{\lim_{1_{video}}} < N_{буф_{video}} \\
&N_{черги_{data}} \le N_{\lim_{1data}},\ \rho_1 < \rho_{prev} < \rho_2,\ \mathrm{p}_{loss} \le p_{\lim_1} \\
&N_{черги_{data}} \le N_{\lim_{2data}},\ \rho_{prev} > \rho_2,\ \mathrm{p}_{loss} \le p_{\lim_2} \\
&N_{\lim 2_{data}} < N_{\lim_{1_{data}}} < N_{буф_{data}}
\end{aligned} \tag{2.35}$$

де $N_{\lim_1}$, $N_{\lim 2}$ – пороги довжини черги пакетів для відповідного типу послуг (голос, відео, дані); p_{loss} – імовірність відкидання пакетів в буфері; $p_{\lim_1}$, $p_{\lim_2}$ – імовірності відкидання пакетів при обмеженні довжини черги відповідними порогами для пакетів голосу, відео і даних.

Якщо сусідні вузли мережі повідомляють про зростання коефіцієнта завантаження, то обслуговуючий пристрій даного вузла може прийняти рішення про відкидання пакетів при певному значенні повідомленого

коефіцієнта завантаження, навіть якщо не досягнуті пороги відкидання пакетів буфера даного вузла.

$$
\begin{aligned}
&N_{черги_{voice}} \le N_{\lim_2{}'_{voice}} = N_{\lim_{2voice}} - \delta_i,\ \rho_{prev} \approx 1,\ \mathrm{p}_{loss} > p_{\lim_2} \\
&N_{черги_{video}} \le N_{\lim_2{}'_{video}} = N_{\lim_{2video}} - \delta_i,\ \rho_{prev} \approx 1,\ \mathrm{p}_{loss} > p_{\lim_2} \\
&N_{черги_{data}} \le N_{\lim_2{}'_{data}} = N_{\lim_{2data}} - \delta_i,\ \rho_{prev} \approx 1,\ \mathrm{p}_{loss} > p_{\lim_2}
\end{aligned}
\tag{2.36}
$$

де δ_i – поріг зниження i-го якості сервісу при перевантаженні обслуговуючого вузла.

На рис. 2.1 показана робота запропонованого алгоритму для системи з трьома чергами: відео потоків (Video), голосових потоків (Voice) та потоків Інтернет трафіку (Data).

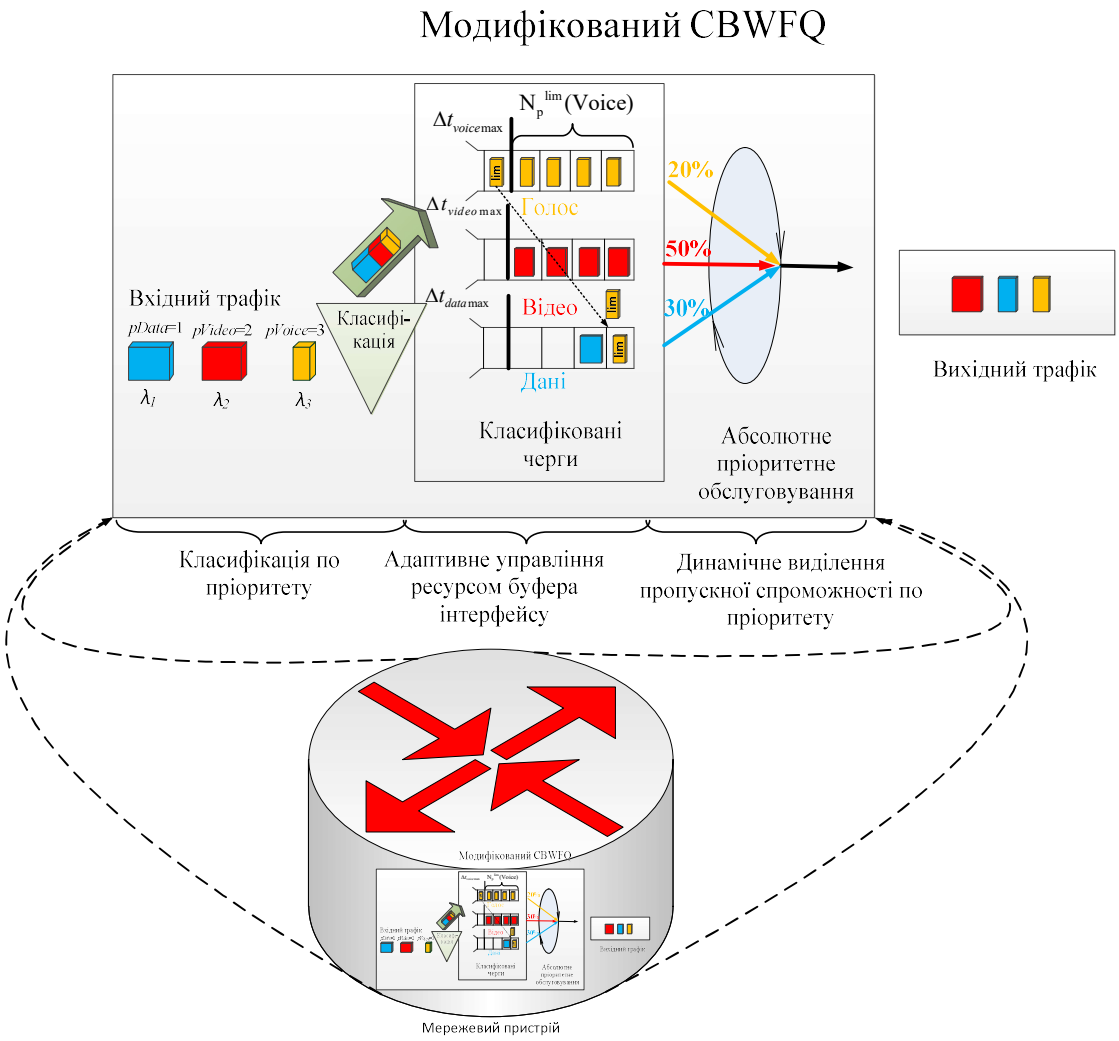


Рис.2. 1. Модель системи оброблення інформаційних потоків за удосконаленим алгоритмом управління чергами M-CBWFQ у вузлах мережі

Запропонована модель системи оброблення інформаційних потоків за удосконаленим алгоритмом управління чергами у вузлах корпоративної мережі дає змогу ефективно передавати пакети пріоритетних типів трафіку, при цьому не завдаючи суттєвої шкоди для процесів передавання непріоритетних потоків.

2.4 Структурно-функціональна модель мережевого вузла з статичною та динамічною віртуалізацією обчислювальних ресурсів

Також у роботі ***вперше пропонується структурно-функціональна модель мережевого вузла з статичною та динамічною віртуалізацією обчислювальних ресурсів***, яка дає змогу описати процес адаптивної віртуалізації маршрутизаторів за оптимізацією заданого рівня параметрів для визначених типів сервісу з набором властивих їм вимог до забезпечення якості обслуговування та підвищити загальну стійкість системи до кібератак. Віртуалізація мережевого пристрою передбачає створення двох або більше віртуальних аналогів апаратних маршрутизаторів. Кожен із них призначений для індивідуального обслуговування потоків одного типу з необхідним рівнем QoS згідно сформульованих вимог, шляхом зміни обчислювальних ресурсів CPU, RAM, Buffer capacity мережевого пристрою [209-213]. При такому проектуванні мережі підвищується стійкість мережі до кібератак, оскільки в умовах атаки на віртуалізований мережевий пристрій відбудеться перевантаження лише віртуального маршрутизатора, який обробляє замасковану під потік атаку. Розглянемо процес функціонування запропонованої моделі маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів (рис.2.2). На вхід віртуального маршрутизатора поступає агрегований потік пакетів. Сумарний потік складається з n парціальних потоків, де n=3 (голос, відео і дані), кожний з яких характеризується власними параметрами і розподілом. Після чого вхідний потік пакетів з сумарною інтенсивністю, поступає на мережевий пристрій, обробляться і розділяться аналізатором на N=3 мережевих

віртуальних пристроїв згідно пріоритету поля сервісу Type of Service (ToS), DSCP [7].

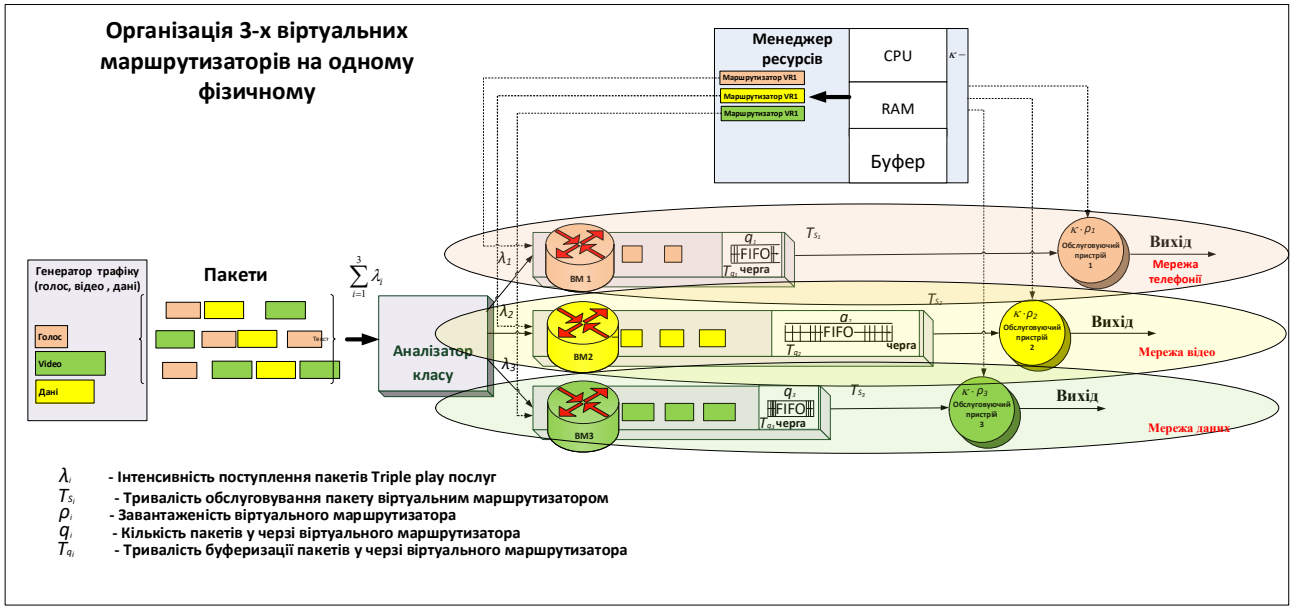


Рис.2.2.Структурно-функціональна модель маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів [7]

Перевагою даної моделі є те, що при використанні блоку менеджера управління ресурсів, який функціонально відповідає гіпервізору, при організації віртуальних машин є можливість статично та динамічно виділяти обчислювальні ресурси мережевого пристрою для віртуальних маршрутизаторів в залежності від вимог QoS потоку. Під обчислювальними ресурсами пристрою будемо розуміти апаратні ресурси, конфігурація яких суттєво впливає на можливість і продуктивність виконання обробки пакетів віртуальним вузлом [13, 38].

На рис. 2.3 показано процес адаптивного управління обчислювальними ресурсами мережевого пристрою за критерієм середнього часу затримки пакетів від завантаження віртуальних маршрутизаторів в умовах статичного та динамічного виділення ресурсів.

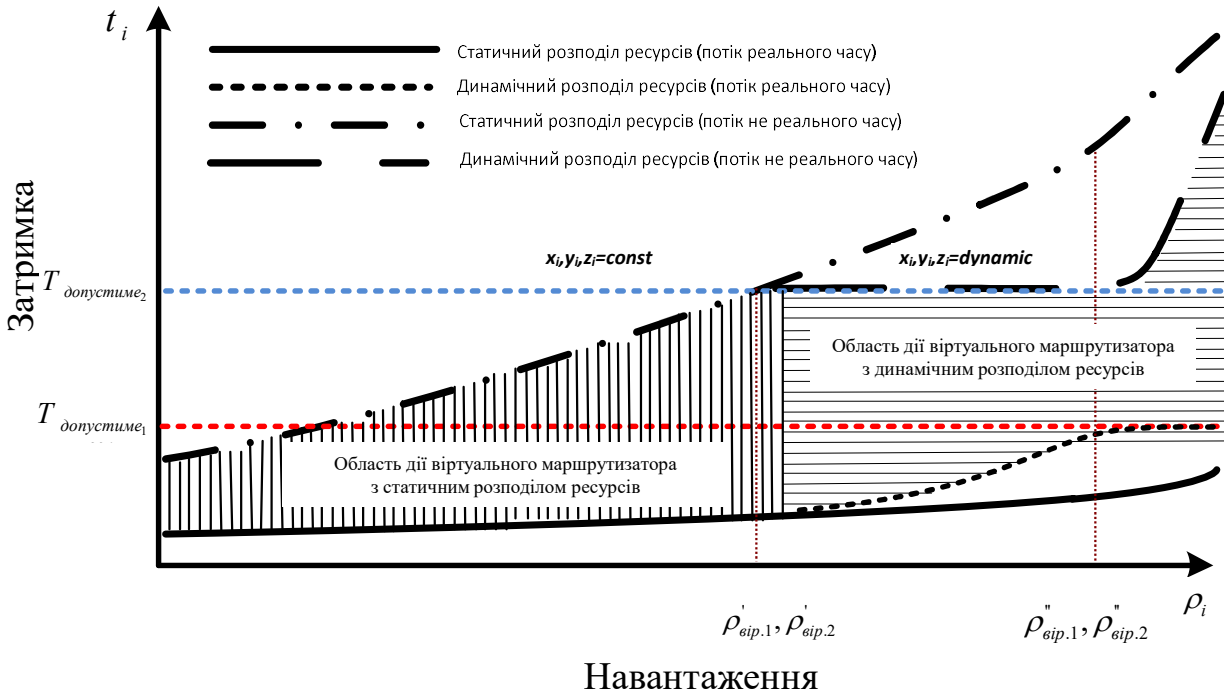


Рис.2.3 Процес адаптивної віртуалізації маршрутизаторів за оптимізацією затримки обслуговування послуг в умовах статичного та динамічного розподілу обчислювальних ресурсів

Відповідно для простоти формалізації трафік можна розділити на два класи $K = 2$. Припустимо, що затримка для пакетів першого класу (чутливого до затримок) t_1 у віртуальному маршрутизаторі не повинна перевищувати допустиме значення $T_{допустиме_1}$, відповідно умова дотримання необхідного рівня якості обслуговування за критерієм затримки $(t_1 \le T_{допустиме_1})$ Затримка пакетів для другого класу t_2 (трафіку не чутливого до затримок) не повинна перевищувати $T_{допустиме_2}$, відповідно умова гарантованого рівня QoS у віртуальному маршрутизаторі призначеного для нечутливого до затримок виглядатиме, як $(t_2 \le T_{допустиме_2})$. Тоді в умовах низького навантаження $(\rho_{i1} \le \rho'_{вір.1}), (\rho_{i2} \le \rho'_{вір.2})$ на віртуальні маршрутизатори першого та другого класу в i - й момент часу при статичному розподілі обчислювальних ресурсів, задовольняються всі вимоги щодо якості обслуговування потоків всіх пріоритетів. При високому

навантаженні $(\rho'_{вір.1} \le \rho_{i1} \le \rho''_{вір.1}), (\rho'_{вір.2} \le \rho_{i2} \le \rho''_{вір.2})$ в певні моменти часу виникають ситуації коли $(t_2 \ge T_{допустиме_2})$ та $(t_1 \ge T_{допустиме_1})$. В такому разі потрібно застосовувати динамічний розподіл ресурсів, що дозволить покращити параметри QoS. Шляхом моніторингу QoS проводиться перерахунок параметрів обчислювальних ресурсів CPU, RAM, Buffer capacity мережевого пристрою, з метою їх адаптивного розподілу між класовими віртуальними маршрутизаторами [29].

У роботі запропоновано умову адаптивного управління обчислювальними ресурсами структурно-функціонального мережевого пристрою з віртуалізацією для забезпечення необхідної якості обслуговування інформаційних послуг. Забезпечити динамічний характер процесу управління обчислювальними ресурсами в рамках запропонованої моделі віртуалізації мережевого пристрою можна шляхом введення керуючих змінних $<x_i\ y_i\ z_i>$, що відповідають за частку виділених обчислювальних ресурсів із загального пулу в процесі віртуалізації i - го віртуального маршрутизатора. Відповідно x_i для Buffer capacity, y_i – CPU, z_i – RAM, n – кількість віртуальних маршрутизаторів. Згідно фізичного змісту $<x_i\ y_i\ z_i>$ мають місце наступні умови:

$$x_i, y_i, z_i \in \{0,1\}, \tag{2.37}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = 1, \sum_{i=1}^{n} y_i = 1, \sum_{i=1}^{n} z_i = 1, \tag{2.38}$$

Сума довжин віртуальних черг, процесорної ємності та оперативної пам’яті віртуальних маршрутизаторів у критичному випадку не може перевищувати загального розміру буфера, процесора та оперативної пам’яті фізичного маршрутизатора без віртуалізації.

$$\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot q_{черги_i} \le Q_{буф}, \ \sum_{i=1}^{n} y_i \cdot CPU_i \le CPU, \ \sum_{i=1}^{n} z_i \cdot RAM_i \le RAM, \tag{2.39}$$

де $q_{черги_i}$ – довжина віртуальних черг пакетів; $Q_{буф}$ –обсяг буферної пам'яті; CPU_i – частота процесора i-го віртуального маршрутизатора; CPU –

номінальна частота процесора фізичного маршрутизатора; CPU_i – частота процесора i-го віртуального маршрутизатора; RAM – оперативна пам'ять фізичного маршрутизатора; RAM_i – оперативна пам'ять i-го віртуального маршрутизатора.

$$\begin{cases} t_{поточне_i} \le T_{допустиме_i} \\ p_{поточне_i} \le P_{допустиме_i} \\ dt_{поточне_i} \le dT_{допустиме_i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_i \cdot RAM_i \in RAM \\ y_i \cdot CPU_i \in CPU \\ z_i \cdot q_{черги_i} \in Q_{буф} \end{cases}, \quad (2.40)$$

де $t_{поточне_i}$ – поточна затримка буферизації потоку в i-ому віртуальному маршрутизаторі; $T_{допустиме_i}$ – допустима затримка потоку в i-ому віртуальному буфері маршрутизатора згідно встановлених рекомендацій; $p_{поточне_i}$ – імовірність відкидання пакетів в буфері i-го віртуального маршрутизатора; $P_{допустиме_i}$ – допустимі втрати потоку у i-ому віртуальному буфері маршрутизатора згідно встановлених рекомендацій; $dt_{поточне_i}$, – поточний джитер буферизації потоку в i-ому віртуальному маршрутизаторі; $dT_{допустиме_i}$ – допустимий джитер потоку у i-ому віртуальному буфері маршрутизатора згідно встановлених рекомендацій:

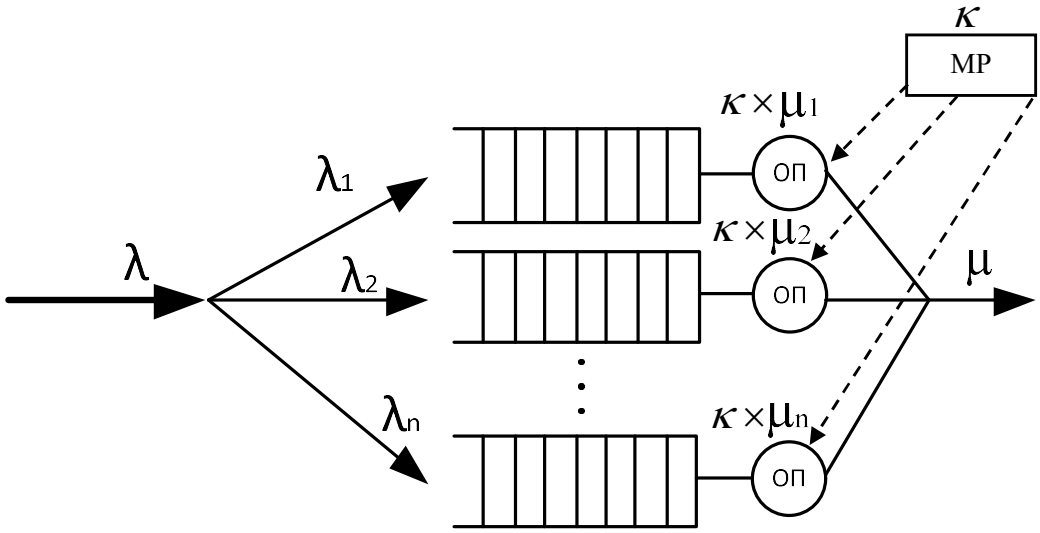
В результаті, при подальшому збільшенні навантаження $(\rho'_{вір.1} \le \rho_{i1} \le \rho''_{вір.1}), (\rho'_{вір.2} \le \rho_{i2} \le \rho''_{вір.2})$ на мережевий пристрій в умовах динамічного розподілу обчислювальних ресурсів в певні моменти часу, середня затримка пакетів сервісів нереального часу фіксується і відповідає висунутим вимогам $(t_2 = T_{допустиме_2})$, на відміну від статичного розподілу обчислювальних ресурсів мережевого пристрою, у випадку недотримання вимоги щодо якості обслуговування за критерієм затримки пакетів. При цьому збільшується затримка пакетів послуг реального часу t_1, проте $(t_1 \le T_{допустиме_1})$. В умовах високого навантаження на мережевий пристрій, в ситуаціях коли стан мережевого вузла $(\rho_{i1} \ge \rho''_{вір.1}), (\rho_{i2} \ge \rho''_{вір.2})$ проводиться аналогічно перерозподіл

ресурсів між віртуальними маршрутизаторами різного класу обслуговування з метою забезпечення норми середнього часу перебування пакетів першого класу сервісів реального часу $(t_1 \le T_{допустиме_1})$, проте в таких ситуаціях затримка пакетів для послуг нереального часу зростає, як правило не погіршуючи якість сприйняття послуг кінцевими користувачами.

2.5 Метод декомпозиції структури мережевого маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів

У роботі запропоновано ***метод декомпозиції структури мережевого маршрутизатора*** на основі теорії систем та мереж масового обслуговування, що дозволив зменшити флуктуації часових параметрів обслуговування різних видів трафіку, які виникають через коливання їх інтенсивності із забезпеченням QoS. Мережевий пристрій з віртуалізацією, згідно теорії систем масового обслуговування (СМО), можна зобразити за допомого каскадного включення буферної пам'яті, обслуговуючих пристроїв та менеджера ресурсів (гіпервізора) (рис.2.4а). Втрати продуктивності на обслуговування гіпервізора є незначними, проте необхідно врахувати вплив віртуалізації на продуктивність системи в залежності від використовуваної технологій віртуалізації в процесі проектування корпоративних мереж. Відповідно, на відміну від відомих, у роботі здійснено удосконалення, а саме - запропоновано використати коефіцієнт впливу віртуалізації на продуктивність системи - κ. Поведінка трафіку мультисервісної IP-мережі характеризується різними законами розподілу і тому при віртуалізації мережевого пристрою кожен віртуальний маршрутизатор працює із своїм класом послуг, кожен з яких описується відповідною функцією розподілу інтервалів між пакетами та функцією розподілу тривалості обслуговування. Декомпозиція моделі маршрутизатора з віртуалізацією для одного типу трафіку дозволяє отримати спрощену односерверну модель (рис. 2.4б). Для опису такої моделі можна використати

довільну систему масового обслуговування та використати відомі формули для визначення її параметрів [24].



а)

б)

Рис. 2.4. Модель мережевого пристрою з віртуалізацією (а) та модель віртуального маршрутизатора (б) [24]

Для прикладу використаємо систему M/M/1/n [152], де на вхід поступають виклики з Пуасонівським законом розподілу, при об'єднанні яких утворюється мультисервісний агрегований потік. Отже, для запропонованої системи M/M/1/n ймовірність втрат в i –му віртуальному маршрутизаторі визначається:

$$P_{вт_i} = \frac{(1-\frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}) \cdot \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}^{n_i}}{1-\frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}^{n+1}}, \qquad (2.41)$$

де λ_i – інтенсивність поступлення пакетів i –го потоку i –го віртуального маршрутизатора ; μ_i – інтенсивність обслуговування пакетів i –го потоку i –го віртуального маршрутизатора; n_i – кількість місць в буфері i –го віртуального маршрутизатора .

Середня кількість пакетів в буфері i –го віртуального маршрутизатора :

$$\overline{N}_i = \frac{\dfrac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}}{1 - \dfrac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}} - \frac{(1+n_i) \cdot \dfrac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa_i}^{n_i+1}}{1 - \dfrac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}^{n_i+1}}, \tag{2.42}$$

Відповідно середній час перебування пакета в i – му віртуальному маршрутизаторі можна визначити на основі формули Літтла:

$$\overline{T}_i = \frac{\overline{N}_i}{\lambda_i}. \tag{2.43}$$

$$\overline{T}_i = \left(\frac{\dfrac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}}{1 - \dfrac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}} - \frac{(1+n_i) \cdot \dfrac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}^{n_i+1}}{1 - \dfrac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}^{n_i+1}}\right) \cdot \frac{\kappa}{\lambda_i} \tag{2.44}$$

У роботі вперше запропоновано використати формулу Норроса для оцінки кількості пакетів i – го потоку в буфері i – го віртуального маршрутизатора, де кожен потік характеризується своїми властивостями та власним параметром Херста:

$$N_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \cdot \frac{\left(\dfrac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}\right)^{\frac{H_i - 0.5}{1 - H_i}}}{\left(1 - \dfrac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}\right)^{\frac{H_i}{1 - H_i}}}, \tag{2.45}$$

де H_i – параметр Херста i – го потоку, що надходить на i – й віртуальний маршрутизатор.

$$t_i = \sum_{k=1}^{M} \tau_{ik} + \sum_{j=1}^{N} \sum_{m=0}^{i-1} \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \right)^{\frac{H_i - 0.5}{1 - H_i}}}{\left(1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \right)^{\frac{H_i}{1 - H_i}}} \cdot \frac{l_{cep_{(i-m)j}} \cdot 8}{C_j}, \quad , \tag{2.46}$$

$$N_{вузлів} = \frac{T_{допустиме_i}.}{\sum_{m=0}^{i-1} \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \right)^{\frac{H_i - 0.5}{1 - H_i}}}{\left(1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \right)^{\frac{H_i}{1 - H_i}}} \cdot \frac{l_{cep_{(i-m)j}} \cdot 8}{C_j}, ,} \tag{2.47}$$

де:

N – загальне число мережевих пристроїв з віртуалізацією ресурсів розміщених між двома абонентами сервісу, M – загальне число каналів зв'язку між двома абонентами сервісу; τ_{ik} – величина часу затримки розповсюдження пакету послуги i-го пріоритету по k-каналу зв'язку i – го віртуального маршрутизатора; C – пропускна здатність j-го каналу; $l_{cep.(i-m)j}$ – середня довжина пакету послуги i-го пріоритету в j-му віртуальному вузлі; N – загальне число мережевих пристроїв з віртуалізацією ресурсів розміщених між двома абонентами сервісу.

2.6 Метод виявлення аномалій мережевого трафіку корпоративної функціонально-орієнтованої мережі

В процесі розвитку сучасних інформаційних мереж все гостріше постає проблема забезпечення їх надійності, узгодженості та ефективності. Одним з найсерйозніших викликів зараз стає поширення та поглиблення таких концепцій, як BYOD, та поступовий перехід від концепції Internet of Devices до нової концепції Internet of Things [192-193]. Враховуючи прагнення розробників цих концепцій до збільшення рівня їх доступності для користувача, а також зростаючі вимоги до динамічної масштабованості мереж що відрізняються за масштабами, типом чи функціональністю (WAN, MAN, LAN, PAN, BAN, etc.), наявність різноманітних типів трафіку, та динамічне середовище, що

максимально орієнтоване на надання послуг доступу до мережі, формують ряд інженерно-технічних викликів. При цьому мережа також має містити елементи корпоративного середовища і вимоги щодо забезпечення певного рівня надійності і конфіденційності даних [199]. Звичайно в реальних умовах важко дослідити такі інноваційні підходи до побудови мереж, але мережа кампусу НУ"ЛП" в деякій мірі може бути представлена як приклад квазі-корпоративної мережі. Саме тому вивчення структури і особливостей трафіку в одному з її віртуальних локальних сегментів (VLAN) може стати основою для розробки підходів і алгоритмів автоматизації узгодженості, безпеки і ефективного функціонування новітніх прототипів програмованих мультисервісних мереж з високим рівнем доступу [11].

2.6.1 Аналіз та оцінка структури трафіку сегменту локальної мережі кампусу

В досліджуваному локальному сегменті знаходяться близько 250 кінцевих пристроїв користувачів, частина з них при цьому підключена як стаціонарні ПК, частина через портативні(мобільні) пристрої (нетбуки, лептопи, і т.д.). Також присутній певний відсоток, що підключений до мережі опосередковано, за допомогою самостійно встановлених комутаторів чи маршрутизаторів та з використанням різноманітних типів технологій передачі та обміну даними. Ключовим фактором є наявність певної хаотичності у підключенні користувачів і пов'язані з цим труднощі з ефективним контролем і забезпеченням якості роботи мережі. Тому, зібравши дані щодо потоку трафіку і динаміки його структури у певні моменти часу (підвищеної активності користувачів чи відсутності активного навантаження), можна класифікувати певні патерни, які можуть слугувати індикаторами рівня "здоров’я" мережі. Це у свою чергу дозволяє розробити механізми зворотної дії для компенсації негативних тенденцій. На відміну від активних систем моніторингу, які реалізовані на даний момент, потрібні більші гнучкі засоби для контролю

потоку трафіку, які спільно з системами моніторингу можуть застосовувати точковий аналіз мережі, своєрідну реакцію на виникнення тих чи інших "подразників" та порушень штатного режиму роботи мережі. Для початку розглянемо схему збереження дампів трафіку у досліджуваному сегменті мережі (рис. 2.5).

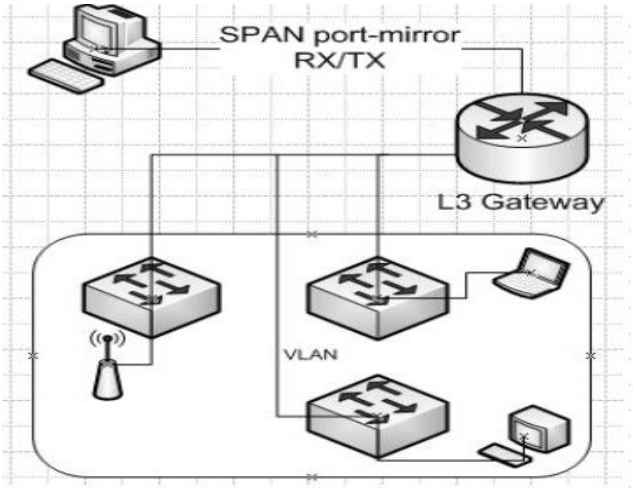


Рис. 2.5. Схема підключення SPAN порту

Забір трафіку на аналіз відбувається на магістральній лінії, що підімкнена до інтерфейсу комутатора 3 рівня (див. рис. 2.5), що слугує шлюзом по замовчуванню. Згідно оцінки активності мережевих інтерфейсів зібраної за допомогою систем моніторингу, фази високої активності мережі кампусу припадають на періоди з 10-00 до 13-00 та з 14-00 до 16.00. Для проведення дослідження трафіку були створені чотири вибіркові дампи трафіку: в фази високої мережевої активності, а також для порівняння контрольний у фазу пониженої мережевої активності (див. таб. 2.1).

(Примітка: трафік збирався на порті, налаштованому у SPAN RX/TX режимі, при записі трафік розбивався на окремі файли розміром 52 MB, загальний об'єм однієї сесії запису даних 1 GB. Нижче наведена статистика для кожної сесії запису відповідно до окремих файлів).

2.6.2 Аналіз трафіку в режимі пікової завантаженості мережі

Як можна побачити з табл. 2.1, загальний розподіл співвідношення трафіку між 4 рівнем стеку протоколів TCP/UDP, та протоколами 3 та 2 рівнів залишається доволі пропорційним.

Таблиця 2.1

Загальна статистика потоку трафіку в період більшої активності мережі (*відсотки трафіку вказані від загального об'єму трафіку, зібраного в конкретному файлі, також надана кількість пакетів)

Файл №:	1	2	3	4	5
Загальна статистика:					
TCP	75 651 (78,4 %)	65 903 (70,6 %)	71 590 (78,4 %)	65 390 (88,4 %)	64 638 (87,3 %)
UDP	18 869 (19,6 %)	26 310 (28,2 %)	18 611 (20,4 %)	8 095 (10,9 %)	7 834 (10,6 %)
L 2-3	1 981 (2 %)	1131 (1,2 %)	1125 (1,2 %)	505 (0,7 %)	1569 (2,1 %)
Файл №:	11	12	13	14	15
Загальна статистика:					
TCP	42 232 (68,2 %)	40 533 (64,4%)	46 212 (58,7%)	40 533 (64,4%)	59 500 (88,3%)
UDP	19 592 (31,4 %)	25 155 (35,1 %)	22 053 (39,7 %)	31 214 (39,7 %)	6 859 (10,2%)
L 2-3	280 (0,5 %)	310 (0,5 %)	633 (1,0 %)	1325 (1,7 %)	1054 (1,6 %)
Файл №:	6	7	8	9	10
Загальна статистика:					
TCP	62 641 (88,5 %)	57 370 (90,7 %)	61 027 (84,5 %)	44 747 (63,4 %)	32 585 (45,9 %)
UDP	7 279 (10,3 %)	5 045 (8,0 %)	10 159 (14,1 %)	21 697 (30,7%)	37 905 (53,4 %)
L 2-3	826 (1,2 %)	833 (1,3 %)	1076 (1,5 %)	4159 (5,9 %)	493 (0,7 %)
Файл №:	16	17	18	19	20
Загальна статистика:					
TCP	65 678 (83,0%)	67 198 (84,4%)	64 514 (81,7%)	63 276 (85,6%)	51 595 (64,3%)
UDP	12 088 (15,3 %)	11 781 (14,8 %)	13 542 (17,1 %)	9 776 (13,2 %)	27 793 (34,4 %)
L 2-3	1406 (1,8 %)	607 (0,8 %)	918 (1,2 %)	861 (1,2 %)	1047 (1,3 %)

Та, щоб краще зрозуміти особливості розподілу трафіку по специфічних протоколах, розглянемо окремі випадки для максимальних значень активності наведених вище видів трафіку, а також у випадку суттєвої зміни пропорції наявних протоколів в потоці. Як можна побачити з табл. 1, найбільший відсоток активності по наведеним типам мережевих протоколів був зафіксований у 5, 7, і 10 файлах дампу трафіку. Відповідно у цей момент зафіксовано пікову активність протоколів 2 і 3 рівня, TCP і UDP відповідно, а отже саме вони найбільш підходять для своєрідного "зрізу" потоків трафіку і вивчення активності конкретних протоколів що і формують дану картину.

2.6.3 Аналіз трафіку в режимі недовантаженн мережі

Наявність трафіку, що використовує протоколи IPv6, є негативним фактором, так як офіційно в мережі немає жодних сервісів чи пристроїв, що працюють за цим протоколом. Якщо розглянути протокол TCP, то найбільший відсоток з чітко розпізнаних типів протоколів займає протокол HTTP. Якщо ж розглядати трафік по протоколу UDP, то найбільше зафіксовано саме передачі даних, хоча насторожує постійна активність протоколу Toredo IPv6 over UDP. Саме вивчення подібного "зрізу" мережі у різні періоди її активності чи в період певних збоїв може допомогти сформувати певні залежності. Як ми бачимо, під час активного використання мережі найбільшу активність виявляє протокол TCP, що в принципі є логічним.

Але наявність таких факторів, як нестандартні протоколи, деформовані пакети, високий рівень повторного пересилання пакетів чи велика кількість їх "дублікатів" вказують на проблеми з ефективністю, надійністю та безпекою мережі. Для порівняння розглянемо трафік мережі під час більш пасивного її використання, та зміну процентного співвідношення наявних мережевих протоколів. Як можна побачити з табл. 2.2, у випадку з пасивним використанням мережі дещо змінилося співвідношення між мережевими протоколами [11].

Як і в попередньому випадку оберемо три файли дампу з найбільшою активністю по відповідним типам протоколів: 12 (L 2-3 24,3 %), 17 (TCP 80,4 %), та 19 (UDP 72,9 %). Як бачимо, пропорційне співвідношення протоколів стало більш різким, а також, на фоні зменшення відсотку корисного завантаження мережі, можна більш чітко прослідкувати активність наявного паразитного трафіку та мережевих аномалій.

Таблиця 2.2

Загальна статистика потоку трафіку в період меншої активності мережі

Файл №:	1	2	3	4	5
Загальна статистика:					
TCP	21 649 (31,7 %)	32 269 (47,2 %)	26 767 (44,2 %)	30 505 (45,3 %)	24 622(38,5 %)
UDP	45 915 (67,3 %)	35 616 (52,1 %)	24 393 (40,3 %)	28 956 (43,0 %)	7 970 (13,3 %)
L 2-3	692 (0,1 %)	518 (0,8 %)	9 386 (15,5 %)	7 819 (11,6 %)	15 229 (23,8 %)
Файл №:	11	12	13	14	15
Загальна статистика:					
TCP	45 843 (61,2 %)	32 291 (42,7 %)	46 628 (62,9 %)	37 178 (50,2 %)	36 873 (48,6 %)
UDP	28 026 (37,4 %)	24 961 (33,0 %)	24 687 (33,3 %)	28 243 (38,2 %)	32 900 (43,4 %)
L 2-3	1081 (1,4 %)	18 399 (24,3 %)	2 782 (3,8 %)	8 606 (11,6 %)	6 052 (8,0 %)
Файл №:	6	7	8	9	10
Загальна статистика:					
TCP	29 638 (45,9 %)	27 784 (43,6 %)	28 858 (44,2 %)	37 546 (59,7 %)	48 986 (45,9 %)
UDP	29 201 (45,2 %)	34 442 (54,0 %)	35 906 (55,0 %)	24 862 (39,6 %)	20 277 (29,0 %)
L 2-3	5 751 (8,9 %)	1551 (2,4 %)	534 (0,8 %)	452 (0,7 %)	639 (0,9 %)
Файл №:	16	17	18	19	20
Загальна статистика:					
TCP	35 580 (49,9 %)	49 300 (80,4%)	20 665 (32,0 %)	17 131 (26,5 %)	29 130 (45,7 %)
UDP	28 261 (39,6 %)	11 346 (18,5 %)	43 168 (66,9 %)	47 145 (72,9 %)	34 022 (53,4 %)
L 2-3	7 467 (10,5 %)	679 (1,1 %)	685 (1,1 %)	425 (0,7 %)	553 (0,8 %)

З наведених даних видно, що певна частина трафіку у даному локальному сегменті мережі є паразитною, а отже становить певні загрози як для мережі в цілому, так і для безпеки і комфорту роботи у ній користувачів. Тому так званий паразитний трафік ідеально підходить для маскування різноманітних атак та вірусної активності в мережі, що в свою чергу призводить до дискредитації певних користувачів мережі чи навіть певних мережевих сервісів в цілому. Якщо спробувати провести певну класифікацію мережевих аномалій, то їх можна поділити на дві основні категорії: явні і неявні.

Явні - це наявність таких активних протоколів як IPv6, Quake 3 Arena Protocol, Teredo, Sinec H1 Protocol, GSM over IP, etc. Неявні - у свою чергу, пов’язані з деформованими пакетами, надмірною повторною передачею пакетів в рамках однієї сесії, а також наявність активних сесій до загальновідомих недовірених або ж і відверто скомпрометованих IP - адрес. При більш глибокому вивчені трафіку можна побачити наявність запитів до неавторизованих DNS серверів, та іншу схожу негативну активність. Для пошуку і аналізу мережевих аномалій можна застосувати техніку аналізу, що

базується на вивчені залежностей і ентропії трафіку. Для цього дослідження використаємо методику, запропоновану в дослідженні [11]. Враховуючи вищенаведену статистику, оберемо три файли з періоду пасивного використання мережі (12,17,19) і проведемо оцінку трафіку кінцевого користувача з найбільшою кількістю активних сесій відносно зміни показника ентропії трафіку. Для початку проведемо аналіз і визначимо найбільш активного кінцевого користувача для IPv4 трафіку. Один з користувачів займає в 12 файлі 2 місце, а в 17 і 19 третє за об'ємом обміну пакетами. На основі співвідношення кількості пакетів, що відправляються до конкретного сокета та загальної кількості пакетів за досліджуваний період ми отримаємо значення ймовірності для кожної унікальної сесії протягом досліджуваного періоду:

$$p(x[i]) = \frac{U(x[i])}{Z_{sum}}, \tag{2.48}$$

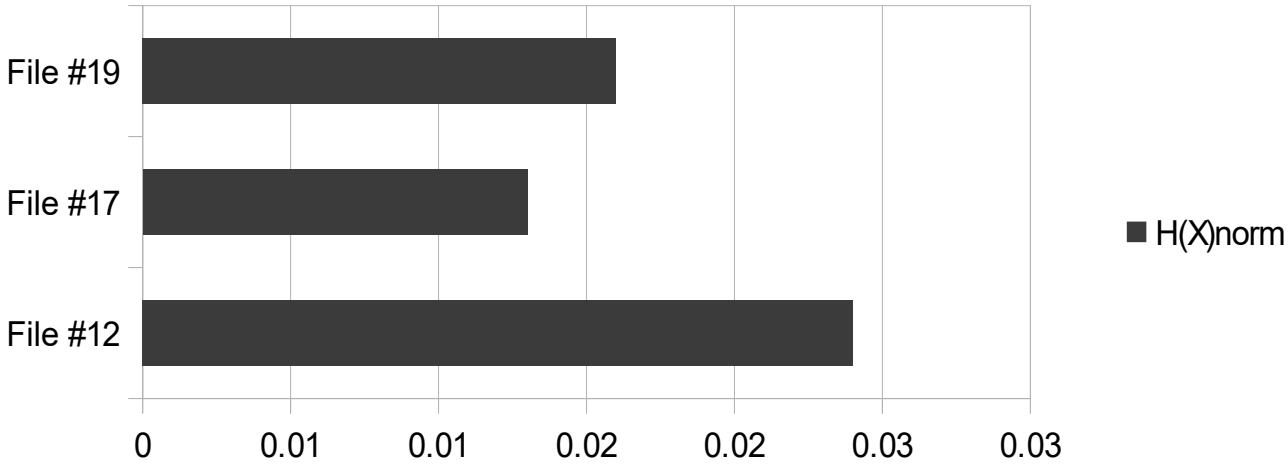
де $U(x[i])$ – кількість пакетів $x[i]$ з певною адресою призначення, Z_{sum} – загальна кількість пакетів.

Маючи значення ймовірності і обравши фактор нормалізації $\log(N[0])$, де $N[0]$ – це кількість унікальних адрес призначення, проведемо розрахунок ентропії:

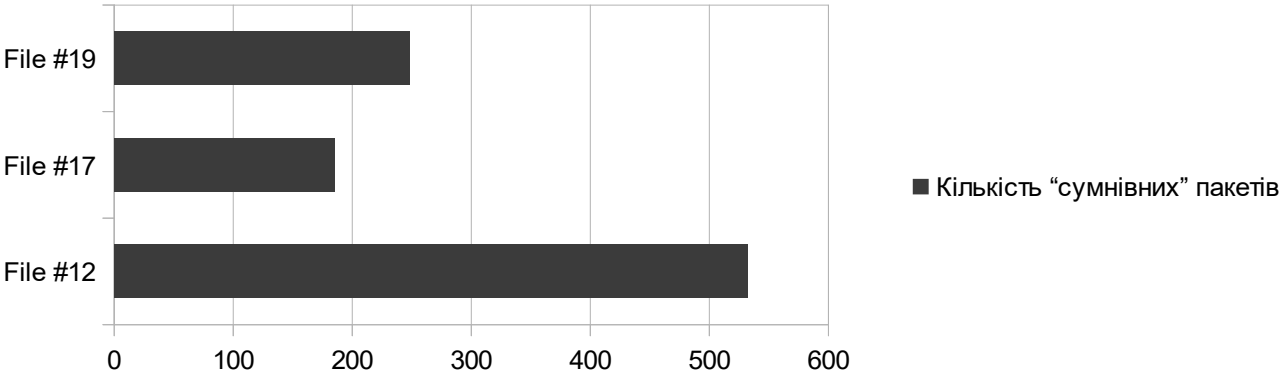
$$H(x) = -\sum_{i=1}^{n} p(x_i)\log_b p(x_i), \tag{2.49}$$

де $H(x)$ – ентропія випадкової величини x, n – це кількість унікальних адрес призначення, $p(x_i)$ – ймовірність, що x набуде значення x_i, значення b для логарифму рівне 2. Розрахунок нормалізованої ентропії (значення в рамках від 0 до 1) здійснимо за співвідношенням $H/\log(N[0])$.

Маючи значення ентропії, можемо порівняти його з кількістю "сумнівних" пакетів, наявних для даних сесій у кожному з трьох випадків.



а



б

Рис. 2.6 Порівняння показників нормалізованої ентропії (а) і кількості "сумнівних" пакетів (повторної передачі, деформованих тощо) (б)

Таблиця 2.3.

Детальний аналіз структури трафіку 12,17,19 файлів (пасивний період роботи мережі)

Файл №:	12	17	19
Загальна статистика:			
TCP	32 291 (42,7 %)	49 300 (80,4 %)	17 131 (26,5 %)
UDP	24 961 (33,0 %)	11 346 (18,5 %)	47 145 (72,9 %)
L 2-3	18 399 (24,3 %)	679 (1,1 %)	425 (0,7 %)
	=	=	=
IPv4	75 221 (99,49 %)	61 208 (99,81 %)	64 520 (99,72 %)
TCP	32 291 (42,71 %)	49 300 (80,39 %)	17 131 (26,48 %)
HTTP	3 844 (5,08 %)	5 375 (9,35 %)	5 336 (8,25 %)
SSL	6 174 (8,17 %)	3 987 (6,50 %)	732 (1,13 %)
NetBIOS	49 (0,06 %	=	=
BitTorrent	126 (0,17 %)	71 (0,12 %)	70 (0,11 %)
Data	1 395 (1,85 %)	336 (0,55 %)	1 082 (1,72 %)
Sinec H1 Protocol	=	=	1 (0,00%)
PPPTP	38 (0,05 %)	4 (0,01 %)	14 (0,02 %)
Gnutella	=	=	=
POP	=	=	=
FTP	=	=	=
FTP Data	=	=	=
DCE RPC	16 (0,02 %)	=	=
Web Socket	=	=	=
XMPP Protocol	4 (0,01 %)	=	=
UDP	24 741 (28,71 %)	11 304 (18,43 %)	47 075 (72,76 %)
Data	21 923 (29,00 %)	10 334 (16,85 %)	45 834 (70,84 %)
Domain Name Service	290 (0,38 %)	44 (0,07 %)	85 (0,13 %)
Teredo IPv6 over UDP	1 702 (2,25 %)	670 (1,09 %)	906 (1,40 %)
NetBIOS NS	666 (0,88 %)	189 (0,31 %)	172 (0,27 %)
Dropbox LAN DP	16 (0,02 %)	=	=
GPRS NS	=	=	1 (0,00 %)
NetBIOS DS	10 (0,01 %)	6 (0,01 %)	=
HTTP (SSCM)	10 (0,01 %)	=	=
Bootstrap Protocol	6 (0,01 %)	9 (0,01 %)	9 (0,01 %)
ICMP	39 (0,05 %)	12 (0,02 %)	9 (0,01 %)
Quake 3 Arena Protocol	2 (0,00 %)	2 (0,00 %)	=
NAT Port Mapping	=	=	=
IPv6	158 (0,21 %)	36 (0,06 %)	74 (0,11 %)
UDP	138 (0,18 %)	36 (0,06 %)	62 (0,10 %)
HTTP (SSCM)	46 (0,06 %)	18 (0,03 %)	22 (0,03 %)
DHCPv6	36 (0,05 %)	14 (0,02 %	28 (0,04 %)
DNS	56 (0,07 %)	4 (0,01 %)	12 (0,02 %)
ICMPv6	20 (0,03 %)	=	12 (0,02 %)
TCP	=	=	=
LLC	128 (0,17 %)	56 (0,09 %)	72 (0,11 %)
ARP	99 (0,13 %)	31 (0,05 %)	35 (0,05 %)
GRE (PPP)	18 149 (27,45 %)	591 (0,96 %)	305 (0,47 %)
Data	1 (0,01)	1 (0,00 %)	=

При високому рівні свободи підключення до мережі і використанню різноманітних технологій побудови мереж , потрібен розвиток нових технологій і підходів "точкового аналізу", які могли б автоматизованому режимі в сукупності з системами моніторингу і конфігурації мережі чинити активний вплив на роботу і функціонування мережі. Аналіз аномального трафіку, а також застосування методу визначення ентропії для аналізу трафіку може виявитися одним з ефективних інструментів побудови "патернів". Розробки нової системи класифікації надійності і довіреності мережевої активності та протоколів яка могла б, використовуючи відповідне маркування активних сесій, потоків і протоколів, регулювати і систематизувати їх активність.

Запропоновані підходи чудово вписуються в концепцію так званих автоматизованих (програмно контрольованих мереж), які мають набути здатність до самоорганізації, відновлення і контролю незалежно від технологій що використовуються для передачі інформації у мережі.

Висновки до 2-го розділу

1. Формалізовано завдання адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі. Удосконалено метод узгодженого розв’язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами у відповідних мережевих інтерфейсах телекомунікаційних вузлів і встановлення пріоритетності його оброблення за принципами диференціації сервісів, який враховує тривалість перебування пакетів для проведення обміну пакетами між чергами із різним пріоритетом, що дало змогу першочергово передавати пакети, які спізнюються, наслідком чого стає адаптація процесу обслуговування навантаження до зміни стану мережевого вузла для забезпечення якості сервісу.

2. Розвинуто структурно-функціональну модель мережевого вузла зі статичною та динамічною віртуалізацією обчислювальних ресурсів, яка дає

змогу забезпечити якість обслуговування та підвищити загальну стійкість системи (корпоративної мережі) до кібератак шляхом ізолювання атакованої віртуальної машини.

3. Розроблено метод декомпозиції структури мережевого маршрутизатора, який дає змогу зменшити флуктуації часових параметрів обслуговування різних видів трафіку, що виникають через коливання їх інтенсивності, підтримувати задані параметри якості обслуговування та оцінювати ефективність масштабованих мережевих рішень корпоративного класу.

4. Запропоновано метод виявлення аномалій мережевого трафіку, який, на відміну від відомих, застосовує техніку аналізу, що базується на вивченні статистичних поведінкових залежностей і ентропії інтенсивності трафіку, що дало змогу забезпечити блокування або фільтрацію небажаних інформаційних потоків в програмно-контрольованих корпоративних мережах.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ НА ЯКІСТЬ НАДАННЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ

3.1 Порівняння параметрів QoS інфокомунікаційних послуг шляхом конфігурації різних методів забезпечення якості обслуговування засобами OPNET Modeler 14.0

На сьогоднішній час в галузі телекомунікацій відбувається значне зростання послуг Triple Play, присутність в мережах великого обсягу мультимедійного трафіку стали серйозною проблемою для функціонування мультисервісних телекомунікаційних мереж. В процесі передавання послуг Triple Play із забезпеченням якості обслуговування (голосу, даних і відео) крізь мережу висуваються різні вимоги, тому розвиток мультисервісних мереж зв'язку та проблеми, що виникають в них, обґрунтовують актуальність забезпечення якості обслуговування. Одна із найбільших проблем в процесі надання послуг Triple Play в мережах з пакетною комутацією полягає в гарантованону наданні якості обслуговування (QoS) користувачів. Якість обслуговування (QoS) є важливою вимогою для реалізації послуг Triple Play. На сьогоднішній день існують різні технології забезпечення якості обслуговування в інформаційних мережах, а вибір яких залежить від вимог, що висуваються до якості обслуговування [37]. Причому якість надання послуг повинна надаватись згідно замовлення користувача. На практиці найчастіше застосовуються такі методи забезпечення QoS:

- резервування мережних ресурсів;
- пріоритезація трафіку ;
- перемаршрутизація.
- комутація по мітках

У роботі побудовано імітаційну модель корпоративної мережі з метою дослідження показників якості обслуговування послуг Triple Play [44]. Для її

побудови використовувалося програмне забезпечення OPNET Modeler 14.0 [178]. Структура імітаційної моделі корпоративної мережі складається з двох доменів: домен A і домен B. Дані домени містять по 2 мережі (LAN) і комутатора (Switch). Домен A і B обмінюються даними за рахунок маршрутизаторів (Router) (Рис.2.1).

До мережі LAN 1 підключено 10 абонентів, які передають дані, що використовують протокол HTTP. Користувачі даної інформаційної мережі мають змогу передавати дані як усередині мережі, так і з мережею LAN 4. Трафік від мережі LAN 1 до мережі LAN 4 передається крізь комутатор Switch A, Router 1, Router 3, Switch B.

До мережі LAN 2 аналогічно підключено 10 абонентів, які передають VoIP трафік. Користувачі даної інформаційної мережі мають змогу передавати дані як усередині мережі, так і з мережею LAN 4. Трафік від мережі LAN 2 до мережі LAN 4 передається через комутатор Switch A, Router 1, Router 3, Switch B.

LAN 3 містить також 10 абонентів, які передають відео трафік. Користувачі цієї мережі мають змогу обмінюватися відеопотоками як усередині мережі, так і з мережею LAN 4. Трафік від мережі LAN 3 до мережі LAN 4 проходить через комутатор Switch B.

LAN 4 теж містить 10 користувачів, які передають всі послуги одночасно. Абоненти даної мережі мають змогу обмінюватися даними як усередині мережі, так і з мережами LAN 1, LAN 2, LAN 3.

Маршрутизатор Router 1 і Router 3 є маршрутизаторами агрегації для передавання даних між різними зонами.

Router 2 і Router 4 є додатковими, на випадок обриву лінії зв’язку або перевантаження основних маршрутизаторів.

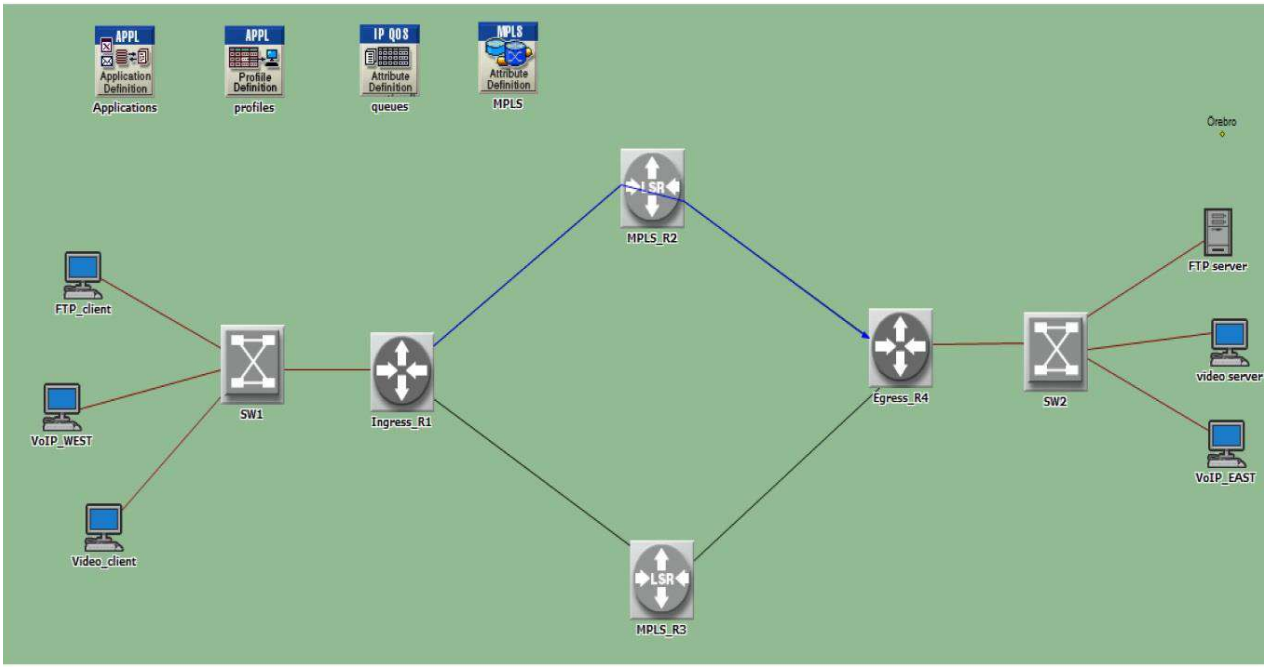


Рис. 3.1. Модель корпоративної мультисервісної мережі

Маршрутизація на мережі здійснюється за допомогою протоколу OSPF, який базується на таких параметрах, що в сукупності є метрикою протоколу маршрутизації:

• кількість проміжних вузлів на шляху від пункту А до пункту Б;

• довжина шляху від пункту А до пункту Б;

• пропускна здатність магістралі;

• завантаженість ділянок мережі.

Моделювання є ресурсоємним процесом, тривалість моделювання становить 1 хвилину в мережі може зажадати до двох, трьох годин залежно від конфігурацьбьллдії комп'ютерів. У зв'язку з цим вжито такі варіанти з мінімізації часу моделювання:

• кожна мережа обслуговувала 10 користувачів;

• час імітації становить 10 хвилин.

Моделювання проводилося 5 разів: у відсутність надання якості обслуговування QoS і з наданням гарантованої якості обслуговування за допомогою механізмів DiffServ, IntServ, Int-DiffServ, MPLS.

Як бачимо з рис.3.2, для передавання даних і голосу потрібна невелика смуга пропускання в порівнянні з відеотрафік і трафіком Triple Play. З цього можна зробити висновок, що при наданні послуг Triple Play необхідна більша смуга пропускання, ніж при наданні голосових послуг і послуг передавання даних.

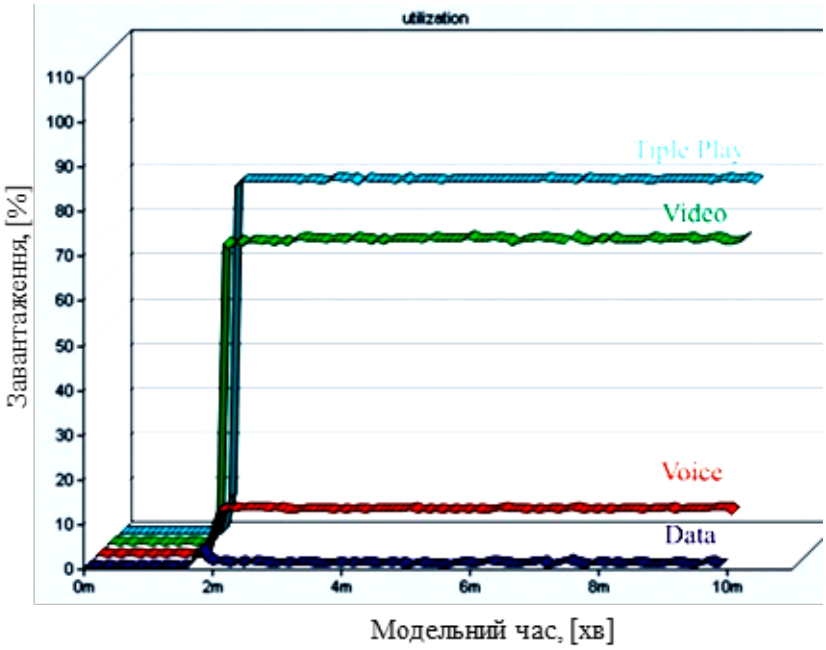


Рис. 3.2. Використання пропускної здатності каналу

На рис.3.3 показано затримку в процесі передавання відеопотоку. На графіку показано чотири кривих: Without any QoS (відсутність QoS), IntServ, DiffServ, Int-DiffServ, MPLS. У разі відсутності надання якості обслуговування середнє числове значення кривої перевищує норми майже в 2,5 рази. При наданні гарантованої якості обслуговування показник затримки пакетів значно поліпшуються, але при застосуванні механізму IntServ, DiffServ все одно не задовольняє вимогам до якісного передавання відеотрафіка. Як видно з рис.2.3, викоритстовуючи механізм Int-DiffServ та MPLS мережа здатна забезпечити необхідну QoS.

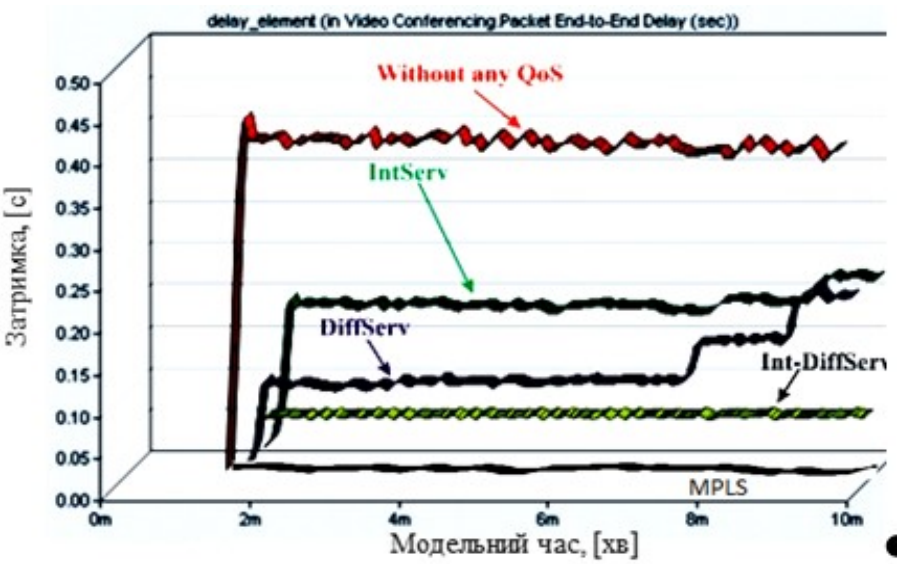


Рис.3.3. Затримка передавання відео трафіку

На рис.3.4 продемонстрований графік затримки варіації при передавання відеотрафіка. На графіку присутні чотири криві: Without any QoS (відсутність QoS), IntServ, DiffServ, Int-DiffServ. У відсутність механізмів надання гарантованої якості обслуговування значення показника варіації затримки перевищують норми, визначенні для відеотрафіка, що у свою чергу позначиться на якості наданої послуги. Як бачимо з рис.3.4, найкращим механізмом надання гарантованої якості обслуговування є Int-DiffServ. [40]

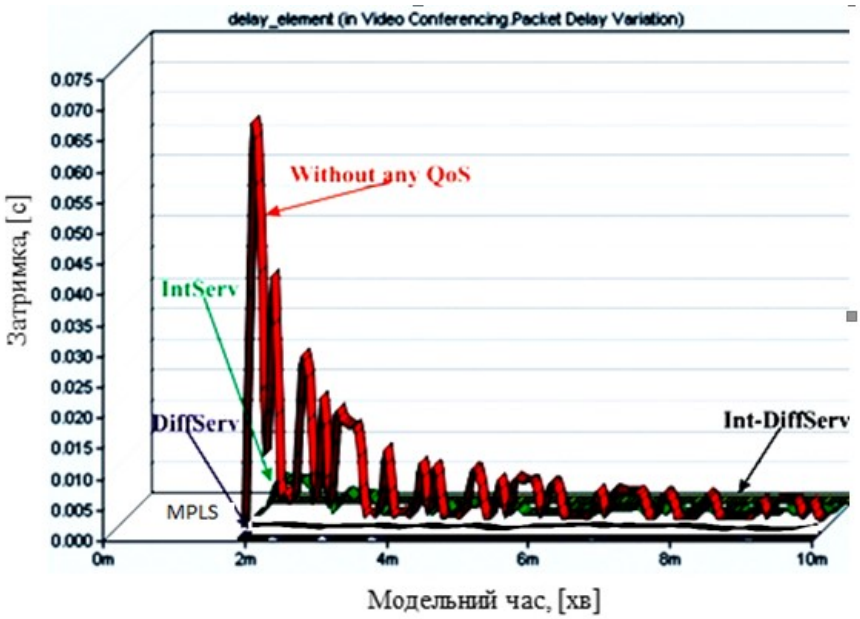


Рис.3.4. Варіація затримки при передавання відео трафіку

Імітаційна модель підтвердила необхідність використання механізмів надання гарантованої якості обслуговування. Аналіз графіків, отриманих в результаті моделювання, показав, що найкращим механізмом надання гарантованої якості обслуговування є Int-DiffServ та MPLS [14-16]. Проте, в умовах нестаціонарності потоків даних в мережі, інтенсивність яких в окремі періоди часу може суттєво перевищувати середньостатистичні значення, існуючі механізми не гарантують забезпечення якості обслуговування. Оскільки в пакетному трафіку різних мереж виявлено властивість самоподібності, виникло завдання побудови моделей, які могли б достатньо точно описати такий трафік та забезпечити збереження переданих даних або застосування вже відомих моделей для опису подібних видів трафіку.

3.2 Дослідження впливу конфігурації мережевих пристроїв на якість обслуговування послуг в програмному середовищі Packet tracer

Постанова задачі та метод її розв'язання.

Задачею моделювання є оцінка наступних параметрів [43]:

- затримка при передаванні даних користувачем;
- втрати пакетів;
- навантаження на канали зв'язку;

Оцінка параметрів, що наведені вище, буде здійснюватися для частини мультисервісної мережі, на основі імітаційної моделі розробленої в програмному середовищі Packet tracer.

В роботі структура імітаційної моделі мережі побудована за трирівневою архітектурою (рис.3.5), яка складається із 3-х маршрутизаторів , 2 маршрутизаторів рівня розподілу та 1-ого маршрутизатора ядра, який може об'єднувати цю частину мережі з загальною мережею оператора. Маршрутизатори рівня розподілу виконують функції агрегації трафіку від комутаторів доступу та визначають маршрути передавання трафіку в телекомунікаційні мережі. Безпровідні точки доступу під'єднуються до

комутаторів доступу, забезпечуючи таким чином можливість безпровідним абонентам отримати необхідний доступ до ресурсів мережі. Кінцеві пристрої виступають в ролі ноутбуків, комп’ютерів.

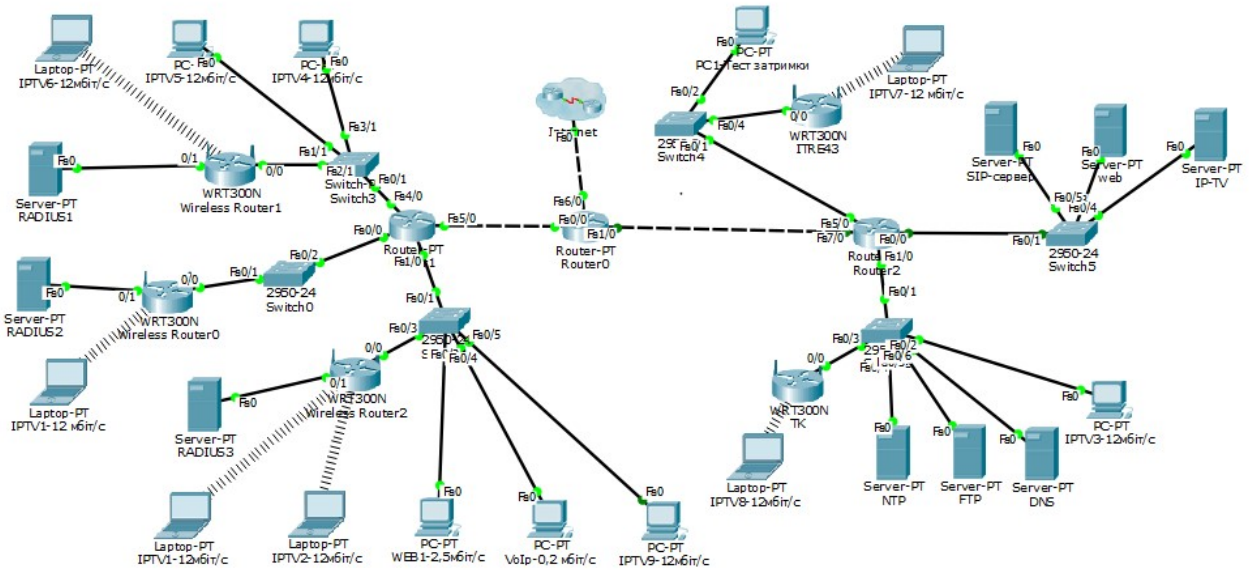


Рис.3.5 Топологія досліджуваної мультисервісної мережі

Серед сервісів, що надаються в мережі та доступні як для безпровідних так і провідних абонентів є: VoIP – передавання голосу(доступ до SIP сервера), WEB серфінг, IPTV додатки.

Для визначення параметрів QoS потрібно коригувати модель генераторами трафіку для кожного з виду сервісів . Оцінка параметрів має проводитися як без навантаження на систему так і в годину найбільшого навантаження, вся система моделюється при пропускній здатності ліній 100мбіт/с. За замовчуванням маршрутизатори працюють із алгоритмами Fifo. Відповідно в роботі поставлено експеримент так, щоб врахувати більшість випадків, які симулюють реальні мережі [44]. Тому експеримент проводився при різних дослідах. А саме шляхом визначення вузького місця в мережі, яке знаходиться між ***R1-S5***, проводиться процедура передавання трафіку з отриманням різних

коефіцієнтів завантаження інтерфейсу, в нашому випадку це інтерфейс маршрутизатора R2 fast Ethernet 0\0. В режимі передавання потоків відбувається паралельно доступ до серверів послуг, через незавантажену ділянку під мережі з кінцевого пристрою PC1(Client 1) через комутатор S4. Для визначення середньої затримки з кінця в кінець, експеримент проведено так , що PC1 передає послідовність із 50-ти PING пакетів на адреси серверів, а саме 172.16.11.3- адреса SIP сервера, 172.16.11.4-адреса IPTV, 172.16.11.5-адреса WEB сервера .

В емуляторі Packet tracer є можливість генерації різних потоків шляхом задання середнього розміру пакету при генерації послуг на адресу призначення та відповідно міжпакетна тривалість паузи. Знаючи середні розміри пакетів послуг, визначених шляхом аналізу реальних мережевих потоків, маємо можливість згенерувати потоки :IPTV-12мбіт/с, Web-2.5 мбіт/с, SIP-0,2 мбіт/с.

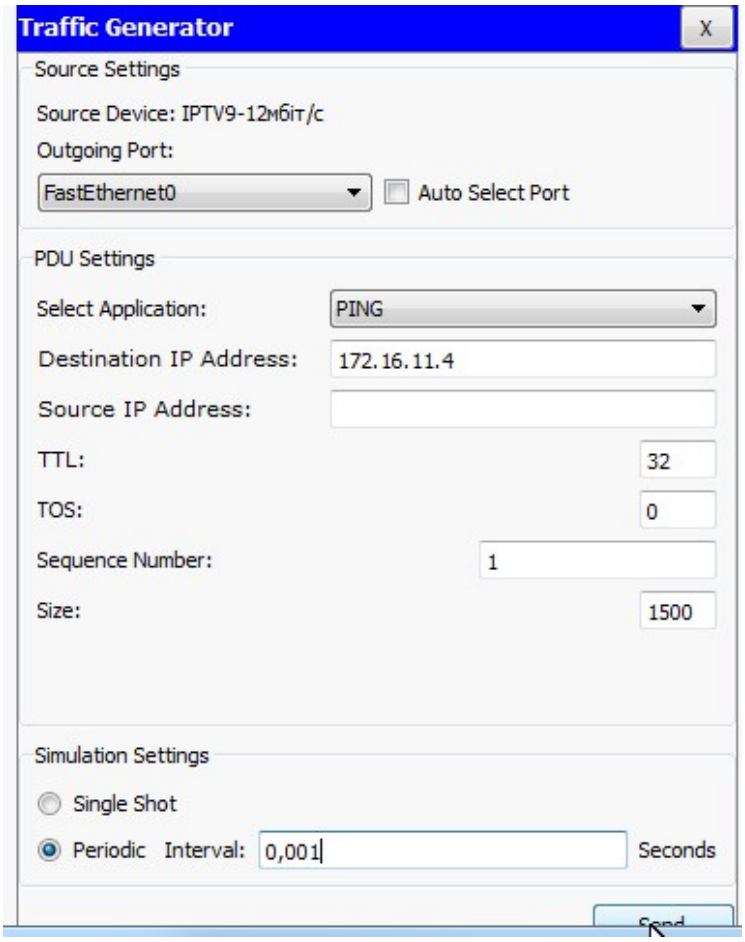


Рис.3.6 Генератор трафіку.

Таким чином, шляхом задання міжпакетної відстані 1 мс і розміром пакету 1500 байт, отримуємо 12мбіт/с потік IPTV показана на рисунку 3.6

```
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=1ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=1ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=1ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=12ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=13ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=11ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=0ms TTL=127
Reply from 172.16.11.3: bytes=32 time=2ms TTL=127

Ping statistics for 172.16.11.3:
    Packets: Sent = 50, Received = 50, Lost = 0 (0% loss),
Approximate round trip times in milli-seconds:
    Minimum = 0ms, Maximum = 13ms, Average = 1ms

PC>ping 172.16.11.4 -n 50
```

Рис.3.7 Командне вікно передавання 50 пакетів PING на сервери послуг

```
     96821 packets output, 122668428 bytes, 0 underruns
     0 output errors, 0 collisions, 1 interface resets
     0 babbles, 0 late collision, 0 deferred
     0 lost carrier, 0 no carrier
     0 output buffer failures, 0 output buffers swapped out
Router2#show int fa0/0
FastEthernet0/0 is up, line protocol is up (connected)
  Hardware is Lance, address is 0004.9abb.d2d2 (bia 0004.9abb.d2d2)
  Internet address is 172.16.11.1/27
  MTU 1500 bytes, BW 100000 Kbit, DLY 100 usec,
     reliability 255/255, txload 1/255, rxload 1/255
  Encapsulation ARPA, loopback not set
  ARP type: ARPA, ARP Timeout 04:00:00,
  Last input 00:00:08, output 00:00:05, output hang never
  Last clearing of "show interface" counters never
  Input queue: 0/75/0 (size/max/drops); Total output drops: 552
  Queueing strategy: fifo
  Output queue :8/40 (size/max)
  5 minute input rate 1162778 bits/sec, 1580 packets/sec
  5 minute output rate 1365645 bits/sec, 2964 packets/sec
     474180 packets input, 348407898 bytes, 0 no buffer
     Received 0 broadcasts, 0 runts, 0 giants, 0 throttles
     0 input errors, 0 CRC, 0 frame, 0 overrun, 0 ignored, 0 abort
     0 input packets with dribble condition detected
     1349102 packets output, 642617546 bytes, 0 underruns
     0 output errors, 0 collisions, 4 interface resets
     0 babbles, 0 late collision, 0 deferred
     0 lost carrier, 0 no carrier
 --More--
```

Copy Paste

Рис.3.8. Статистика інтерфейсу fa0/0 маршрутизатора R2

З рисунку 3.8 видно, що шляхом перегляду інтерфейсів маршрутизатора R2, який є вузьким місцем в структурі мережі, можна отримати таку інформацію, як тип механізму обслуговування черги (в даному випадку FIFO), розмір вхідної черги, вихідної черги, кількість переданого потоку, кількість втрачених пакетів.

Відповідно провівши досліди , отримано результати, які наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати аналізу потоків даних

Напрямок	**Розмір потоку, б/с**	**Завантаження Вузького місця (пропускна здатність 100 мбіт/с) R2-S5 ρ**	**Середня затримка в каналі зв'язку, мс**	**Максимальне значення затримки, мс**	**Втрати, %**
Client1 → SIP	200,000	0,002	1	13	0
Client1 → Web	2500,000	0,025	3	24	0
Client1 → IPTV	12000,000	0,12	1	17	0
TRIPLE PLAY Client1 → SIP	14 700,000	0,147	7	71	0
Client1 → Web			6	45	0
Client1 → IPTV			8	45	0
4 потоки IPTV Client1 → SIP	48 000,000	0,48	12	86	0
Client1 → Web			12	84	0
Client1 → IPTV			11	70	0
4 потоки IPTV+ Мультипотік Client1 → SIP	62 700,000	0,627	55	266	0
Client1 → Web			38	187	0
Client1 → IPTV			76	274	0
8 потоків IPTV+ TRIPLE PLAY Client1 → SIP	110 700,000	1,107	453	1311	2
Client1 → Web			377	1008	4
Client1 → IPTV			619	1361	8

З таблиці бачимо, що часові параметри якості обслуговування певних пакетів при коефіцієнті ρ=0.627 перевищують допустиму затримку потоків

реального часу 100мс(Ip-телефонія), проте без втрат пакетів. А при коефіцієнті завантаження ρ=1.107 починаються значні затримки із втратами, які значно перевищують вимоги, щодо надання гарантованої якості обслуговування.

В такому випадку, можна зробити висновок, що перевантаження виникають у разі переповнення вихідних буферів обладнання, передавального трафіку. Основними причинами виникнення перевантажень є агрегація вхідного трафіку і неузгодженість швидкостей на інтерфейсах. Управління пропускною здатністю у разі перевантажень (вузьких місць) здійснюється за допомогою механізму черг. Пакети поміщаються в черги, які упорядковано обробляються за певним алгоритмом. Фактично, управління перевантаженнями - це визначення порядку, в якому пакети виходять з інтерфейсу (черг) на основі пріоритетів. Якщо перевантажень немає - черги не працюють. В нашому випадку виникають черги , які обслуговуються за алгоритмом FIFO. Звичайна черга з послідовним проходженням пакетів, що працює за принципом перший прийшов - перший пішов (First In First Out - FIFO). Тут немає ніякої пріоритезації, тому при такій конфігурації мережевих пристроїв і виникає значне погіршення якості обслуговування послуг.

Отже, можна зробити висновок, що основним недоліком емулятора мережі Packet Tracer є :

- Оцінка затримки пакетів відбувається у мілісекундах, насправді внесені затримки мережевих пристроїв становлять долі мікросекунд.
- Не дає змогу сконфігурувати мережу з маршрутизаторів, які працюють з пріоритетними алгоритмами обслуговування черг, які в певній мірі можуть покращити високопріоритетні потоки реального часу при передаванні мультисервісного трафіку.

3.3 Дослідження та статистичний аналіз потоків маршрутизатора рівня агрегації корпоративної мережі

Опис і аналіз мультимедійного трафіку сучасних мереж ускладнюється такими причинами:

- широкий діапазон швидкостей передачі;
- різноманітні статистичні властивості мультимедійних інформаційних потоків;
- велика різноманітність мережевих конфігурацій, велика кількість технологій і протоколів передачі;
- багаторівнева обробка повідомлень, унаслідок чого якість обслуговування виявляється залежною від декількох рівнів обробки.

В загальному випадку трафік деякої послуги представляється у вигляді випадкового процесу. Практичне використовання такого методу опису є складним, оскільки відсутній математичний апарат, що забезпечує оцінку параметрів якості нестаціонарного навантаження загального вигляду. Проте знання характеристик трафіку користувачів, який передаватиметься по мережі, є неодмінною умовою для проектування та конфігурації мережі.

В даній роботі аналізувався реальний трафік мультисервісної мережі із використанням пріоритезації. В досліджуваній мережі існували групи користувачів, що прагнули отримати різнотипні послуги з найкращою якістю, та мережеве обладнання - маршрутизатори, комутатори, серверні ферми, щоб надати ці послуги та транспортувати дані до кінцевого користувача. Для того, щоб реально оцінити можливість якісного обслуговування мультисервісної мережі та вплив методів обслуговування різних типів потоків, дослід проведено при одночасній наявності всіх мережевих потоків, утворених бажаннями користувачів [12].

Для перехоплення, запису та аналізу мережевого трафіку використано засіб моніторингу Check MK та аналізатор трафіку WireShark, кінцевим результатом якої є створений дамп всіх мережевих пакетів, присутніх на порті

обслуговуючого пристрою маршутизатора рівня агрегації корпоративної мережевих технологій НУ ЛП за період спостереження протягом доби, 4годин та 5 хвилин . Отриманий дамп проаналізовано та визначено наявність шести мережевих потоків, що відповідають кожній з бажаних послуг кінцевих користувачів, які обслуговує мережа. В даній мережі передаються мультимедійні потоки з впровадженням IP телефонії та потоків IPTV. На рис. 3.9 показано статистику користувацького трафіку в канал “верх” та в канал “вниз” протягом 4 годин у першій половині дня. Визначено годину найбільшого навантаження? та яку кількість ресурсів пропускної здатності використовують абоненти.

Рис.3. 9 Отримані статистичні дані маршрутизатора НУЛП рівня агрегації протягом 11.58-13.58 год.

Рис.3.10 Отримані статистичні дані маршрутизатора НУЛП рівня агрегації протягом 25 год

Основними початковими параметрами вхідних потоків пакетів, що потрібно визначити для подальших обрахунків та аналізу? є середня інтенсивність поступлення пакетів, дисперсія, середньоквадратичне відхилення, інтенсивність обслуговування, коефіцієнт завантаженості обслуговуючого пристрою з використанням засобу WireShark.

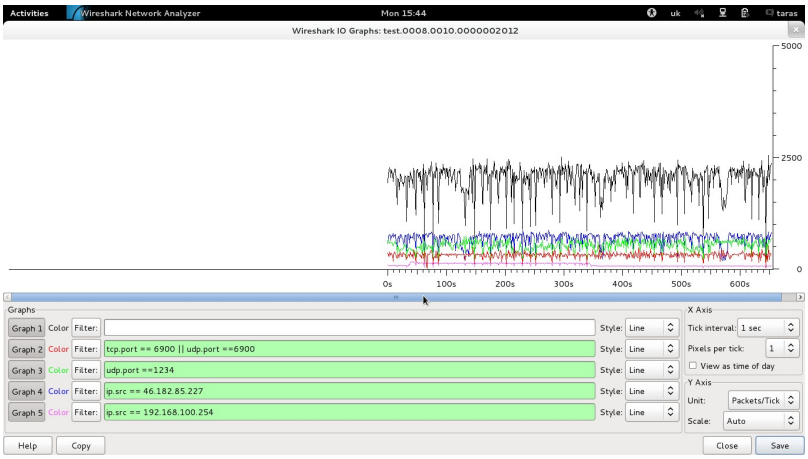


Рис.3.11 Перехоплення потоків мережі з використанням WireShark аналізатора

Середня інтенсивність поступлення пакетів визначається за формулою:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\lambda_k \ , \tag{3.1}$$

де λ_k - інтенсивність поступлення пакетів в момент часу k, N - загальна кількість часових інтервалів.

Визначаємо дисперсію і середньоквадратичне відхилення як:

$$D = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(\lambda_k - \bar{\lambda})^2 \ . \tag{3.2}$$

$$S = \sqrt{D} \tag{3.3}$$

Тому за максимально можливу інтенсивність обслуговування будемо вважати таку, при якій не буде втрат пакетів, тобто така, яка зможе обслужити потік заданої інтенсивності. Тобто замінимо параметр Transmit rate на Bandwidth – смуга пропускання для мережевого потоку. Отже, отримаємо формулу:

$$\mu = \frac{\text{Bandwidth}}{\text{Frame length}} \tag{3.4}$$

Коефіцієнт завантаженості визначається як:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}}{\mu} \tag{3.5}$$

Обраховані дані основних параметрів для кожного сервісу, як і для загального потоку даних заносимо в одну таблицю.

Визначення ступеня самоподібності трафіка

Самоподібні процеси характеризуються декількома типовими ознаками:

- дисперсія таких процесів прямує до безмежності;
- автокореляційна характеристика є повільно спадною, що ще називають терміном «важкий хвіст АКХ»;
- параметр Херста такого процесу знаходиться в межах від 0 до 1.

Для проведення статистично-імовірнісного аналізу трафіку корпоративної мережі використовувались наступні методи дослідження [14]:

- RS-аналіз для оцінки параметру Херста випадкового процесу, що відображає трафік мультисервісної мережі.
- Оцінка відповідності експериментального розподілу аналітичним відомим розподілам проведена із застосуванням критерію Колмогорова.

В проведених дослідженнях для визначення ступеня самоподібності трафіка використовується параметр Херста, який може приймати наступні значення:

- $0<H<0,5$ – випадковий процес є антиперсистентним (ергодичним) рядом, який не володіє самоподібністю;

- $H=0,5$ – повністю випадковий ряд, аналогічний до випадкових зміщень частинки при класичному броунівському русі;

- $0,5<H<1$ – персистентний процес (такий, що самопідтримується), який володіє довготривалою пам'яттю і є самоподібним.

Метод RS-аналізу відображається наступною послідовністю кроків:

Визначається математичне сподівання інтенсивності поступлення пакетів $X_k(k=1..N)$ та дисперсія вибірки:

$$M_N = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} X_k \tag{3.6}$$

$$S_N^2 = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(X_k - M)^2 \tag{3.7}$$

Визначається інтегральне відхилення:

$$D_j = \sum_{k=1}^{j} X_k - jM, \quad j \in [1; N] \tag{3.8}$$

Визначається рознесення випадкового процесу:

$$R_N = \max D_j - \min D_j \tag{3.9}$$

Зі встановленого Херстом співвідношення:

$$\frac{R}{S} \approx \left(\frac{N}{2}\right)^2 \tag{3.10}$$

визначається параметр H:

$$H = \frac{\log\left(\frac{R}{S}\right)}{\log\left(\frac{N}{2}\right)} \tag{3.11}$$

Коефіцієнт варіації визначається як відношення середнього квадратичного відхилення інтенсивності надходження пакетів до математичного очікування цієї ж величини.

Для перевірки адекватності обраної статистичної моделі емпіричній вибірці висунуто статистичну гіпотезу H_0 про адекватність статистичної моделі обраній емпіричній вибірці. Для перевірки гіпотези використано статистичні критерії узгодженості Колмагорова, Пірсона та Колмогорова-Смірнова [39].

Для виміряної реальної статистики потоків отриманих у 3 розділі проведемо підбір розподілу кожного із мережевих потоків.

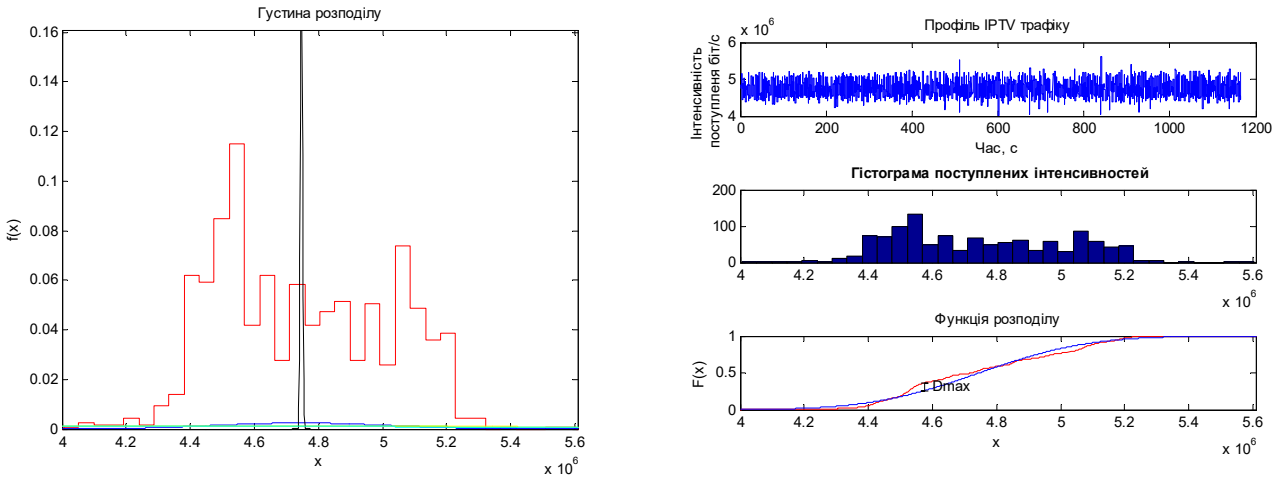


Рис. 3.12 Статистичний аналіз трафіку IPTV

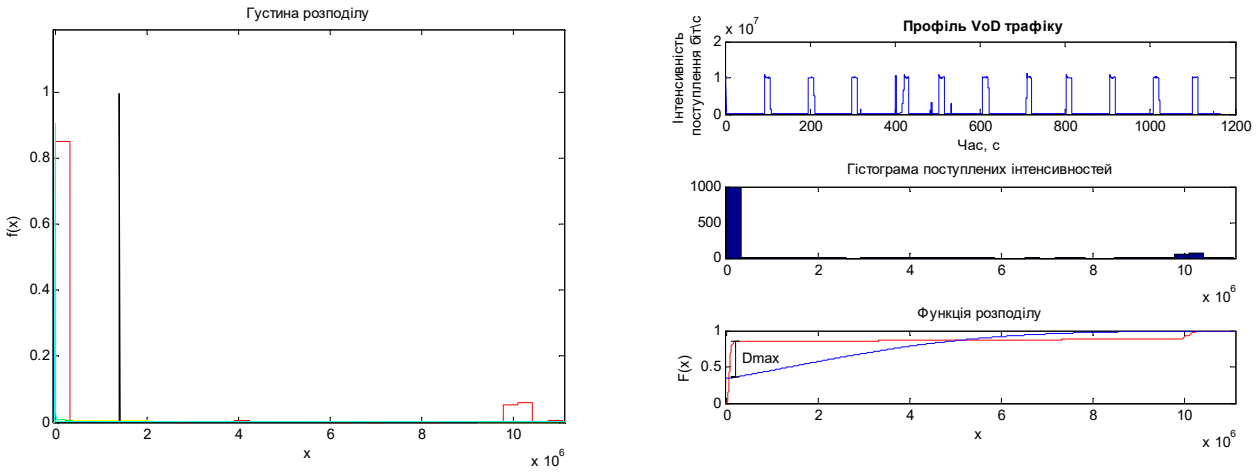


Рис.3.13 Статистичний аналіз трафіку VoD

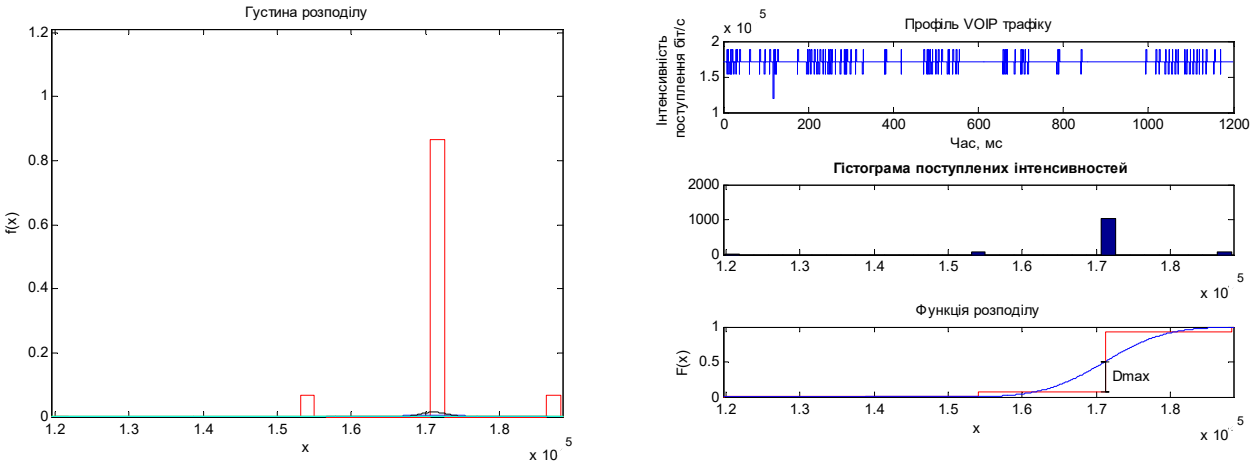


Рис.3.14 Статистичний аналіз трафіку VoIP

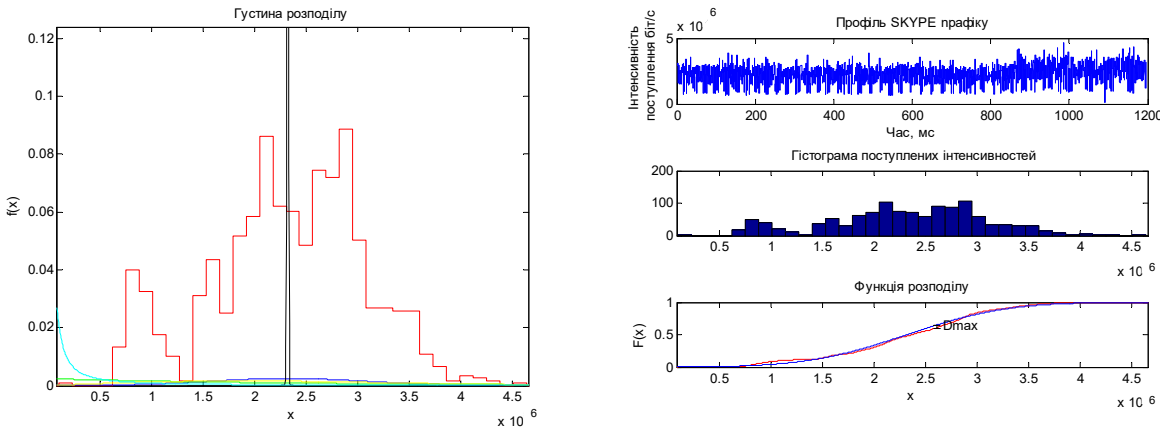


Рис.3.15 Статистичний аналіз трафіку SKYPE

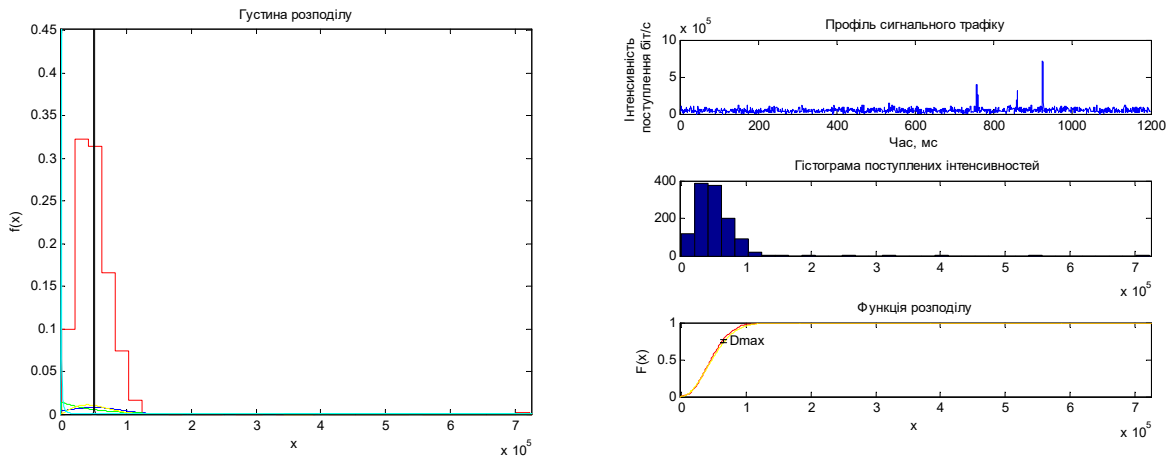


Рис.3.16 Статистичний аналіз трафіку Signal

Вихідні дані моделі

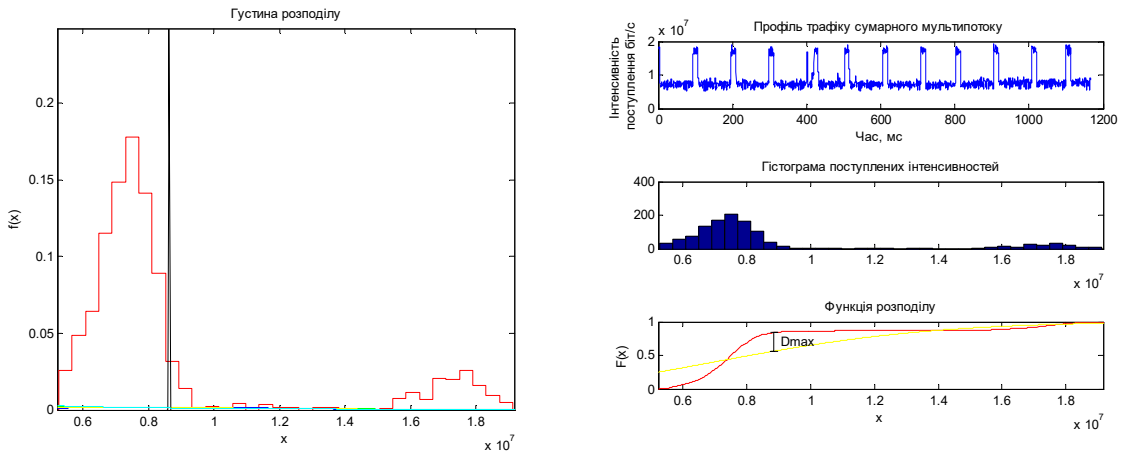


Рис.3.17 Статистичний аналіз мультипотоку

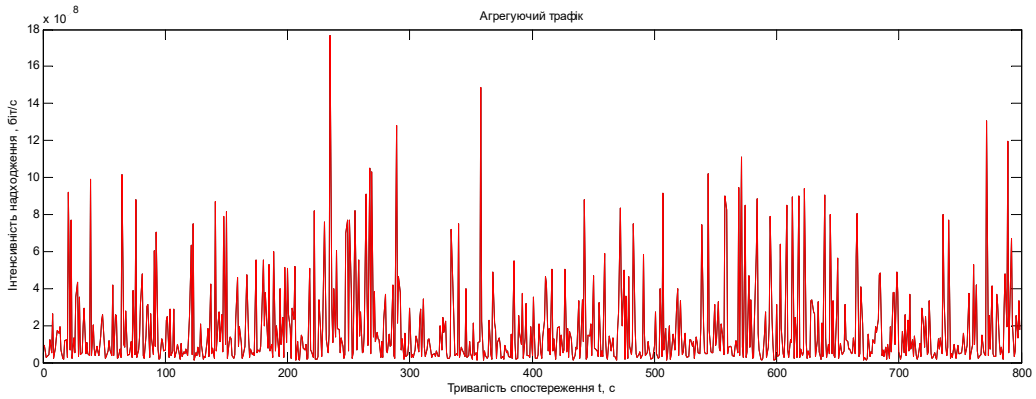


Рис3.18 Інтенсивність поступлення трафіку агрегація мережі НУЛП

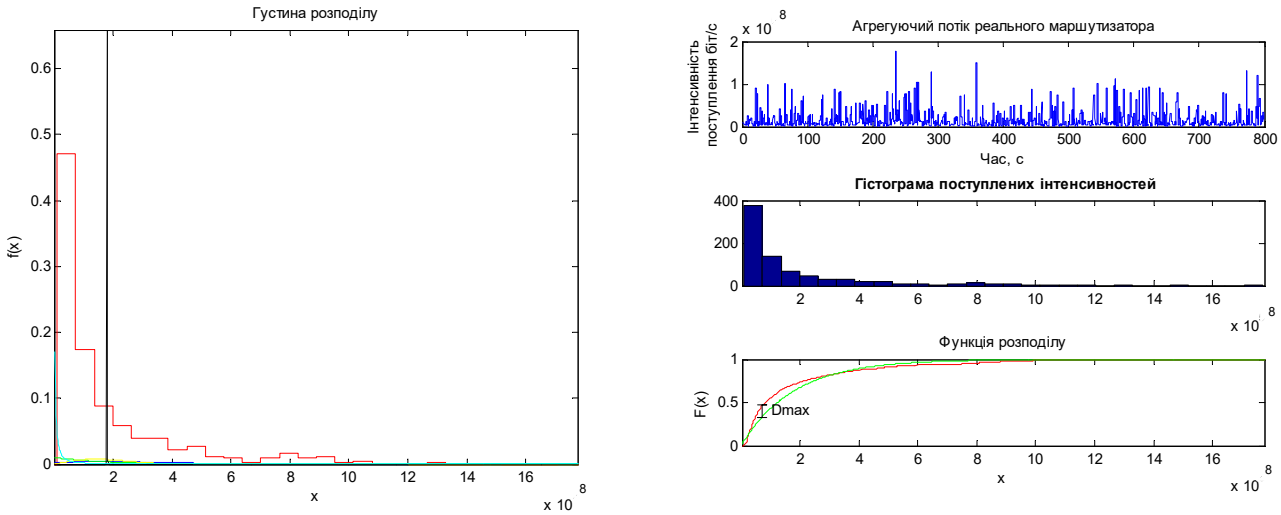


Рис.3.19 Статистичний аналіз реального трафіку маршрутизатора рівня агрегації [39]

На основі аналізу проведених досліджень запропоновані класифікація трафіку по додаткам і зіставлення кожному типу додатків законів, що дозволяють найбільш повно описати поведінку трафіку на конкретному рівні моделі IETF.

Таким чином, поведінка трафіку мультисервісної IP-мережі характеризується різними законами розподілу. В якості математичної моделі СМО може бути обрана система із загальними розподілами вхідного потоку і процесів обслуговування типу G/G/1. СМО типу G/G/1 є найбільш загальним випадком одноканальних систем масового обслуговування, в яку надходить довільний потік заявок загального вигляду з функцією розподілу інтервалів між заявками A(τ). Тривалість обслуговування заявок в приладі розподілена по довільному закону B(τ). Завдання розрахунку систем виду G/G/1 для зазначених вхідних процесів і процесів обслуговування ускладнена тим, що дисперсії цих процесів нескінченні.

Розрахунок таких систем вимагає задання конкретних законів розподілів, що не дозволяє отримати аналітичне рішення в загальному вигляді. Аналітичне рішення можливо тільки для деяких розподілів, наприклад, з експонентним

розподілом. Для більшості законів розподілів інтервалів між поступленими в систему заявками і тривалостями їх обслуговування неможливо отримати точне рішення в аналітичній формі.

У той же час, на практиці при дослідженні реальних систем рідко бувають відомі закони розподілів зазначених величин. Зазвичай при описі процесів надходження заявок в систему і їх обслуговування в приладі обмежуються кількома моментами відповідних розподілів, найчастіше - двома першими моментами, які задаються у вигляді математичного очікування і середньоквадратичного відхилення або коефіцієнта варіації шуканої випадкової величини.

Однак при цьому виявляється неможливим отримання точного результату. Це обумовлено тим, що у випадку довільного (відмінного від найпростішого) потоку заявок, що надходять у систему, характеристики функціонування СМО, зокрема середній час очікування, залежать не тільки від двох перших моментів, але і від моментів більш високого порядку - третього, четвертого і т.д. Причому ця залежність тим менша, чим вище порядок числового моменту.

Таким чином, всі результати, отримані в аналітичній формі при заданні інтервалів між поступленими в систему заявками і тривалостями їх обслуговування двома першими моментами - середніми значеннями $a = 1/\lambda$ і $s = 1/\mu$ і коефіцієнтами варіації Ca і Cs, являють собою наближені залежності. На основі проведених досліджень доведено, що агрегований трафік інфокомунікаційної мережі є самоподібним з параметром Херста, близьким до одиниці. Однак для жодного з цих розподілів не виконана умова критерію Колмогорова, тому найбільш придатними для аналітичного моделювання трафіку мультисервісних корпоративних мереж можна вважати самоподібні процеси [14].

Таблиця 3.2

Опис виявлених потоків у реальній мультисервісній IP-мережі.

Тип трафіку	Протокол	Сер. Довжина пакета L, байт	Смуга пропускання C, кбіт/с	Пріоритет
Відеоконференція	RTSP	1016	2820	2
IPTV-FIFO	UDP	1500	5000	4
Web-трафік	HTTP	1514	2436	6
IP-телефонія	UDP(RTSP)	200	180	3
Відео за запитом (VoD)	HTTP(TCP)	1300	1354	5
Службові дані	-	66	36	1
Загальний потік	**-**	**1300**	**14966**	**-**

Таблиця 3.3

Основны параметри мережевого потоку кожного типу [39]

Тип трафіку	Коеф. Варіації	Параметр Херста
Відеоконференція	0,200	0,513
IPTV-FIFO	0,204	0,766
Web-трафік	0,207	0,685
IP-телефонія	0,370	0,981
Відео за запитом (VoD)	0,194	0,839
Службові дані	0,183	0,668
Загальний потік	0,154	0,604

Таким чином, всі результати, отримані в аналітичній формі при заданні інтервалів між поступленими в систему заявками і тривалостями їх обслуговування двома першими моментами - середніми значеннями $a = 1/\lambda$ і $s = 1/\mu$ і коефіцієнтами варіації Ca і Cs, являють собою наближені залежності.

На основі обчислених даних та прогнозованих оцінок обслуговування розроблено імітаційну модель обслуговування мультисервісної мережі з використанням реальних даних. Дана модель являє собою послідовність операцій, написаних в програмі MatLab. Блок схема алгоритму роботи моделі наведена на рисунку 3.20.

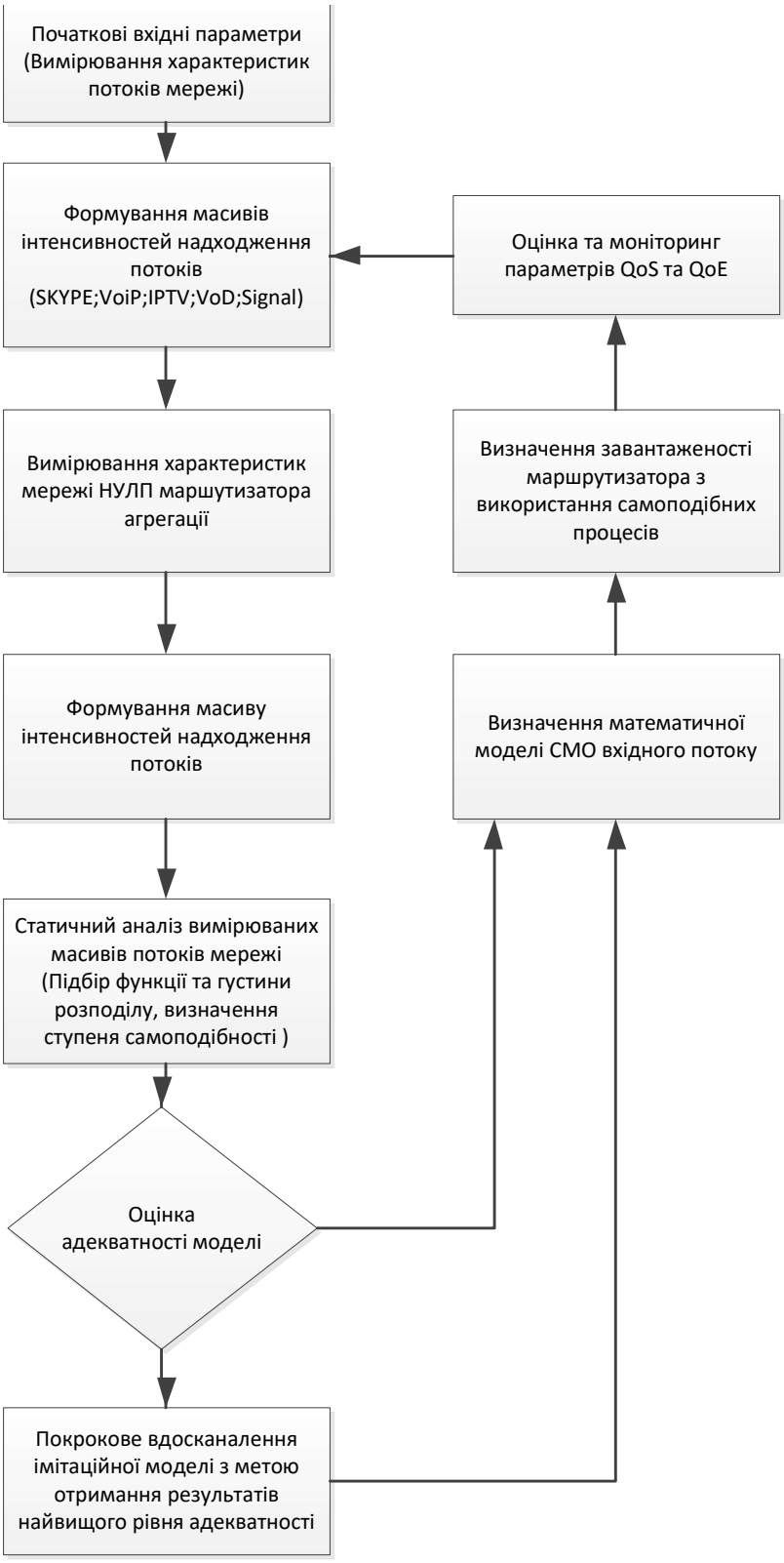


Рис 3.20. Блок схема алгоритму роботи імітаційної моделі обслуговування вхідного трафіку та визначення характеристик реальних потоків даних

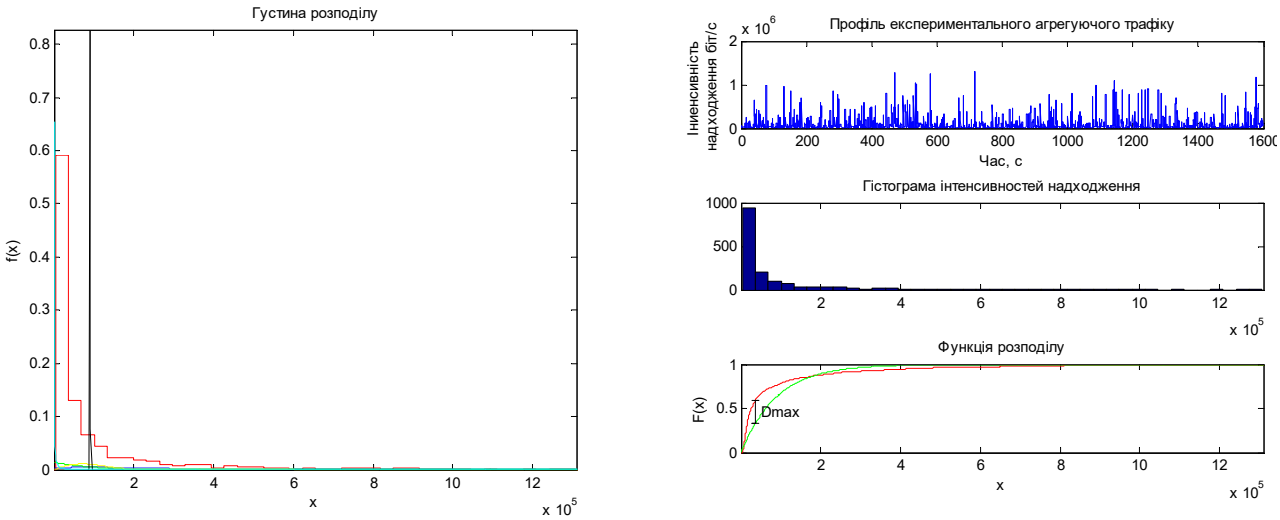


Рис. 3.21. Статистичний аналіз експериментального трафіку маршрутизатора рівня агрегації

Відповідно у роботі проведено дослідження основних параметрів трафіку мультисервісної мережі НУ “ЛП”, визначено ступінь самоподібності трафіка за допомогою RS методики, оцінивши параметр Херста, який становить 0,639. Для перевірки адекватності підбору теоретичного закону розподілу відповідно до визначеного експериментальним шляхом використано статистичні критерії узгодженості Колмагорова, Пірсона та Колмогорова-Смірнова, за якими найбільш підходящим є показниковий закон розподілу [12].

3.4 Дослідження ефективності запропонованих рішень шляхом проведення імітаційного моделювання в середовищы Matlab

Однією з основних проблем в дослідженнях телекомунікаційних систем є висока вартість обладнання (маршрутизаторів, комутаторів та серверів), що значно ускладнює тестування, оптимізацію старих і впровадження нових топологій і мережевих рішень. Економічним рішенням даних завдань є розробка та використання програмного забезпечення, що дає змогу проводити імітаційне моделювання, отримуючи результати з тією ж достовірністю, що і на реальному обладнанні [242-244]. Значно скорочується трудомісткість при

організації експериментів, тому що немає необхідності будувати реальну мережу. Перевагою симуляції є доказ коректності зібраної статистики. Знаючи апроксимації, закладені в модель, і ступінь їх застосовності можна довести коректність результатів проведених експериментів без необхідності доводити коректність самої моделі. Симуляція - це процес випробування симуляційної моделі на платформі, яка імітує реальні умови. Симуляція забезпечує можливість створювати, змінювати і вивчати поведінку симуляційної моделі. Симуляція допомагає користувачеві прогнозувати переваги і недоліки моделі безпосередньо перед запуском моделі в реальних умовах. Нижче наведено популярне програмне забезпечення, що використовується для симуляції мережевих даних: «OMNet ++»; «OPNET Modeler»; «NS2».

«OMNet ++» - це дискретне імітаційне програмне забезпечення на мові програмування «C ++». Воно використовується для симуляції мереж передавання даних. Інтерфейс програми не особливо дружній до користувача і вимагає вивчення великої кількості посібників, навчальної документації і презентацій. Хоча він має в арсеналі модулі для імітації MPLS, LDP і RSVP-TE, необхідної документації по цих модулях практично немає в мережі.

«NS2» - симулятор, орієнтований на мережеві дослідження. Інтерфейс користувача використовує мову програмування скриптів OTcl в системах UNIX (хоча є можливість установки на системах windows). Для того, щоб побудувати необхідну топологію мережі на «NS2», необхідно володіти мовою програмування OTcl. Більше того, модулі MPLS, LDP і RSVP-TE недоступні в стандартній комплектації програмного забезпечення. Немає необхідної навчальної документації для всіх модулів і навчальних ресурсів в мережі.

«OPNET Modeler» - засіб для проектування і моделювання локальних і глобальних мереж, комп'ютерних систем, додатків і розподільних систем.

На рис. 3.22 показано блок схему імітаційного моделювання системи оброблення інформаційних потоків за удосконаленим алгоритмом управління

черг у вузлах мережі NGN, яка складається із виконання 10 етапів для досягнення мети щодо оцінки ефективності запропонованих рішень стосовно забезпечення гарантованої якості обслуговування в NGN мережах.

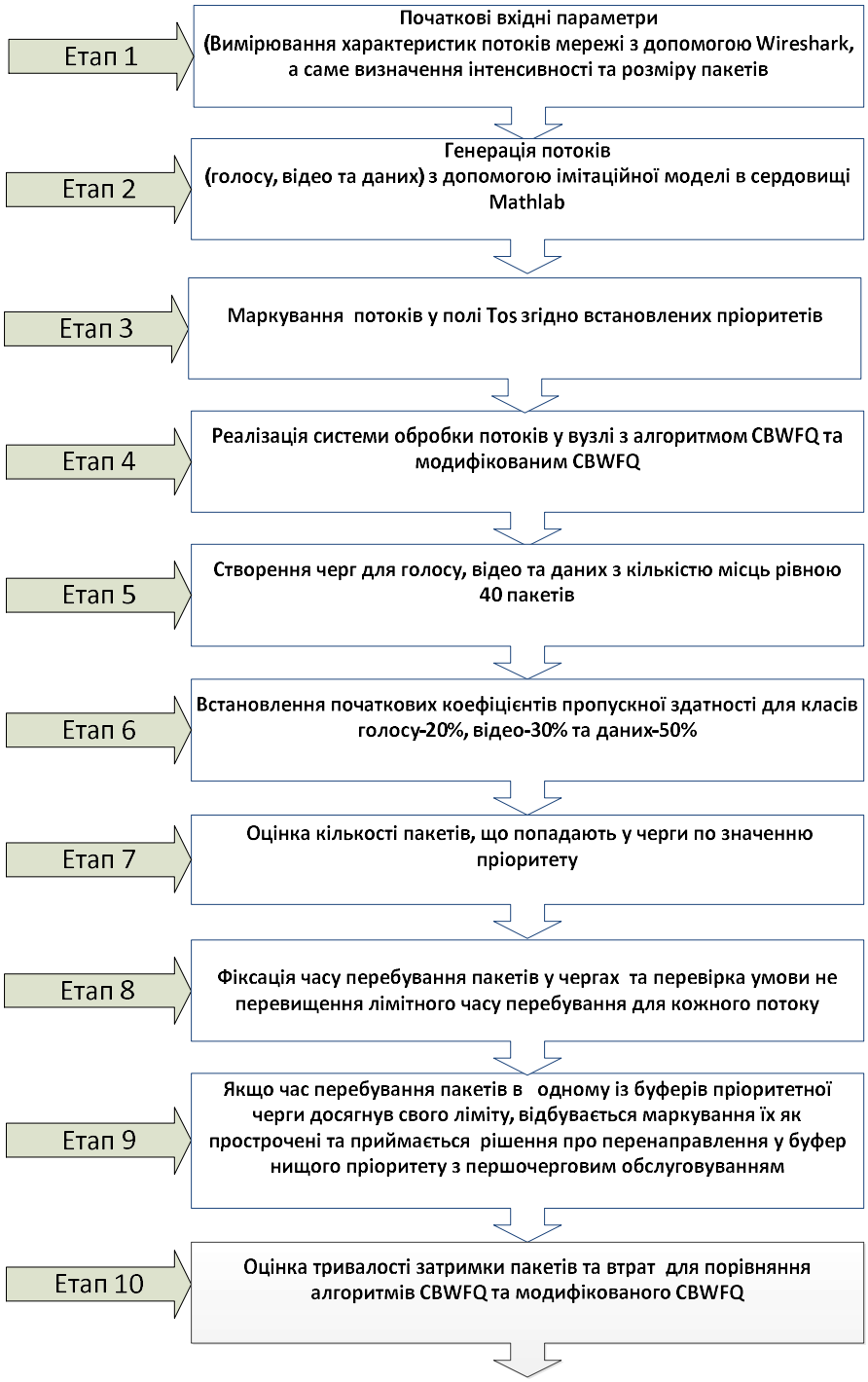


Рис.3. 22. Блок-схема імітаційного моделювання[36]

У роботі проведено практичний дослід щодо визначення характеристик потоків відео, голосу та даних. Для побудови моделі мережевого вузла необхідно дослідити властивості окремо взятих реальних потоків.

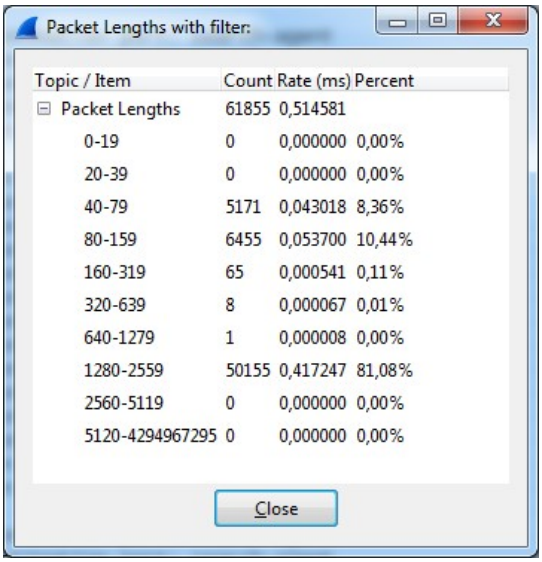
Для даного дослідження використовується програма WireShark а також програмне забезпечення VLC Player 2.1.5 для перегляду відео потоку на приймаючій стороні.

Загальні результати відловлених пакетних даних наводяться нижче:

```
Summary created by Wireshark  (v1.10.11-0-g1a5c8ab from master-1.10)

File:
   Name:
C:\Users\7931~1\AppData\Local\Temp\wires.hark_pcapng_399D722E-E093-441B-
BD9A-3BF64FB3B4E4_20141130233605_a05992
   Length:          71448683 bytes
   Format:          Wireshark/... - pcapng
   Encapsulation:   Ethernet

Time:
   First packet: 2017-11-30 23:36:05
   Last packet: 2017-11-30 23:38:05
   Elapsed: 00:02:00

Statistics:
   Packets: 61855
   Between first and last packet:120,205 sec
   Avg. packets/sec: 514,581
   Avg packet size: 1121,221 bytes
   Bytes: 69353140
   Avg bytes/sec: 576959,329
   Avg Mbit/sec: 4,616
```

Рис. 4.2. Характеристика відео потоку

На рис. 3.23. показано кількість пакетів певної довжини, та їхнє процентне співвідношення від загальної кількості пакетів.



Packet Lengths with filter:

Topic / Item	Count	Rate (ms)	Percent
Packet Lengths	61855	0,514581	
0-19	0	0,000000	0,00%
20-39	0	0,000000	0,00%
40-79	5171	0,043018	8,36%
80-159	6455	0,053700	10,44%
160-319	65	0,000541	0,11%
320-639	8	0,000067	0,01%
640-1279	1	0,000008	0,00%
1280-2559	50155	0,417247	81,08%
2560-5119	0	0,000000	0,00%
5120-4294967295	0	0,000000	0,00%

Close

Рис. 3.23. Довжини відео пакетів та їхнє процентне відношення

Як видно із даних, що показані на цьому рисунку, а також рисунку вище, корисне навантаження мережі, за кількістю всіх пакетів, складає 81,08%, а за кількістю всієї інформації, що була передана склало 98,21% від всієї інформації що передавалась в мережі [12]. Графік інтенсивності надходження пакетів за одиницю часу відносно часу дослідження наведені на рис. 3.24 .

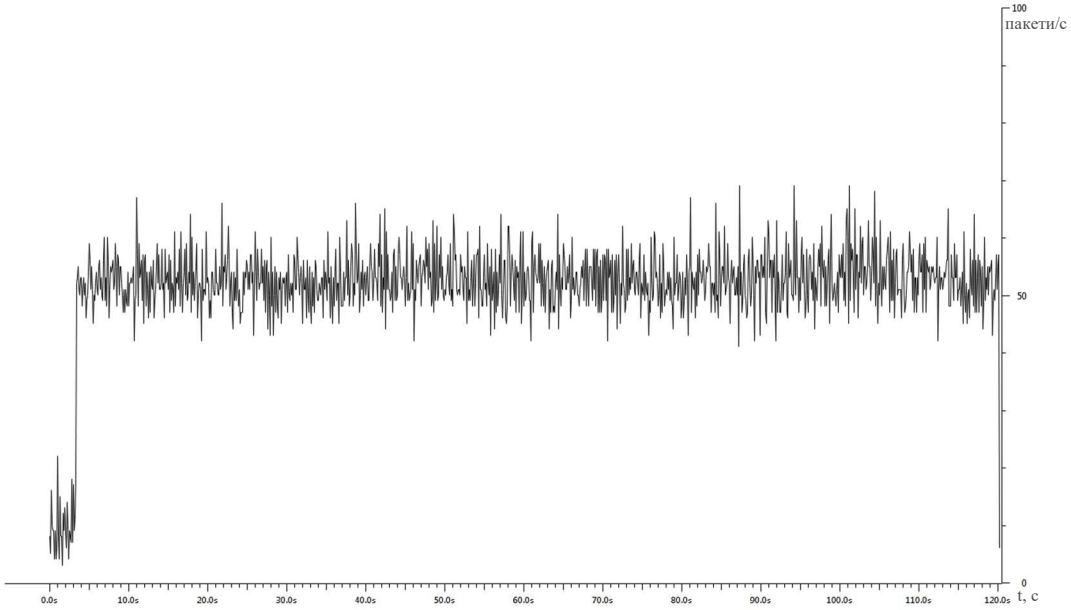


Рис. 3.24. Інтенсивність поступлення пакетів за 0,1 секунди протягом часу тривалості досліду

Аналогічно прводилось дослідження із застовунням Wireshark визначення характеристик потоку даних (рис.3.25).

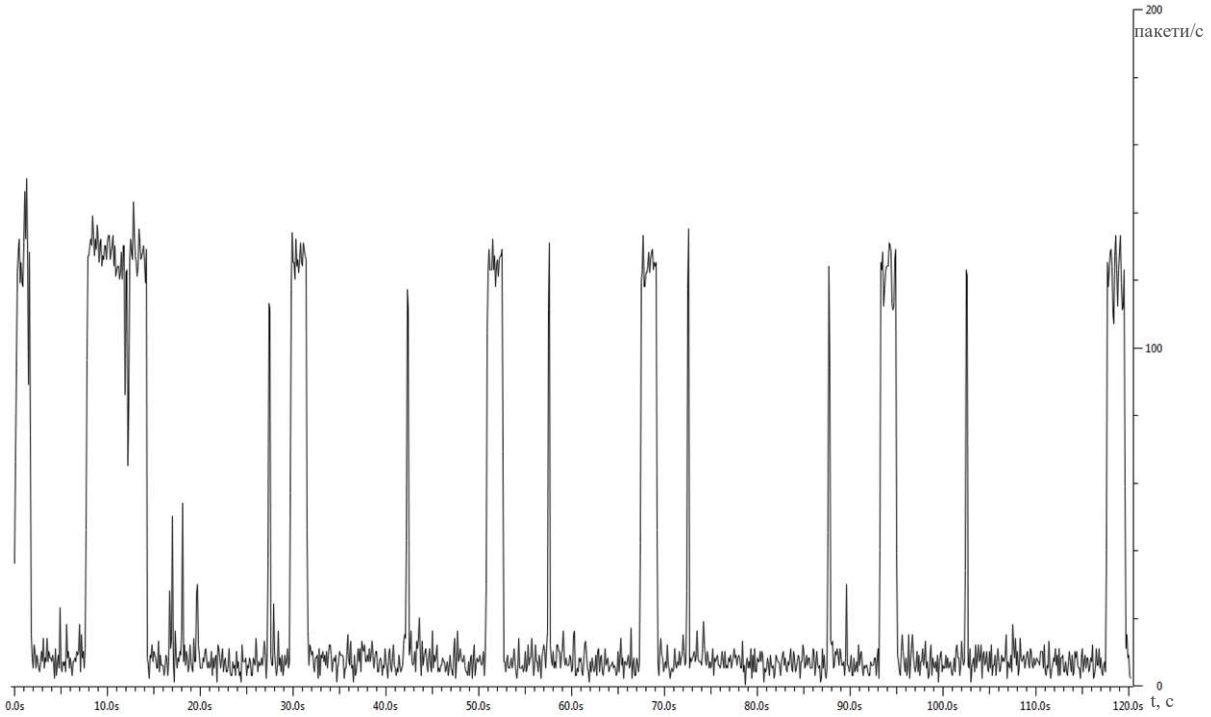


Рис. 3.25. Інтенсивність поступлення пакетів за 0,1 секунди он-лайн відео протягом тривалості досліду

Summary created by Wireshark (v1.10.11-0-g1a5c8ab from master-1.10)

File:
Name: F:\Dropbox\MKR\Досліди\Дослід6_2.pcapng
Length: 96864498 bytes
Format: Wireshark/... - pcapng
Encapsulation: Ethernet

Time:
First packet: 2017-12-01 01:49:22
Last packet: 2017-12-01 01:51:24
Elapsed: 00:02:01

Statistics:
Packets: 92220
Between first and last packet:121,349 sec
Avg. packets/sec: 759,955
Avg packet size: 1016,710 bytes
Bytes: 93760984
Avg bytes/sec: 772653,400
Avg Mbit/sec: 6,181

Рис. 3.26. Характеристка потоку даних

Останнє дослідження проведено із потоком VoIP. Заради цього підключено додаткову послугу в провайдера, проведений виклик IP-телефонії. Результати дослідження показані на рисунку 3.27

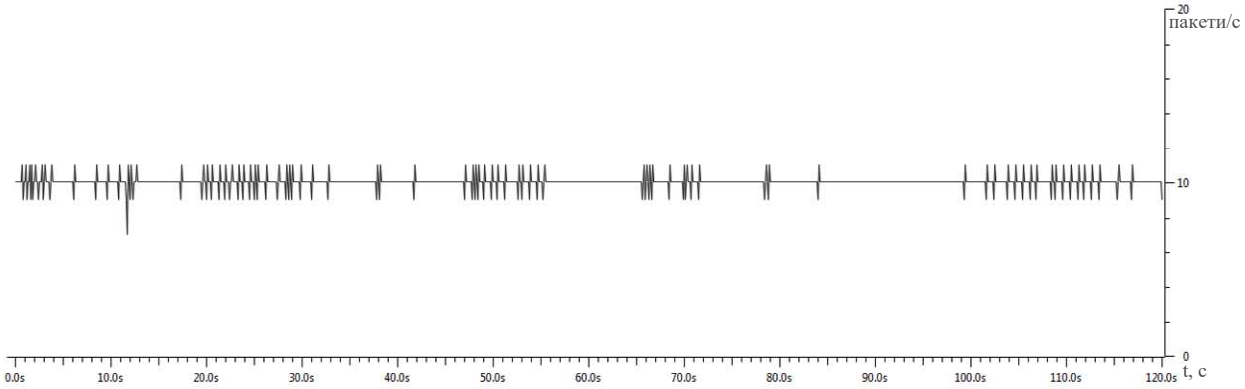


Рис. 3.27. Інтенсивність поступлення в пакетах за секунду

```
Summary created by Wireshark  (v1.10.11-0-g1a5c8ab from master-1.10)

File:
   Name:           F:\Dropbox\MKR\Досліди\Дослід7_2.pcapng
   Length:          3168334 bytes
   Format:          Wireshark/... - pcapng
   Encapsulation:    Ethernet

Time:
   First packet: 2017-12-02 16:35:54
   Last packet: 2017-12-02 16:37:54
   Elapsed: 00:02:00

Statistics:
   Packets: 13177
   Between first and last packet:120,087 sec
   Avg. packets/sec: 109,729
   Avg packet size: 206,463 bytes
   Bytes: 2720560
   Avg bytes/sec: 22654,974
   Avg Mbit/sec: 0,181
```

Рис. 3.28. Характеристика голосового потоку

Виходячи із отриманих статистичних результатів потоків даних створено імітаційну модель з реалізацією генерації досліджуваних потоків. На вхід мережного пристрою поступає агрегований трафік з середньою інтенсивністю $(\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$. Головнм по ступеню впливу на виникнення черг чинником є коефіцієнт завантаження пристрою – відношення середньої інтенсиності вхідного трафіку (λ) пристрою до середньої інтенсивності передавання пакетів на вихідний інтерфейс (μ) [26, 34].

Відповідно пакети, що поступили з інтенсивністю λ і $\lambda > \mu$ записуватимуться у буфер, але перед тим як потрапити у буфер, вони поступатимуть у класифікатор, який працює на основі аналізу IP заголовка і в залежності від вмісту DSCP (ToS) поля зчитуватиме DSCP код який вказуватиме відповідний пріоритет пакету потоку (в даному випадку голос, відео та дані). Після чого класифікатор направлятиме їх у виділені буфери фіксованої довжини (40 пакетів), в даному випадку для моделі системи адаптивного пріоритетного обслуговування мультисервісного трафіку з класифікатором послуг та чергами різної пріоритетності (рис.4.1), відповідно маршрутизатор буде містити 3 черги для кожної послуги окремо, щоб надати високу якість обслуговування пріоритетним послугам. Перевагою даної моделі є те, що до кожної черги можна настроювати різні політики оброблення пакетів, а саме призначати необхідну частину загальної пропускної здатності (в даному випадку 20%-для голосу, 50-для відео та 30% для даних) або настроювати механізм відкидання пакетів для послуг, які використовують протокол передачі TCP з використання WRED алгоритма. Тривалість пакетів визначалася з рекомендованих їх розмірів (від 64 до 1500 байтів).

Трафік голосу визначається переважно малими розмірами пакетів, а такі послуги як відео та інтернет дані великими розмірами пакетів, визначених на основі реальних даних з допомогою програми Wireshark. В даній роботі пропонується передавати пакети з такими розмірами, частота появи яких буде описуватись випадковим чином, розподілені за рівномірним законом з

врахувнням параметра відсотка зайнятості загального ресурсу каналу із одночасним присвоєнням DSCP коду :

- Голос – від 200 до 210 (байт)
- Дані – від 800 до 1500 (байт)
- Відео– 800 до1300 (байт)

Результати досліджень [97, 112] показали, що функція розподілу інтервалів часу між надходженнями пакетів не узгоджується з експоненціальним розподілом. Результати статистичної обробки вимірювань показали неузгодженість з апроксимуючою функцією експоненціального розподілу, прикладом якого є пуассоновский потік. Хороший результат показали функції, що мають так званий «довгий хвіст». Як показано в [5, 170, 175] «пачковість» є однією з характеристик самоподібних процесіjgnbв. Саме тому, використовуючи функцію генерації значень розподілених за броунівським рухом, можна досягнути властивості самоподібності агрегованого мультисервісного потоку.

Відповідно, інтервали між пакетами згенеровано випадковим процесом, розподіленими за броунівським рухом з параметром Херста H=0,7. Вибрано розподіл модельного часу з постійним кроком. Значення кроку – 1мс. Пропускна здатність каналу, вибрана в результаті суми всіх пропускних здатностей, необхідних для кожної з послуг і становить 100 Мбіт/с . Кількість пакетів, що задіяні в процесі моделювання, встановлено рівною 50 000. За 1 мс встигає згенеруватись певна кількість пакетів. За кожний такий період визначається інтенсивність надходження пакетів λ=Кпак/1*10-3. Як результат, отримуємо випадковий процес інтенсивності надходження пакетів в часі.

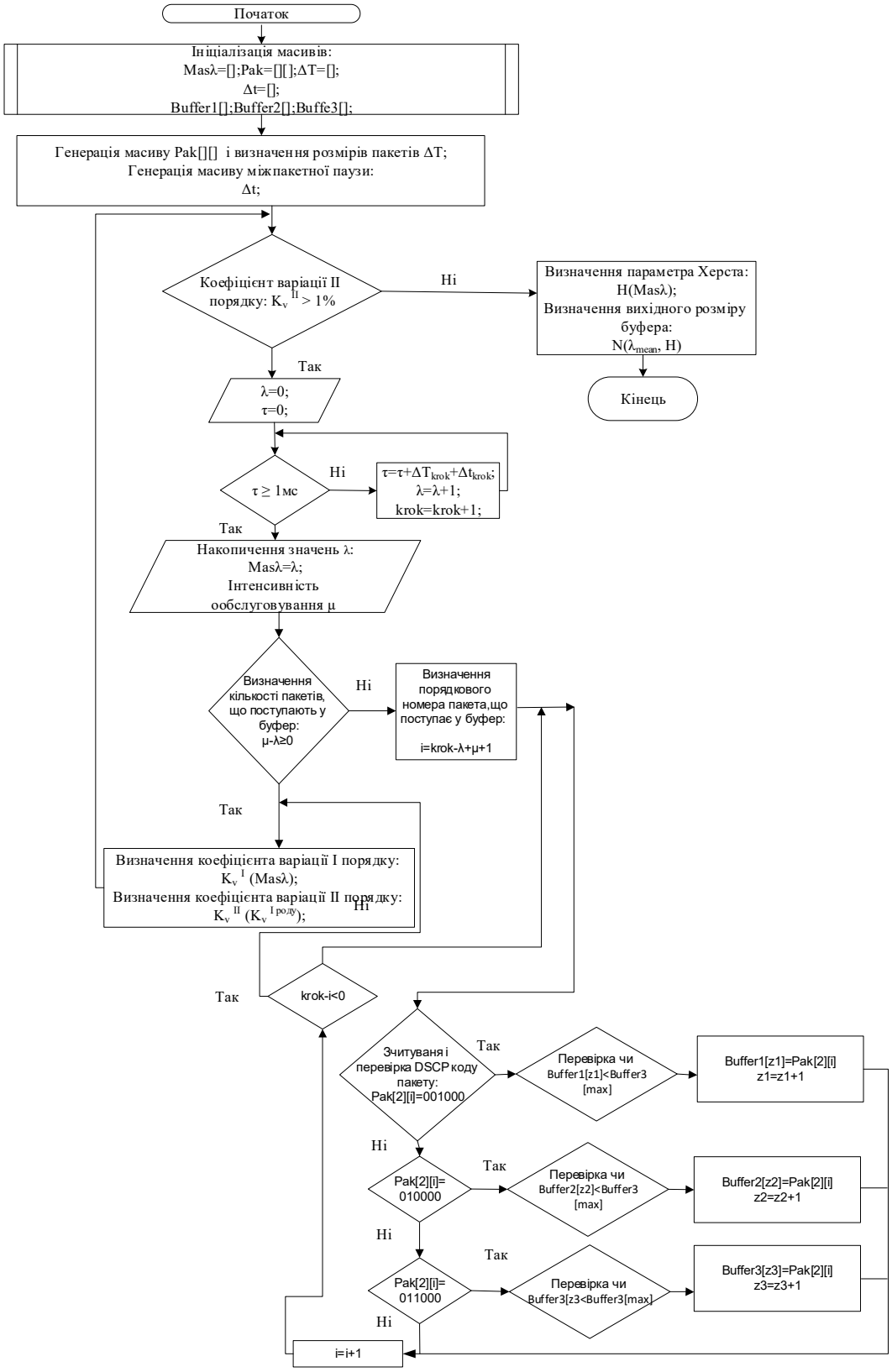


Рис.3.29. Блок схема алгоритму статистичного прогнозування розміру буфера та роботи класифікатора у маршрутизаторі при поступленні мультисервісного трафіку

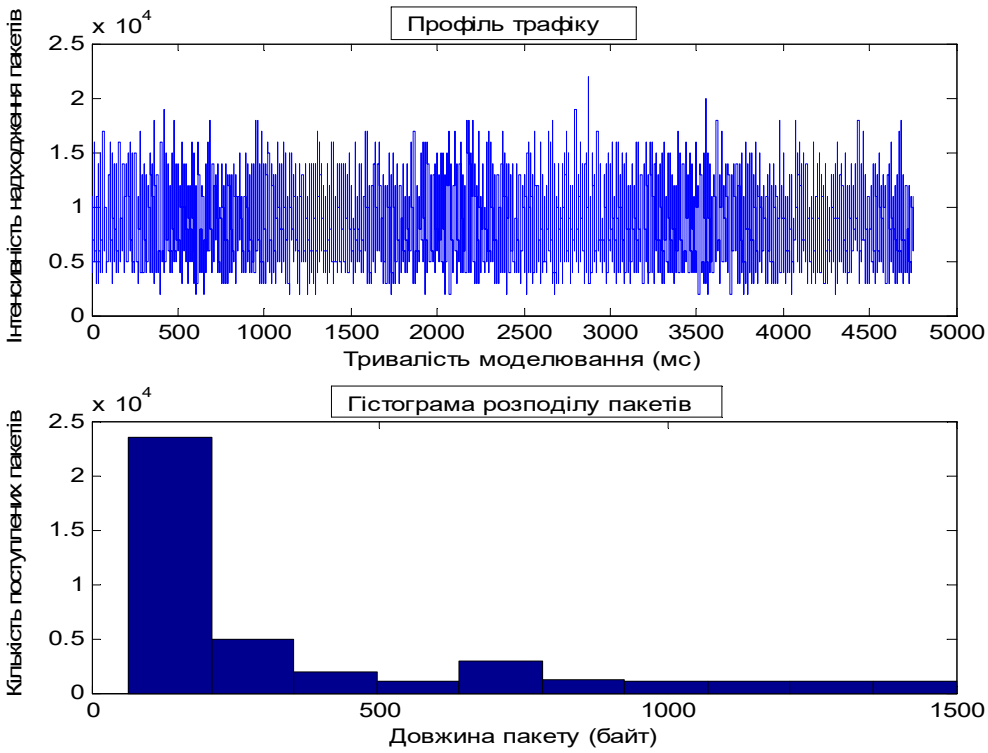


Рис.3.30. Профіль трафіку та гістограма розподілу пакетів по розміру

На рисунку 3.30 відображено профіль згенерованого вхідного мультисервісного трафіку та гістограму розподілу пакетів по довжинах з якого видно, що переважаючим трафіком є голосові потоки з малим розміром пакетів, які є чутливими до затримки обслуговування. На рисунку 3.31 - 3.33 показано результати оцінки ефективності застосування розроблених рішень стосовно забезпечення необхідного рівня якості обслуговування. Відповідно проводилось моделювання та порівняння запропонованого алгоритму модифікованого CBWFQ із існуючим CBWFQ. Встановлено, що в умовах високої інтенсивності голосового потоку, сконфігуровані параметри для існуючого алгоритму CBWFQ є не достатніми, оскільки спостерігаються переповнення буфера голосового потоку вище встановленої межі. Це в свою чергу призводить до вимушеного відкидання пакетів згідного алгоритму WRED та виникнення значних втрат пакетів голосу, що вплине якість розмови користувачів в NGN мережах [36].

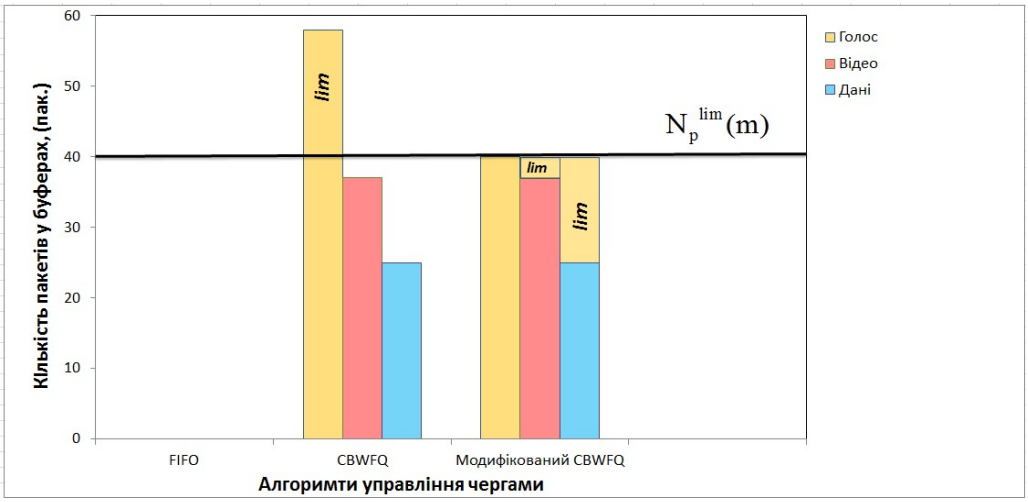


Рис.3.31. Кількість пакетів у буфері протягом моделювання для двох алгоритмів

Внаслідок застосування удосконаленого алгоритму та із використанням вище запропонованої моделі обслуговування, зменшується кількість пакетів у буфері голосового потоку до допустимого значення. А прострочені пакети надсилаються у вільно доступні черги нижчої пріоритетності із вищою пропускною зданістю, що в свою чергу призводить до зменшення втрат та середньої затримки обслуговування у вузлі NGN мережі у 2 рази (рис.3.32-рис.3.33).

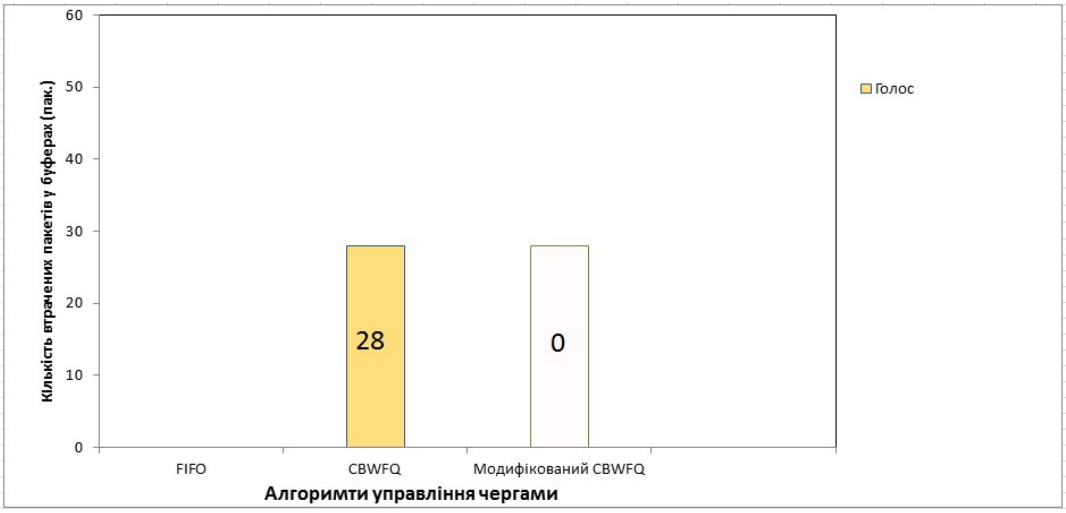


Рис.3.32. Порівняння кількості втрачених пакетів за умови переповнення черг

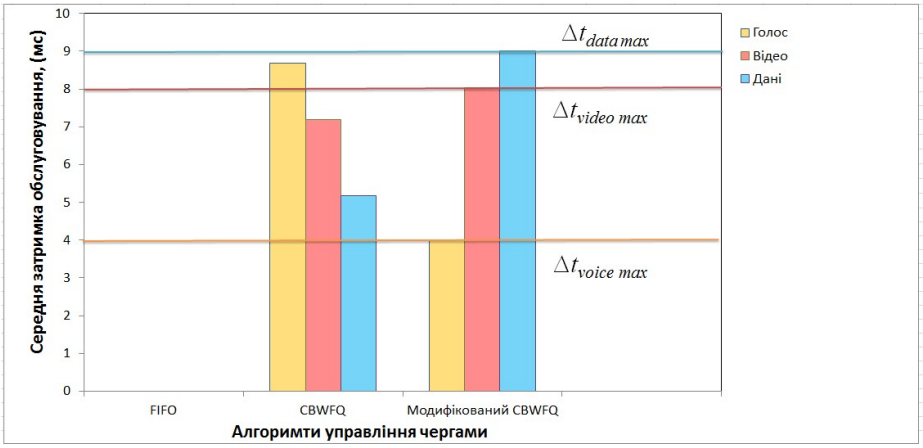


Рис.3.33. Порівняння середньої затримки обслуговування модифікованого алгоритму CBWFQ із існуючим CBWFQ

На практиці застосування запропонованого модифікованого алгоритму обслуговування черг у мережевих вузлах NGN мережі, дасть змогу зменшити тривалість оброблення пакетів та ймовірність втрат даних потоку реального часу із високим пріоритетом не погіршуючи якості низькопріоритетним .

На рисунку 3.34 зображено схему мультисервісної мережі оператора із системою моніторингу функціонування мережі, у якій в моменти високої інтенсивності навантаження спостерігається погіршення якості обслуговування.

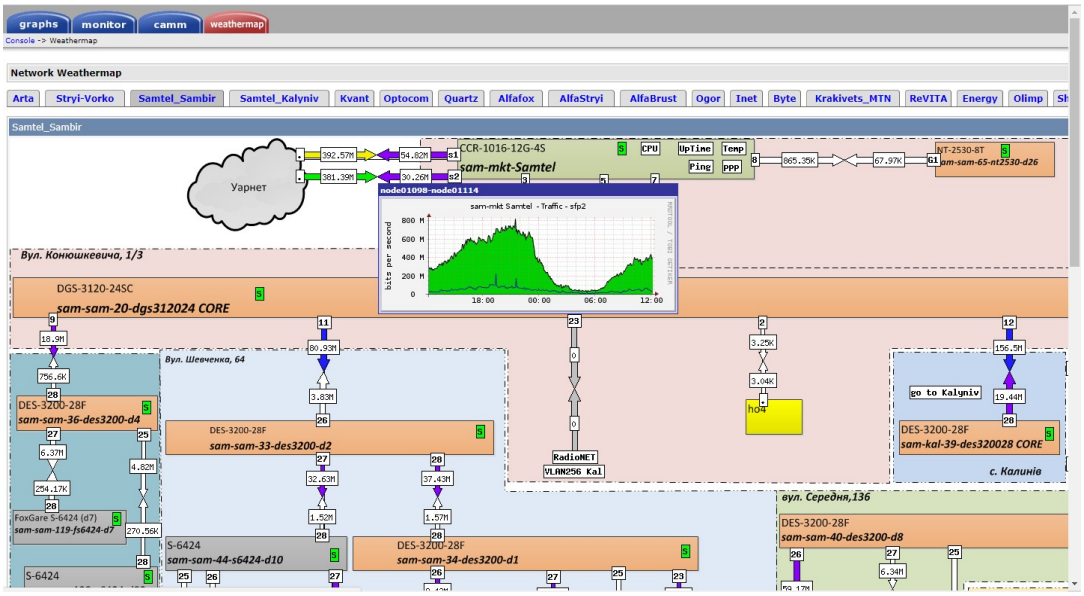


Рис.3.34. Система моніторингу функціонування мультисервісної телекомунікаційної мережі

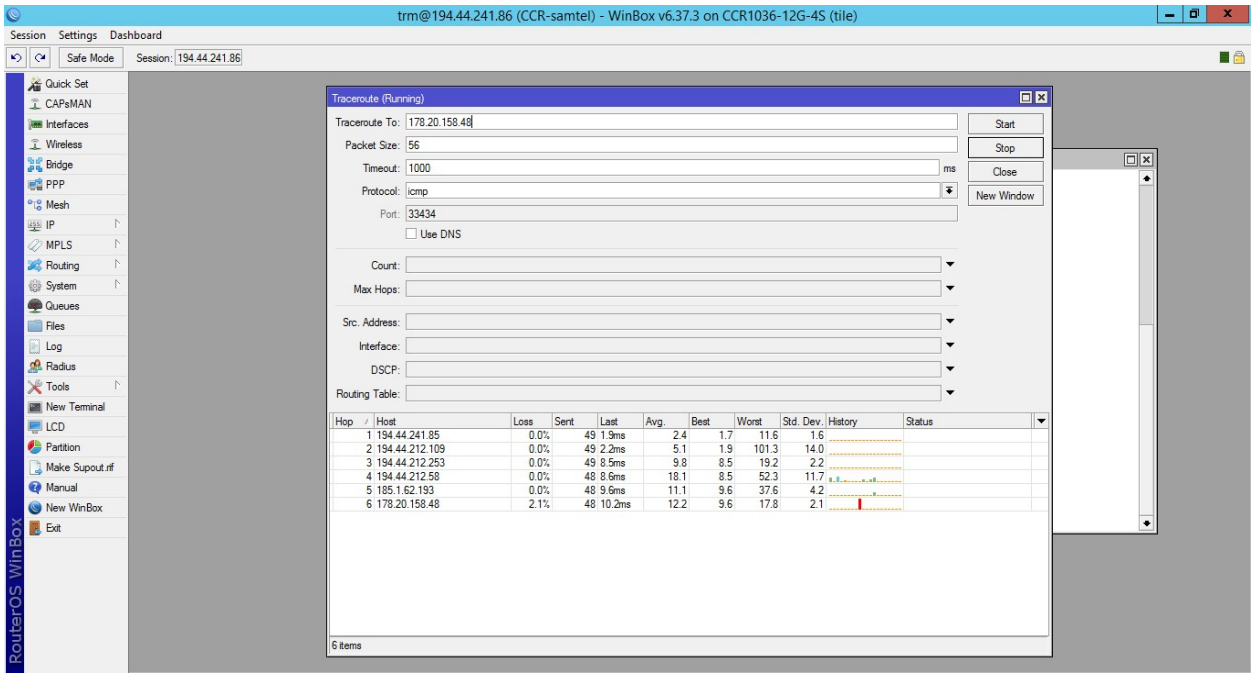


Рис.3.35. Система моніторингу функціонування мультисервісної телекомунікаційної мережі

На рисунку 3.35 проведено результат оцінки тривалості оброблення пакетів маршрутизатора рівня ядра, щляхом пінгування від сервера, на якому встановлена система моніторингу, внаслідок спостерігається затримка, що перевищує 10,2 мс та 2% втрат пакетів, що при передаванні потоків реального часу є не допустимим, якщо на шляху до адресата стоять аналогічні вузли з однотипним навантаження та кількість їх перевищує 10. Отже, забезпечити гарантовану якість потоків реального часу в даній мережі при кількості хопів більше 10 із застосуванням існуючих алгоритмів CBWFQ є неможливим, що підтверджує доцільність впровадження у NGN мережах запропонованих рішень, розглянутих у дисертаційній роботі.

Висновки до 3-го розділу

1. На основі аналізу методів об'єктивної оцінки якості передавання відео в IP-мережах виявлено низку недоліків, які не дозволяють використовувати

розглянуті методи в якості основних при оцінці якості відео в реальному часі і запобіганні збоїв у мовленні і трансляціях.

2. Отже, для якісного надання послуг Triple Play необхідно, щоб показники якості задовольняли вимогам, що пред'являються при передаванні даного виду трафіку. Імітаційна модель підтвердила необхідність використання механізмів надання гарантованої якості. Аналіз графіків, отриманих в результаті моделювання, показав, що найкращим механізмом надання гарантованої якості обслуговування є Int-DiffServ .

4. Проведено дослідження основних параметрів трафіку мультисервісної мережі НУ “ЛП”, визначено ступінь самоподібності трафіка за допомогою RS методики, оцінивши параметр Херста, який становить 0,639. Для перевірки адекватності підбору теоретичного закону розподілу відповідно до визначеного експериментальним шляхом використано статистичні критерії узгодженості Колмагорова, Пірсона та Колмогорова-Смірнова, за якими найбільш підходящим є показниковий закон розподілу.

5. Визначено узагальнену математичну модель системи масового обслуговування, по якій проведено оцінку якісних показників мережевих потоків. Розроблено алгоритм побудови імітаційної моделі вхідного трафіку, характеристики якої наближаються до характеристик реальних потоків даних.

6. Розроблено імітаційну модель мережевого пристрою з реалізацією удосконаленого алгоритму обслуговування інформаційних потоків. Шляхом імітаційного моделювання оцінено виграш за кількісними та часовими параметрами якості обслуговування у порівнянні із відомим алгоритмом.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ З ВІРТУАЛІЗАЦІЄЮ МАРШРУТИЗАТОРІВ

4.1 Моделювання системи обслуговування потоків даних в мультисервісних вузлах мережі із використанням механізмів віртуалізації

Найпотужнішим універсальним методом дослідження та оцінювання ефективності різних систем, включно з процесом обслуговування потоків зі змінною поведінкою, яка залежить від дії випадкових чинників, в мультисервісних вузлах мережі є моделювання.

Враховуючи головне цільове завдання теорії, концепцію моделювання процесів роботи систем, характеристики, прийняті для опису ресурсів, інформаційно-телекомунікаційну систему, в ролі об’єкта теоретичних досліджень можна описати як об’єднання співзалежних систем масового обслуговування (СМО), які поділяються на шість видів (ресурси пам’яті, ресурси обчислень, ресурси транспортування інформації, ресурси пошуку адреси, ресурси розпізнавання та ресурси відображення інформації) з відповідними потоками заяв на обслуговування для кожного з типів СМО.

Під час роботи системи в багатозадачному режимі, потоки заяв регулярно формуються функціональними задачами розподіленої системи, які включені в оперативний режим або у пакети завдань.

Відповідно до теорії, досліджувати якість роботи систем і синтезувати їх оптимальну структуру можна на базі представлення інформаційно-телекомунікаційної системи як СМО. Однак перед дослідженням системи загалом потрібно врахувати систематичний виклад засад моделювання її складових.

Оцінка якості та оптимізації розподілених інформаційно-обчислювальних систем (в нашому випадку розподілені віртуальні роутери) відбувається за

допомогою математичної (аналітичної) і програмної (імітаційної) моделей, а також застосовуються методи експериментальних досліджень.

Якщо порівнювати з аналітичним моделюванням, то більшу частину обмежень, які пов'язані з можливостями відтворення в моделях реальних процесів роботи досліджуваної системи знімає імітаційне моделювання. В даному випадку дослід підлягає маршрутизатор мультисервісної мережі, в якому розгортаються віртуальні роутери. При використанні імітаційного моделювання з'являється можливість відображення динамічної взаємної обумовленості поточних і подальших подій та комплексної співзалежності між показниками та параметрами ефективності системи. В деяких випадках імітаційні моделі не такі стислі, як аналітичні моделі, проте є можливість максимально наблизити їх до реальних систем, які моделюються, а також зробити простішими для використання у дослідженні. Такі підходи моделювання дають можливість використання імітаційних моделей як універсальних засобів для прийняття конкретних рішень при умові невизначеності, враховуючи те, що в моделях існують чинники, які не підлягають формалізації та використанню основних принципів системного підходу для вирішення практичних завдань в інформаційно-телекомунікаційних системах [166-169].

Опис складових реальних систем обслуговування інформаційних потоків в імітаційній моделі складається з певного логіко-математичного характеру, який містить в собі алгоритми, які відтворюють роботу маршрутизатора в мультисервісній мережі. Програма моделі, яка будується базуючись на даних алгоритмах, дає можливість спростити імітаційне моделювання до виконання експериментів на електронній обчислювальній машині. Відбувається «прогін» на певній множині вхідних даних, які відтворюють первинні події в системі. Отримана та зафіксована в процесі дослідження і моделювання інформація сприяє успішному визначенню та порівнянню показників, що характеризують ефективність функціонування маршрутизатора при умові стандартної роботи та

за використання рекомендованого методу віртуалізації ресурсів маршрутизатора під час розгортання на одному фізичному роутері декількох віртуальних, в яких структурні параметри є адаптованими до гарантованого забезпечення вимог QoS інформаційних потоків даних [112]. Під час моделювання процесів функціонування маршрутизатора використовуються рекомендовані моделі динамічного і статичного реконфігурування ресурсів маршрутизатора з метою зіставлення стандартного режиму обробки пакетів за порядковістю черги fifo з ефективністю роботи маршрутизатора.

4.1.1 Моделювання та порівняння системи обслуговування інформаційних потоків з динамічною реконфігурацією ресурсів маршрутизатора та обробкою пакетів за порядком черги fifo

Імітаційне моделювання запропонованої моделі, в якій використано статичну віртуалізацію ресурсів маршрутизатора, проведене для того, щоб перевірити рекомендовані в другому розділі технічні рішення для підвищення та забезпечення гарантованого рівня якості обслуговування інформаційних потоків в мультисервісній мережі. Під час моделювання використовувалась розроблена модель пакетного маршрутизатора без віртуалізації та з віртуалізацією ресурсів. Конфігурація моделі при умові, коли три окремі віртуальні маршрутизатори, які функціонують без взаємної залежності, виконуючи обслуговування тільки потоків свого класу для яких існує необхідність в забезпеченні допустимих значень QoS, розгортаються на одному фізичному маршрутизаторі. При моделюванні згенеровано такі послуги як голос, відео і дані, кожна з яких охарактеризована власним допустимим показником якості обслуговування відповідно до рекомендацій ITU-T. Окрім того, в моделі враховано, що під час розгортання віртуальних маршрутизаторів аналогічно, як і під час розгортання віртуальних машин загальний ресурс RAM, буферної пам’яті та CPU ділиться відповідно до кількості виділених окремих

машин (в даному випадку маршрутизаторів) [125], а також залежить від статичних конфігурацій пропорцій, які надані для використання ресурсів. Також, в моделі порівняно результативність маршрутизатора з витратою часу на обслуговування пакету або часу, протягом якого був зайнятий процесорний ресурс. Враховуючи те, що найвагомішим показником продуктивності вважається номінальна частота процесора маршрутизатора, наведено середній час, що витрачений на обслуговування пакетів взаємозалежний з CPU та відповідно до аналізу технічного паспорта виробників маршрутизаторів і подано цей час у таблиці 4.1.

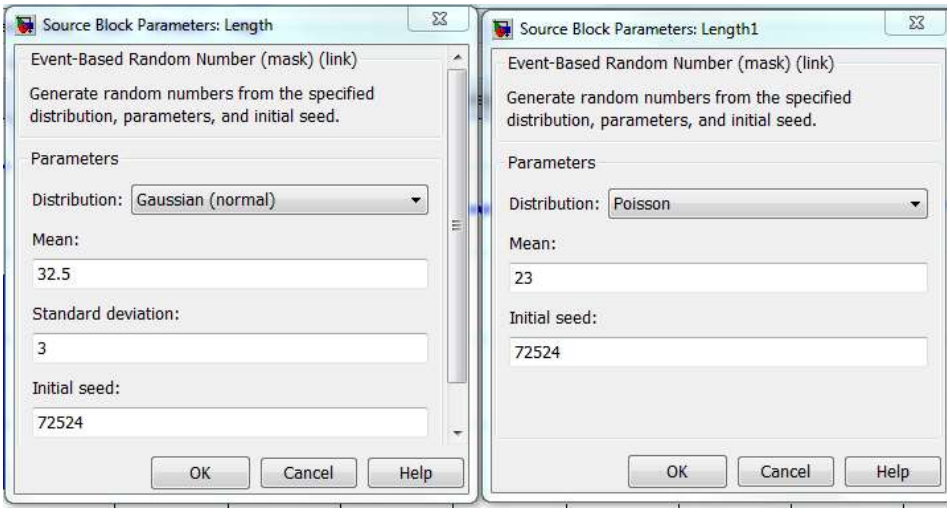
Таблиця 4.1.

Вплив процесорної частоти маршрутизатора на тривалість обробки пакетів

CPU-частота процесора маршрутизатора (Мгц)	Середній час обслуговування пакетів (мкс)
1400	10
850	20
650	25
450	35

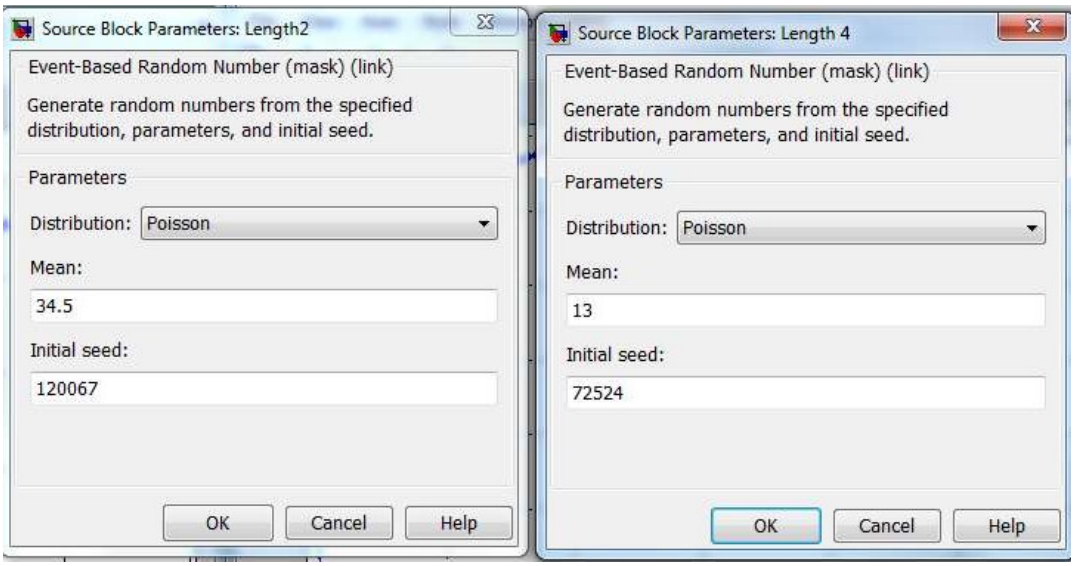
Тому, коли три окремі віртуальні маршрутизатори розгортаються на одному фізичному маршрутизаторі, отримано наступний розподіл ресурсів за умови статичного виділення (рис.4.2.-4.3.). Для того, щоб організувати динамічне виділення обчислювальних ресурсів у фізичному мережевому пристрої між віртуальними маршрутизаторами, потрібно зробити зміни в імітаційній моделі, а саме в блоках lenth замінити середні значення тривалостей обслуговування пакетів, які є залежними від номінальної частоти процесора. Взявши до уваги те, що відповідальний за голосову обробку пакетів віртуальний маршрутизатор не надавав забезпечення належним рівнем якості обслуговування за критеріями мінімальних затримок при статичному виділенні ресурсів, то застосувавши динамічне виділення можна досягнути збільшення для цієї машини віртуальної частоти процесора за допомогою блоку менеджера

ресурсів (тоді зменшиться середня тривалість перебування пакетів у віртуальних вузлах, адже збільшиться інтенсивність їх обслуговування). Практично це виконується за рахунок виділення більшого часу використання загального ресурсу процесора віртуальної машини. Отже, за рахунок змін віртуального часу застосування процесора в теорії можна отримати різні продуктивності віртуальних маршрутизаторів на одному мережевому пристрої, в якого є один фізичний процесор з частотою 1400 МГц. Ці продуктивності практично можуть відповідати продуктивностям маршрутизатора з різними номінальними частотами процесора, такими як 240 МГц, 350 МГц, 760 МГц (рис.4.26-4.27). Відповідно, віртуалізація надає змогу забезпечити продуктивність віртуальних маршрутизаторів, яку практично можна зрівнювати з продуктивністю невіртуалізованного маршрутизатора з меншою частотою процесора. Такі можливості дають віртуалізації можливості практичного застосування і збільшують шанси на широке використання в телекомунікаційних мережах в майбутньому [31].



а) б)

Рис.4.2. Час обслуговування 32.5 мкс - маршрутизатор 1 CPU-350 Мгц а),час обслуговування 23 мкс - маршрутизатор 2 CPU-760 Мгц б)



в) г)

Рис.4.3. Час обслуговування 34.5 мкс -маршрутизатор 3 CPU-240 Мгц в), час обслуговування 13 мкс -маршрутизатор 4 (без віртуалізації) CPU-1400 Мгц).

На рисунках 4.4-4.7 наведені діаграми завантаження кожного віртуального маршрутизатора в залежності від інтенсивності вхідного потоку при динамічному виділенні обчислювальних ресурсів маршрутизатора.

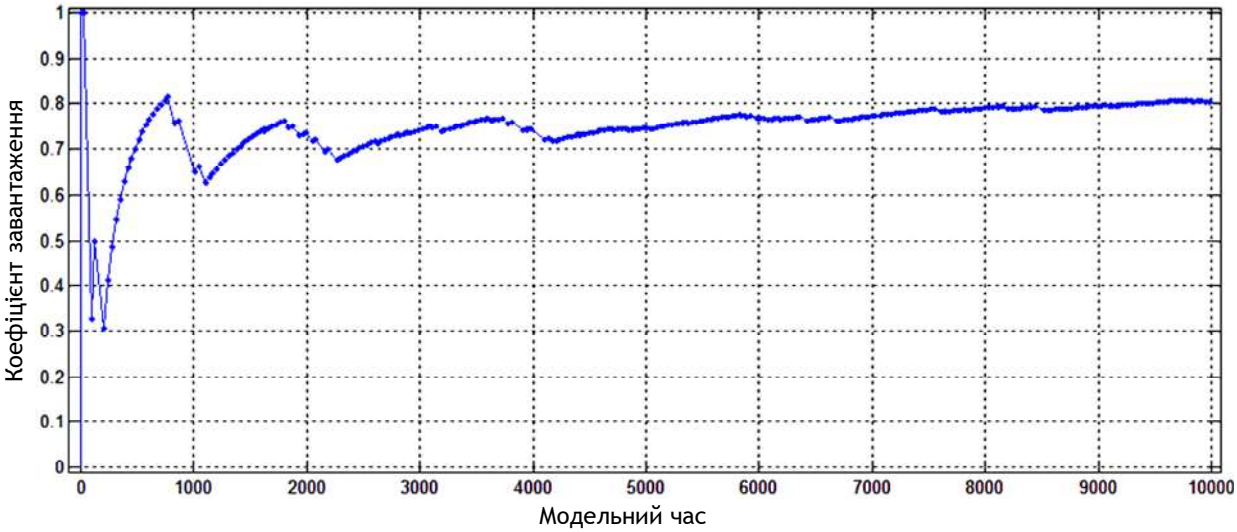


Рис.4.4. Завантаження віртуального обслуговуючого пристрою відео потоками

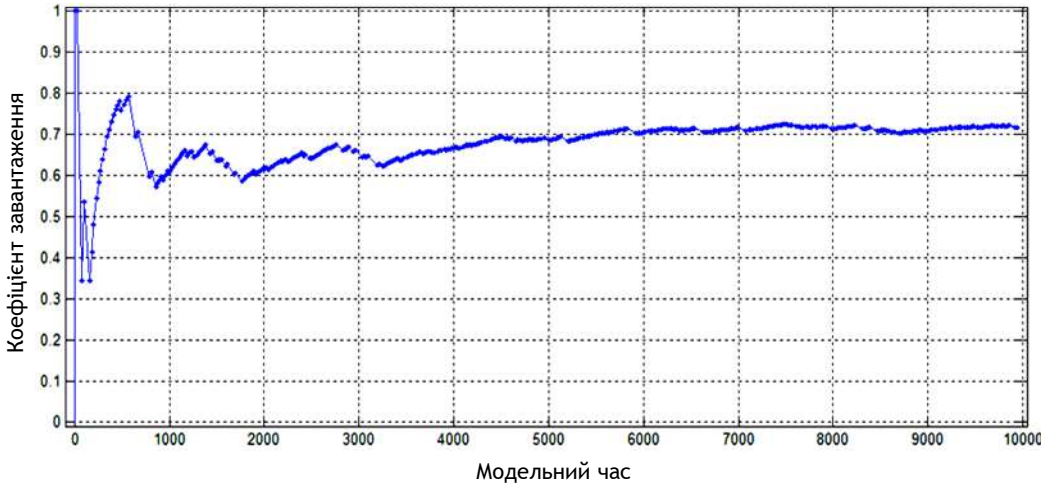


Рис.4.5. Завантаження віртуального обслуговуючого пристрою голосовими потоками

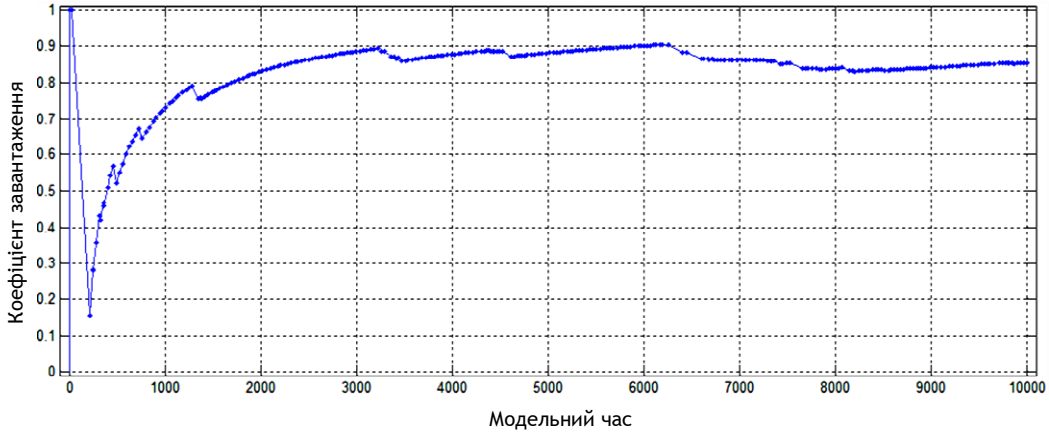


Рис.4.6. Завантаження віртуального обслуговуючого пристрою потоками даних

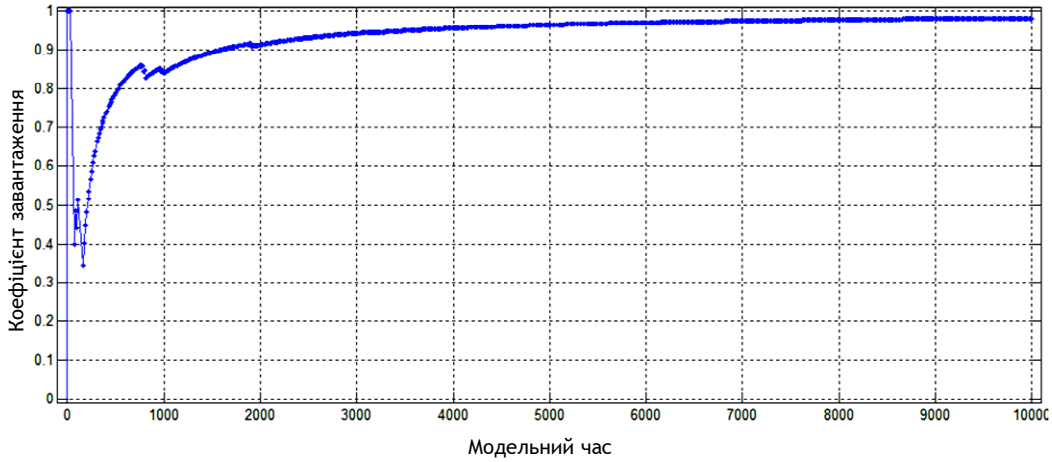


Рис.4.7. Завантаження обслуговуючого пристрою фізичного маршрутизатора потоками Triple Play

Рис. 4.5 демонструє, що коефіцієнт завантаження віртуального мережевого пристрою під час обслуговування голосового потоку зменшився від 0.9 (при статичній віртуалізації) до 0.7 (при динамічній віртуалізації) . Це можна пояснити тим, що в процесі динамічного розподілу обчислювальних ресурсів за рахунок виділення більшої частоти зросла продуктивність віртуального маршрутизатора. Таким чином, це призводить до зменшення продуктивності віртуального маршрутизатора, призначеного для трафіку даних. Оскільки, при одному і тому ж навантаженні на обслуговуючий пристрій віртуального маршрутизатора (потоку даних) виділена частота процесора при динамічній віртуалізації є меншою в порівнянні із статичною. Тому, коефіцієнт завантаження віртуального маршрутизатора в процесі оброблення трафіку даних збільшився від 0.75 до 0.85.

Вплив завантаженості буферів віртуальних маршрутизаторів відображено на рис. 4.8-4.11 в умовах динамічної віртуалізації та без віртуалізації маршрутизатора.

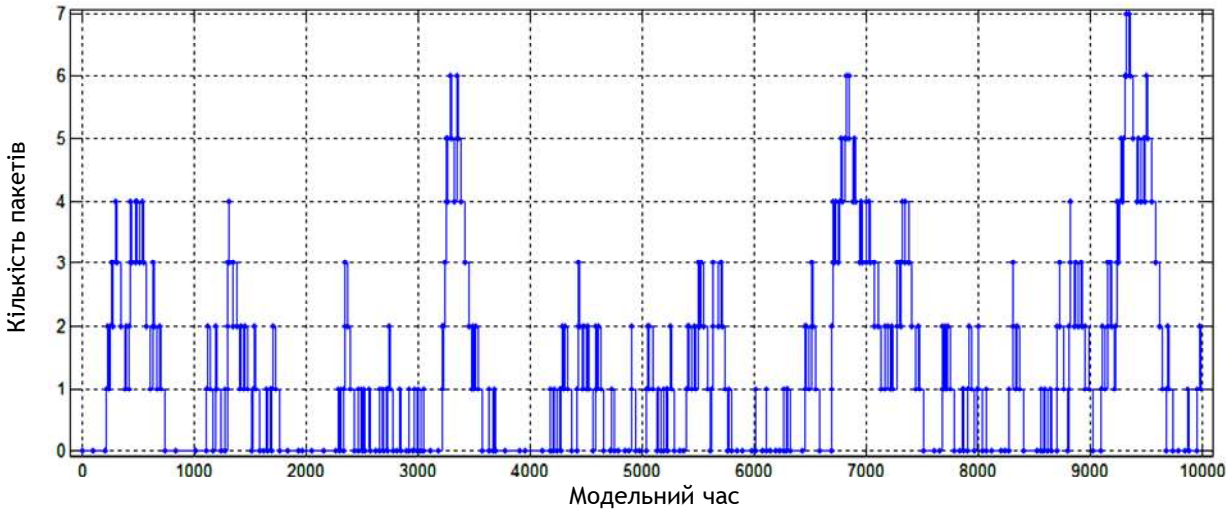


Рис.4.8. Завантаження буфера віртуального маршрутизатора потоками відео

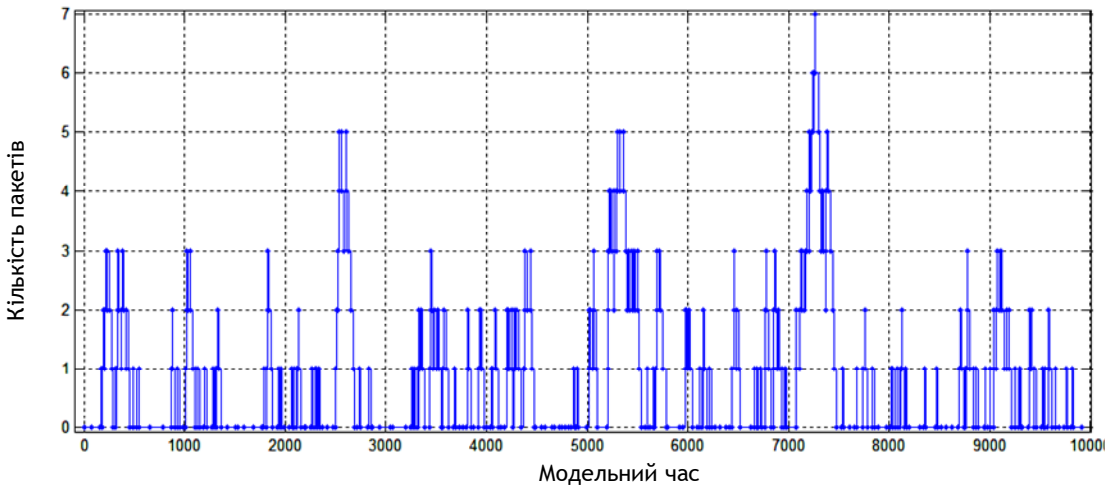


Рис.4.9. Завантаження буфера віртуального маршрутизатора потоками голосу

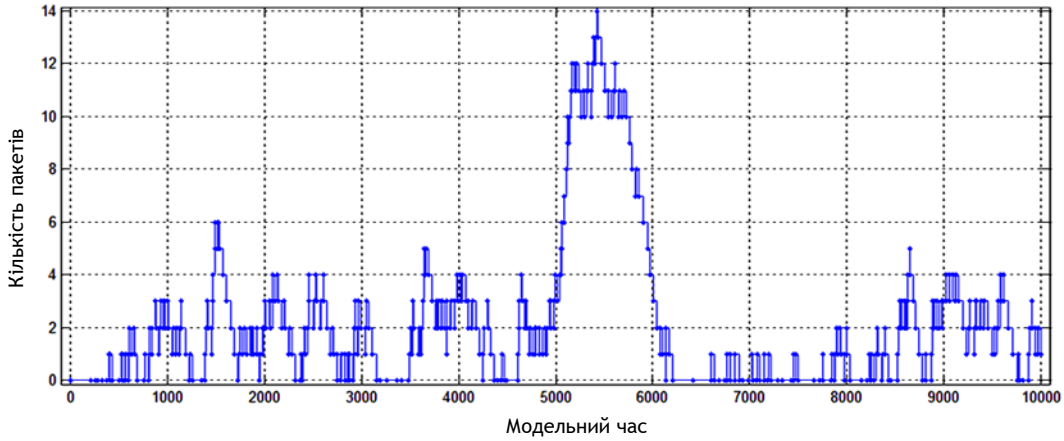


Рис.4.10. Завантаження буфера віртуального маршрутизатора потоками даних

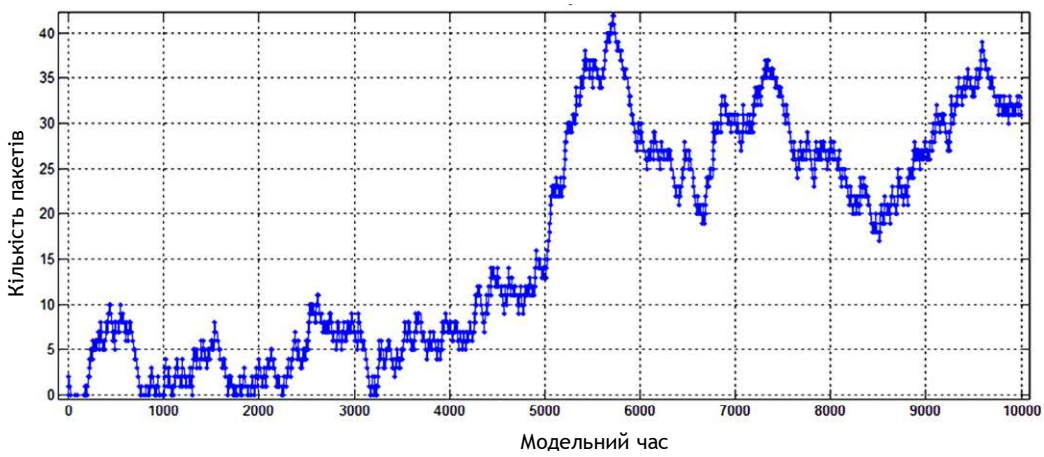


Рис.4.11. Завантаження буфера фізичного маршрутизатора потоками Triple Play

З отриманих результатів моделювання видно, що середня кількість пакетів у буфері віртуального маршрутизатора, призначеного для

обслуговування голосового трафіку, зменшилась від 6 до 3 (рис.4.9). Це можна пояснити тим, що збільшилась інтенсивність обслуговування пакетів трафіку голосу віртуальним маршрутизатором. Проте для двох інших віртуальних маршрутизаторів призначених для трафіку даних та відео середня кількість пакетів у буфері зросла на 2-3 пакети. Тривалість затримки буферизації показано на рис.4.12-4.15.

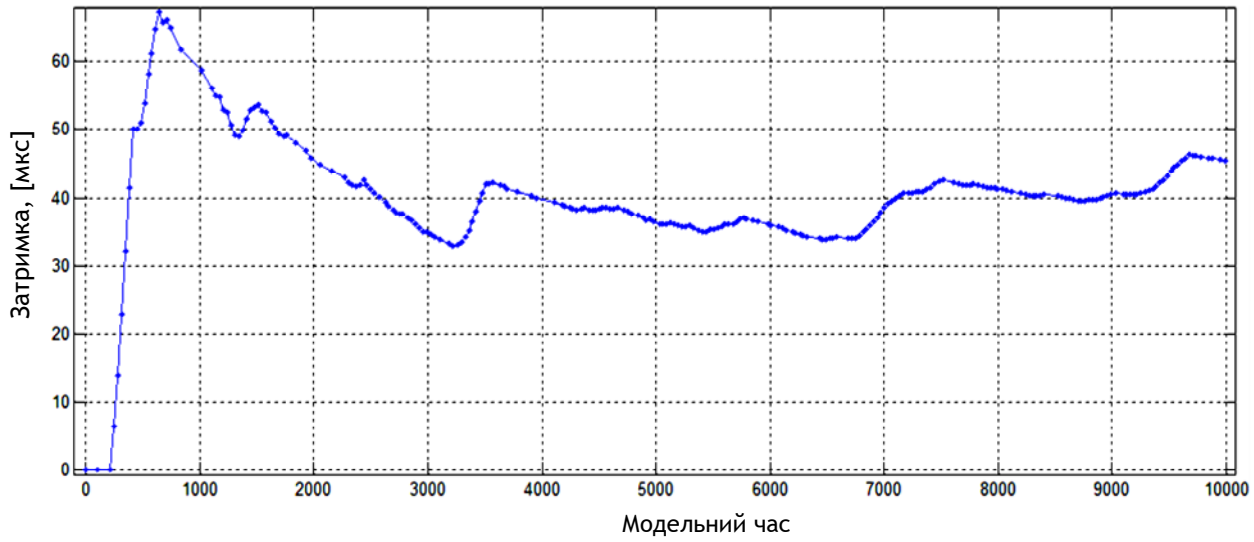


Рис.4.12. Затримка буферизації віртуального маршрутизатора при обслуговуванні відео потоку

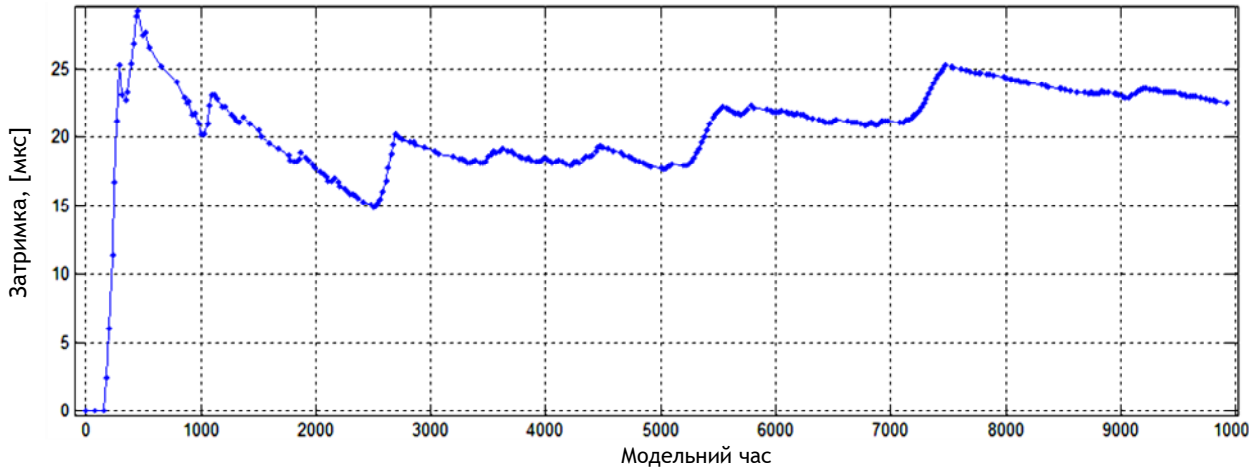


Рис.4.13. Затримка буферизації віртуального маршрутизатора при обслуговуванні голосового потоку

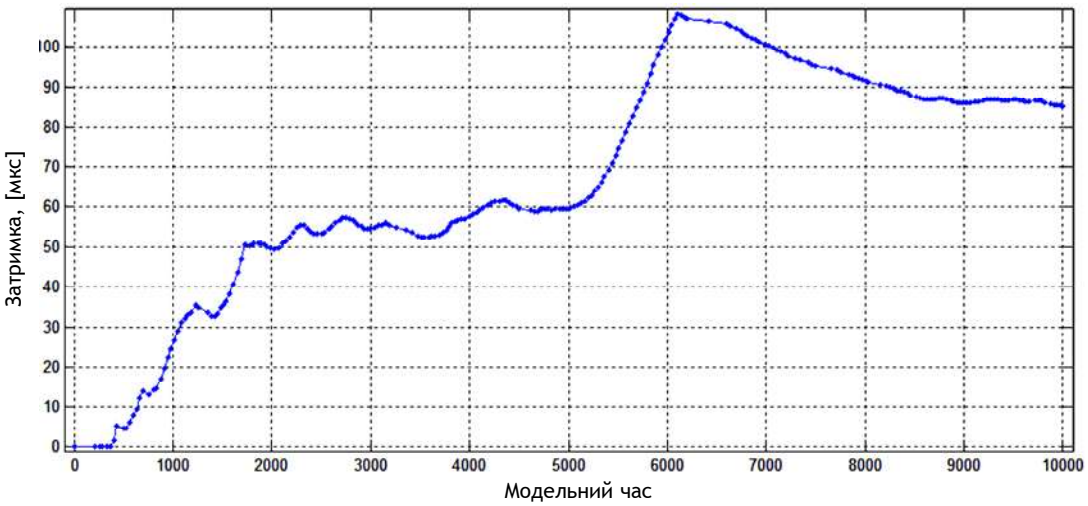


Рис.4.14. Затримка буферизації віртуального маршрутизатора при обслуговуванні потоку даних

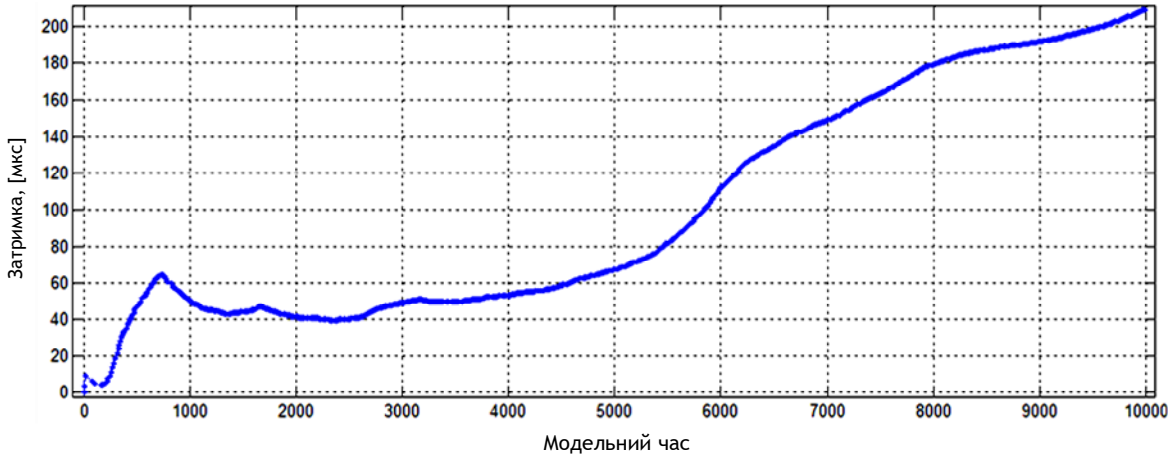


Рис.4.15. Затримка буферизації фізичного маршрутизатора при обслуговуванні агрегованого потоку

Розглянувши результати моделювання можна побачити, що середнє значення затримки буферизації голосового трафіку зменшилось від 75 мкс до 25 мкс. Затримка буферизації у порівнянні з статичною віртуалізацією на інших двох віртуальних маршрутизаторах збільшилась в межах допустимих значень.

Сума процесорної та інтерфейсної затримки пакетів віртуального маршрутизатора при обслуговуванні відео потоку показана на рис.4.16-4.18.

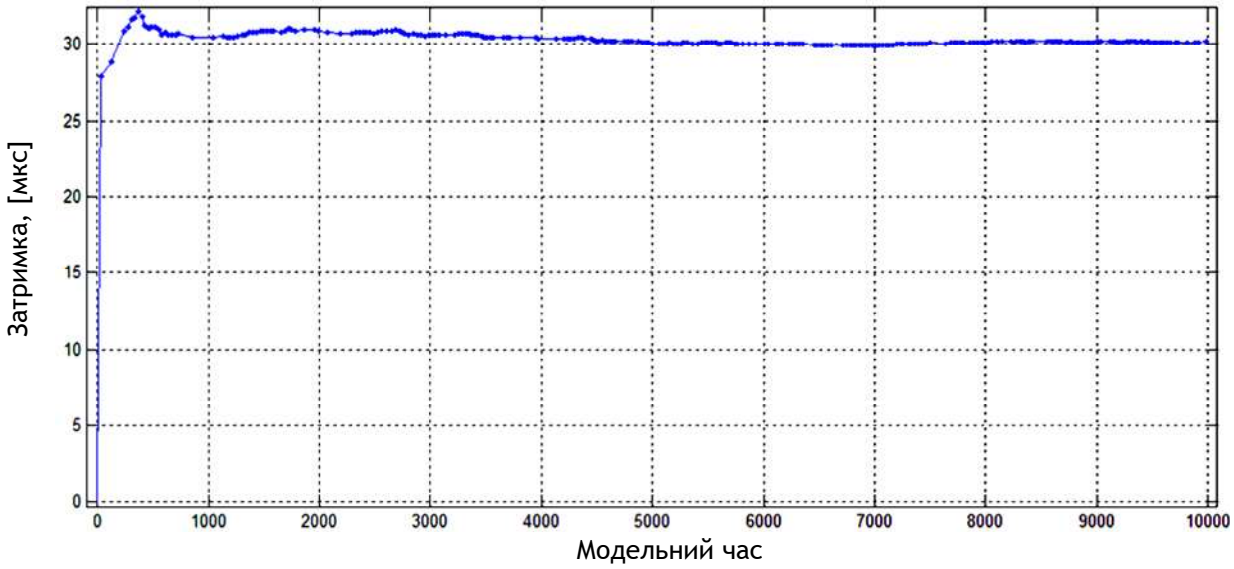


Рис.4.16. Сума процесорної та інтерфейсної затримки пакетів віртуального маршрутизатора при обслуговуванні відео потоку

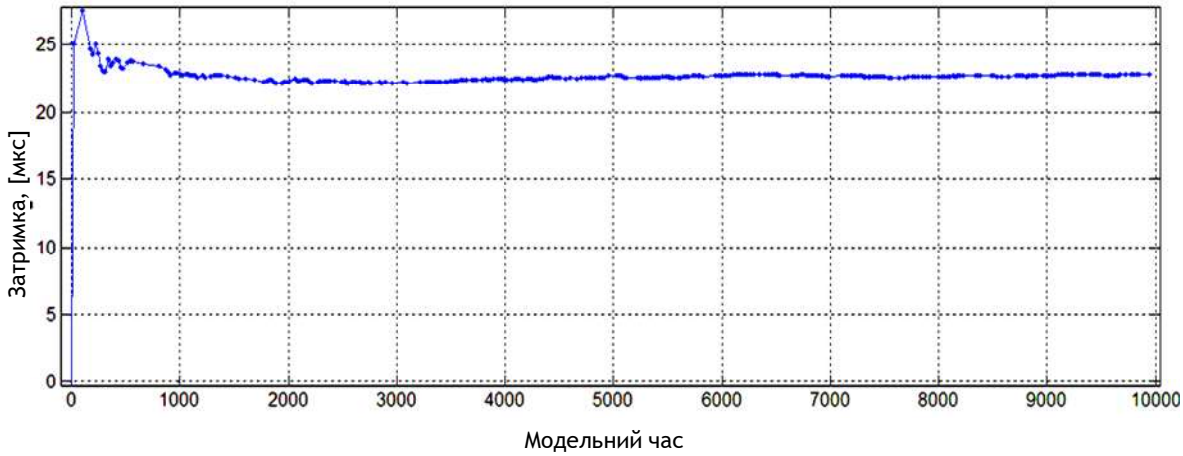


Рис.4.17. Сума процесорної та інтерфейсної затримки пакетів віртуального маршрутизатора при обслуговуванні голосового потоку

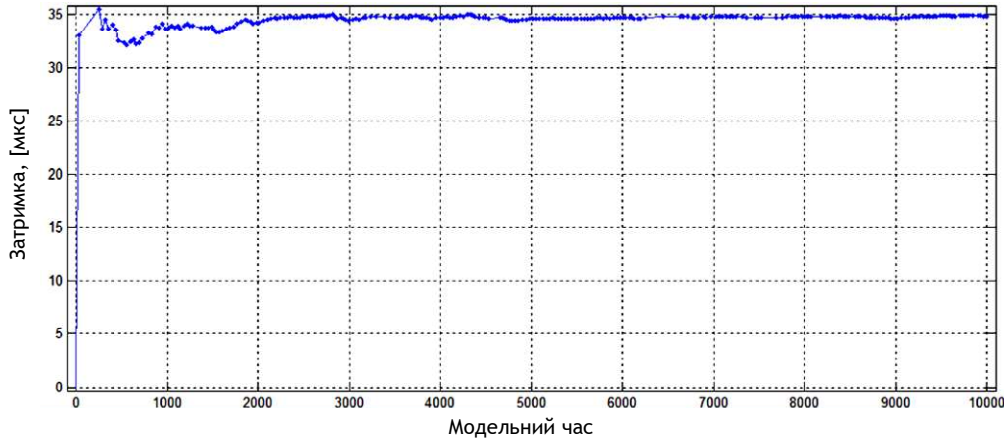


Рис.4.18. Сума процесорної та інтерфейсної затримки пакетів віртуального маршрутизатора при обслуговуванні потоку даних

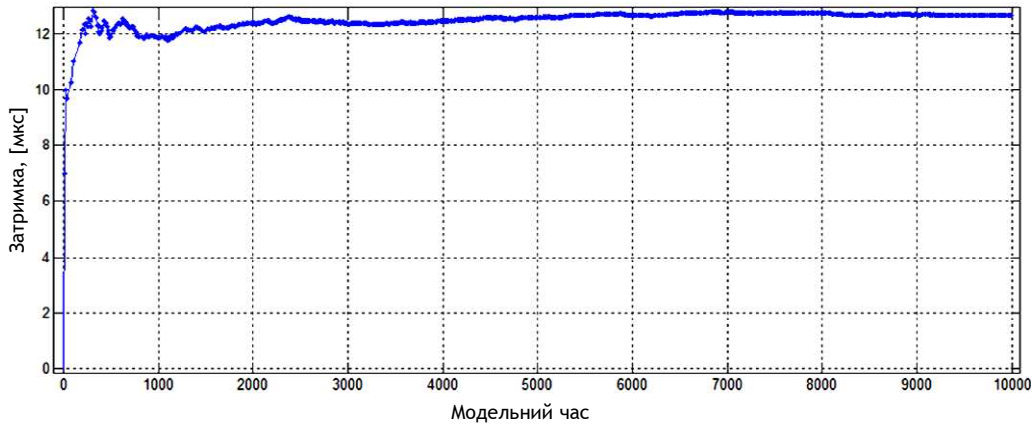


Рис.4.19. Сума процесорної та інтерфейсної затримки пакетів фізичного маршрутизатора при обслуговуванні агрегованого потоку

Порівняння результатів тривалості обслуговування пакетів послуг з динамічним розподілом обчислювальних ресурсів та обробкою пакетів за порядком черги FIFO в одному фізичному маршрутизаторі (рис.4.20).

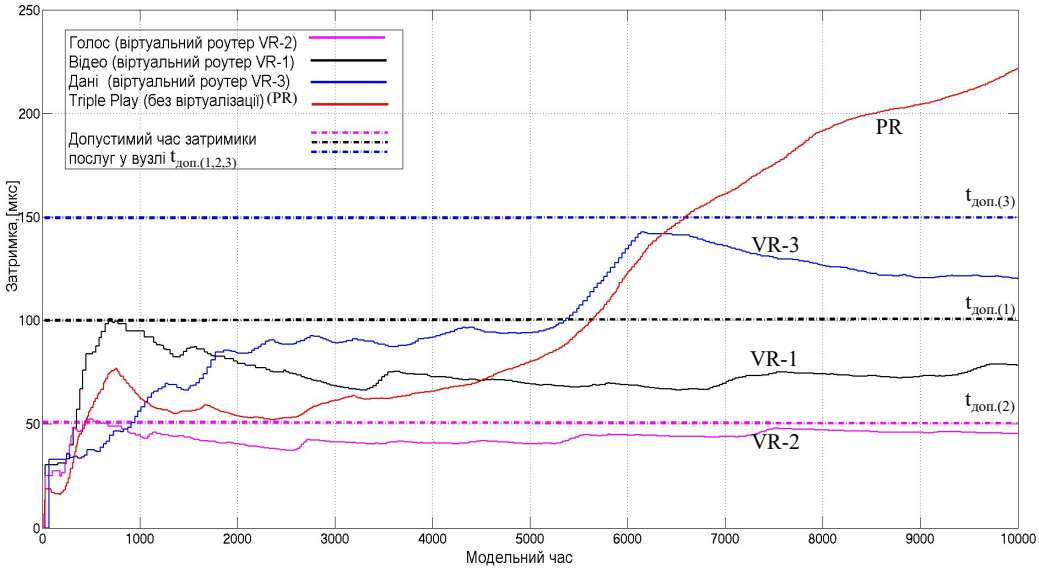


Рис.4.20. Порівняння тривалостей затримок пакетів в маршрутизаторі без віртуалізації та з динамічною віртуалізацією ресурсів мережевого пристрою

Після аналізу результатів видно, що тривалість затримок пакетів у всіх віртуальних вузлах з класовим призначенням не перевищує межі дозволених значень, за рахунок використання динамічного балансування обчислювальних ресурсів між ними. Тому керуючись отриманими результатами доведено, що під час динамічної віртуалізації мережевого пристрою гарантується належний рівень якості обслуговування всіх потоків, які передаються в даній мультисервісній мережі [32].

4.1.2 Моделювання систем обслуговування вхідних потоків з статичною і динамічною реконфігурацією ресурсів вузла та порівняння з пріоритетною обробкою пакетів

Наступним кроком моделювання є порівняння запропонованої технології віртуалізації мережевого пристрою із стандартним маршрутизатором, сконфігурованим за принципом пріоритетного обслуговування. Для цього дослідження в пропонованій імітаційній моделі блок *Fifo Queue4* в фізичному маршрутизаторі під номером 4 необхідно замінити на блок *Priority Queue,* використання якого в моделі забезпечить пріоритетне обслуговування

(рис.4.21) та інтегрувати нововведений блок менеджера динамічного управління ресурсами показаного на рис. 4.22.

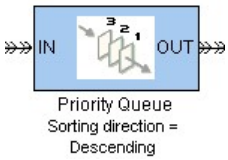


Рис.4.21.Блок пріоритетного обслуговування черг

Рис.4.22. Блок менеджера динамічного управління ресурсами

Відповідно в структурних блоках імітаційної моделі *Time-Based Entity Generator, Time-Based Entity Generator1, Time-Based Entity Generator2,* призначені для генерації послуг та відкривши їх у вікні *Generation event priority* необхідно надати пріоритет потоку, а саме для трафіку даних-1, відео-2 та голосу-3, де більше значення означає вищий пріоритет і обслуговуватиметься в першу чергу. Структурно-функціональна схема моделі маршрутизатора з віртуалізацією та фізичним маршрутизатором з пріоритетним обслуговуванням черг [32] показано на рис. 4.23.

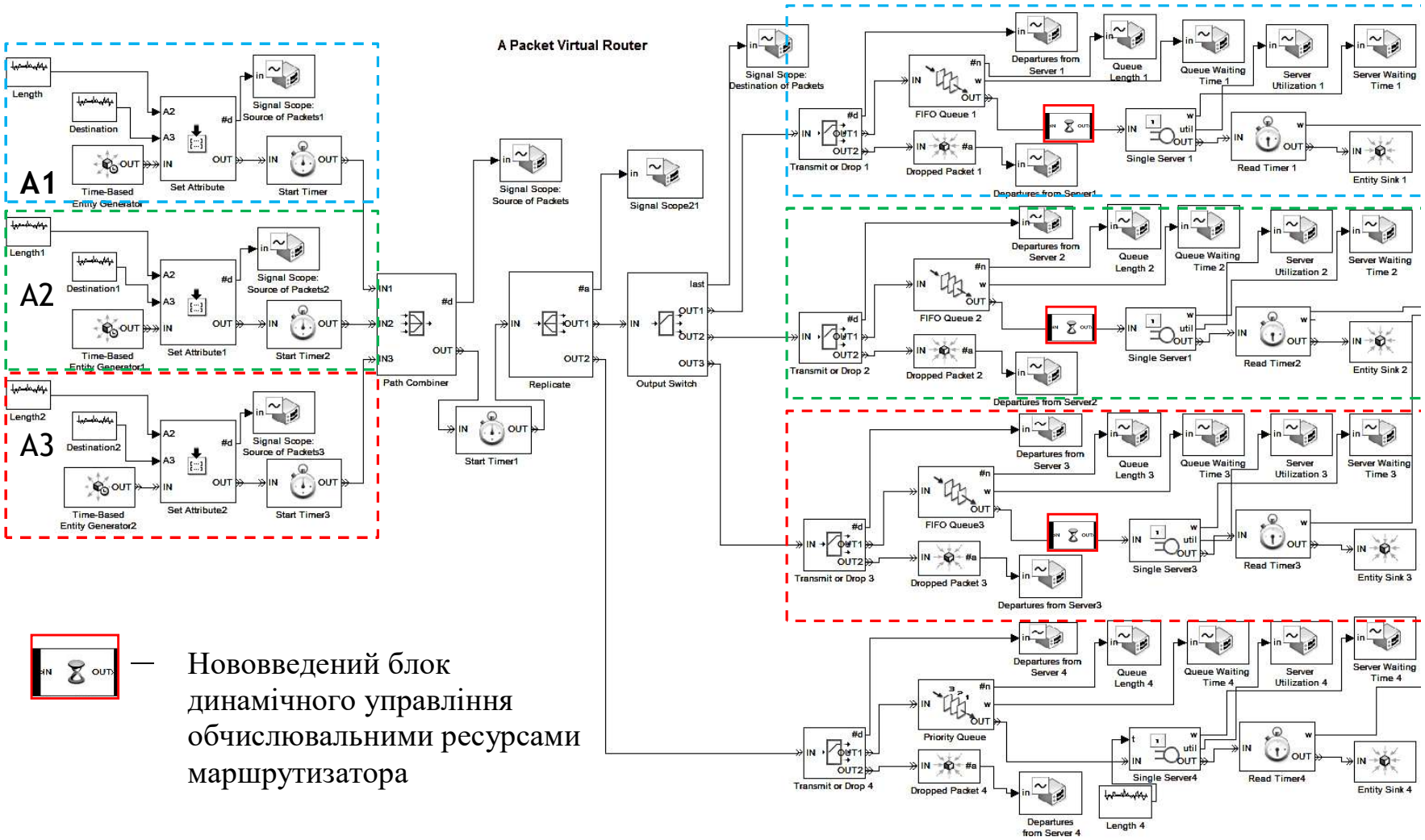


Рис.4.23. Структурно-функціональна схема моделі маршрутизатора із динамічною віртуалізацією ресурсів (1,2,3) та без віртуалізації з пріоритетною обробкою черг (4) [32]

В роботі наведено програмні коди для блоків *Schedule priority flow delay,* що відповідають за аналіз пріоритеів вхідних пакетів та їх розподіл по затримках пакетів. Порівняння тривалостей обслуговування пакетів в маршрутизаторі з використанням пріоритетів та із статичною віртуалізацією ресурсів мережевого пристрою показано на рис.4.24.

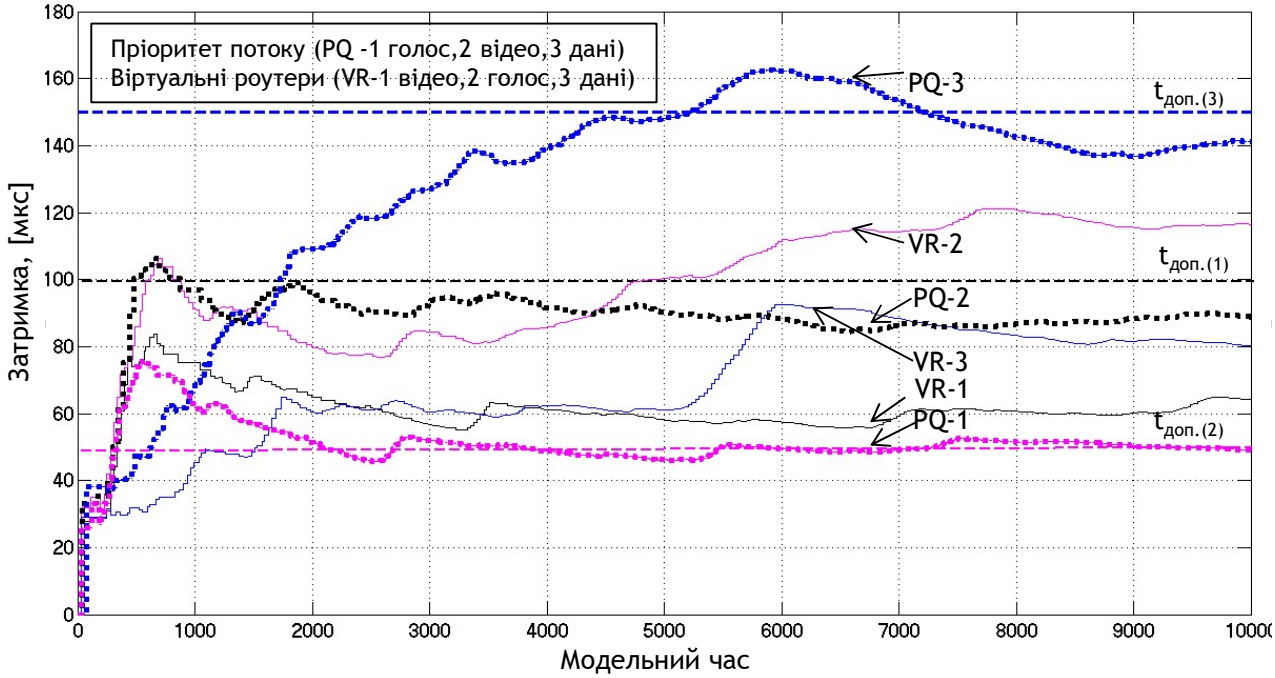


Рис.4.24. Порівняння тривалостей обслуговування пакетів в маршрутизаторі з пріоритезацією та з статичною віртуалізацією ресурсів мережевого пристрою [13]

Як бачимо у порівнянні з пріоритетним обслуговуванням пакетів, для статичної віртуалізації при голосовому потоці результат по затримці буде гіршим, оскільки під час пріоритетного обслуговування найвищим пріоритетом володіють пакети голосу та підлягають першочерговому обслуговуванню. Відповідно трафік даних та відео в певні моменти часу перевищують свої допустимі норми затримок і є значно більшими у порівнянні зі тривалістю обслуговування пакетів, яка забезпечується статичною віртуалізацією. Таким чином провівши моделювання та дослідження, встановлено, що жодна з описаних систем не гарантує достатню якість обслуговування потоків.

Наступним пунктом дослідження є порівняння результатів затримки пакетів послуг системи з динамічним розподілом ресурсів маршрутизатора (організація трьох віртуальних маршрутизаторів) та обслуговуванням пакетів за порядком пріоритетної черги PQ в одному стандартному маршрутизаторі (рис.4.25).

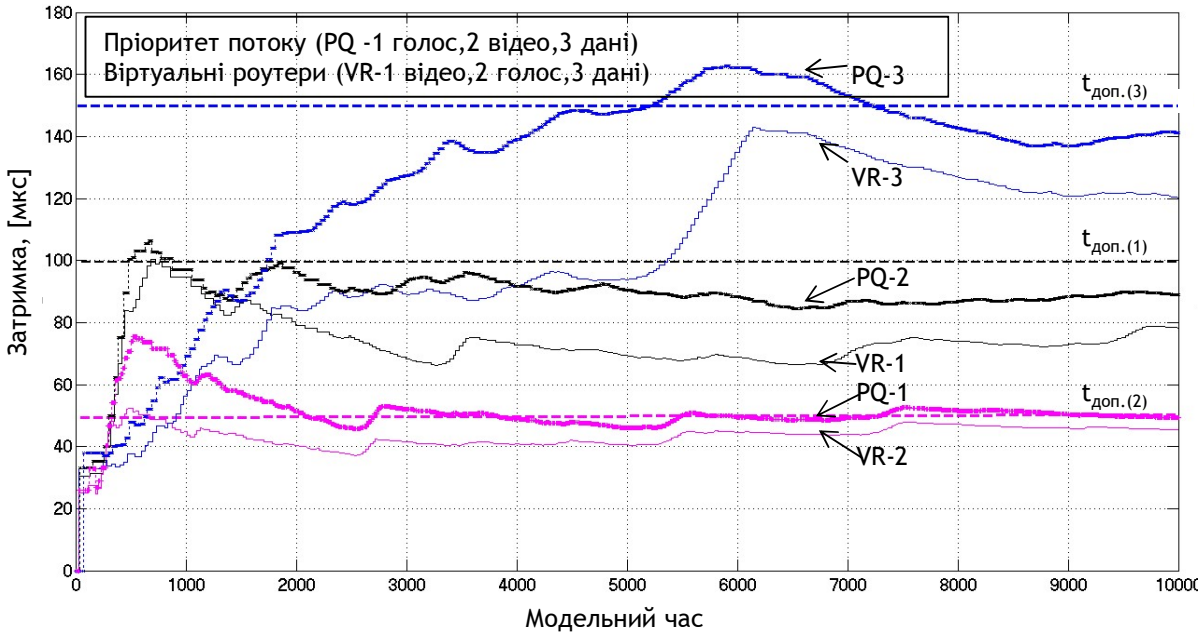


Рис.4.25. Порівняння тривалостей обслуговування пакетів в маршрутизаторі з пріоритезацією та з динамічною віртуалізацією ресурсів мережевого пристрою

Провівши моделювання, встановлено що система пріоритетного обслуговування інформаційних послуг не здатна забезпечити усім потокам гарантованого рівня QoS за критерієм мінімальної затримки та є менш ефективною у порівнянні із системою динамічної віртуалізації обчислювальних ресурсів мережевого пристрою.

4.2 Дослідження впливу методу управління структурними параметрами віртуальних маршрутизаторів на якість обслуговування потоків

В сучасних телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів особливого значення набули питання забезпечення якості обслуговування переданих потоків. В процесі передавання великого обсягу мультимедійних

даних з’являються негативні чинники, які можуть сприяти перевантаженню мережевих вузлів, збільшенню затримок та зростанню їх варіації. Це, в свою чергу, спричиняє зниження якості послуг, які отримує користувач. Розподільчі вузли, в яких виникають черги на обслуговування, здійснюють найбільший вплив на передавання даних, тому важливою задачею є визначення їх структурно - функціональних параметрів, які забезпечують необхідну якість обслуговування.

Доведено, що змінюючи такі структурні параметри системи розподілу інформації як довжина черги, швидкість шини та швидкість процесора можна взяти під керування якість обслуговування. Для вирішення цього в даній роботі розроблено імітаційну модель віртуального маршрутизатора. Дана модель дозволить проектантам керувати вибором оптимальних параметрів мережевого обладнання.

У моделі були враховані такі особливості мережевого пристрою: кожен пакет складається зі сталої службової частини (процесор проводив обробку лише її) та корисної частини, яка є змінною. У цьому випадку всі пакети, не важливо якої довжини, були опрацьовані процесором за рівні проміжки часу. На противагу такому випадку, витрачений на транспортування пакета по внутрішній шині пристрою час прямо пропорційно залежний від розміру пакета. Водночас були припущення, що тривалість записування і зчитування пакета в буфер є миттєвою.

При реалізації декількох віртуальних маршрутизаторів на одному фізичному є можливість гнучкого управління їх структурно функціональними параметрами. В попередніх роботах, присвячених дослідженню функціонування мережевих пристроїв з віртуалізацією, встановлено, що нелінійне зростання розміру буфера прямує до нескінченності, наближуючи продуктивність до одиниці та вказує на неможливість роботи системи із параметрами обслуговування, які рівні або менші інтенсивності поступлення. Основні структурно-функціональні віртуальні вузли обслуговуваного пристрою

реалізовано в імітаційній моделі. Буфер є одним з цих вузлів. При врахуванні пропускної здатності вхідного мережевого інтерфейсу, а також процесорної частоти, з'являються випадки, у яких тривалість обслуговування пакета перевищувала тривалість його зчитування в буфер. У цьому випадку пакет перебував в очікуванні на обслуговування. В попередніх дослідження встановлено, що значний вплив на кінцеву затримку внесений тривалістю буферизації пакетів. При врахуванні залежностей завантаження буфера віртуальних маршрутизаторів потоками, для передбачення безвтратної роботи обслуговувального пристрою при динамічній віртуалізації ресурсів, необхідно забезпечити ємності буферів у розмірі, більшому за максимальне значення кількості пакетів у ньому. Відповідно для відео це Buffer Capacity 1 ≥ 7, для голосу це Buffer Capacity 2 ≥ 7 для даних Buffer Capacity 3 ≥ 14. При помилковій організації ємностей віртуальних буферів, виникають втрати пакетів, внаслідок чого погіршується якість сприйняття послуг, які є чутливими до втрат. До прикладу, максимальна ємність буфера фізичного маршрутизатора розрахована на збереження Buffer Capacity =30 пакетів. В такому випадку сума виділених ємностей віртуальних буферів для маршрутизаторів не повинна бути більшою 30 пакетів $\sum_{i=1}^{3} buffer.capacity_i \leq 30$. Конфігурація віртуального маршрутизатора за замовчуванням мі однакові ємності буферів для збереження пакетів. З цією метою у блоках *FIFO Queue 1, FIFO Queue 2, FIFO Queue 3* та фізичному маршрутизаторі *FIFO Queue 4* імітаційної моделі встановлюємо ємності буферів. В умовах коли ємність буфера є недостатньою для збереження пакетів, вони відкидаються. Блоки *Dropped Packet1, Dropped Packet2, Dropped Packet3, Dropped Packet4* фіксують кількість пакетів, які були відкинуті через перевантаження буфера.

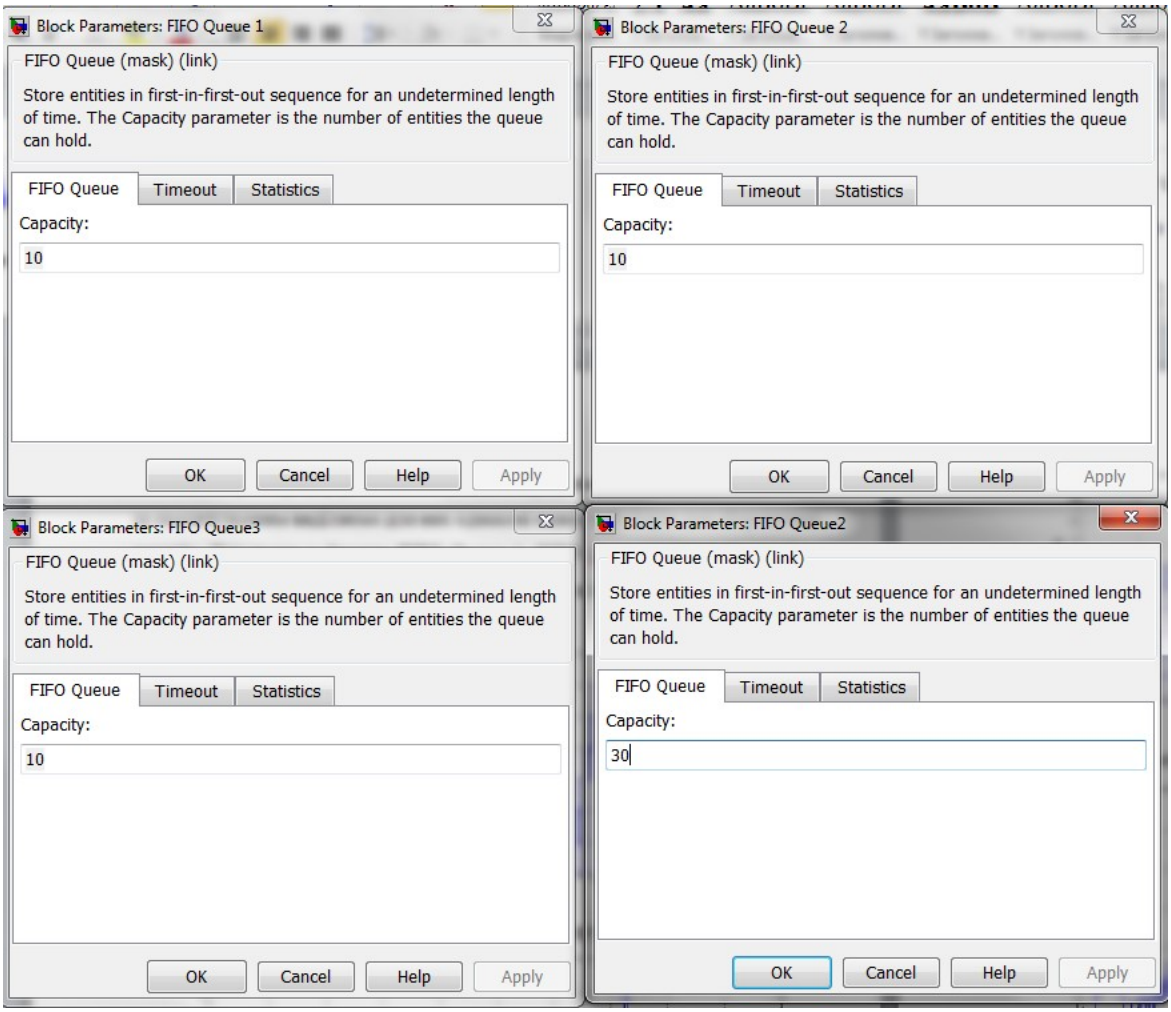


Рис.4.26. Статична конфігурація ємностей буферів віртуальних маршрутизаторів

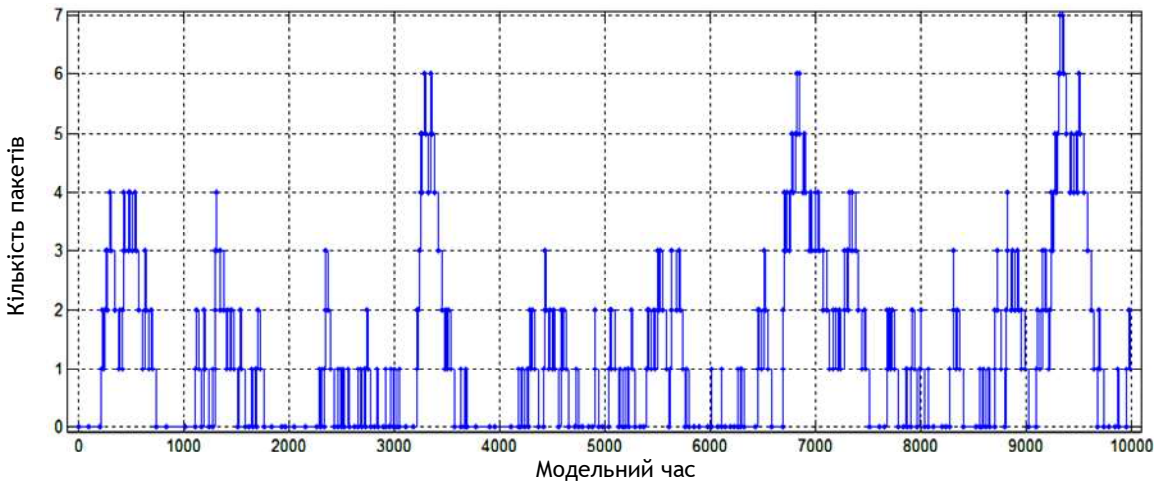


Рис.4.27. Завантаження буфера віртуального маршрутизатора потоками відео

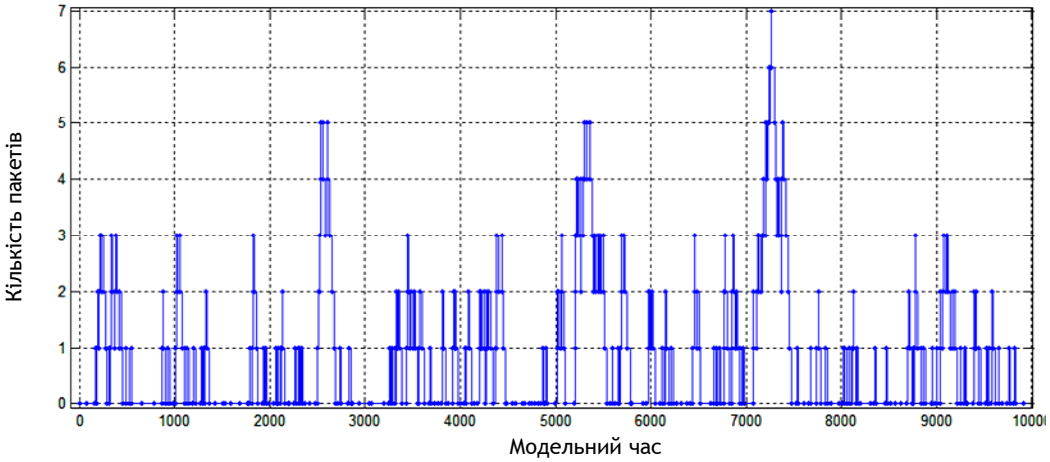


Рис.4.28. Завантаження буфера віртуального маршрутизатора потоками голосу

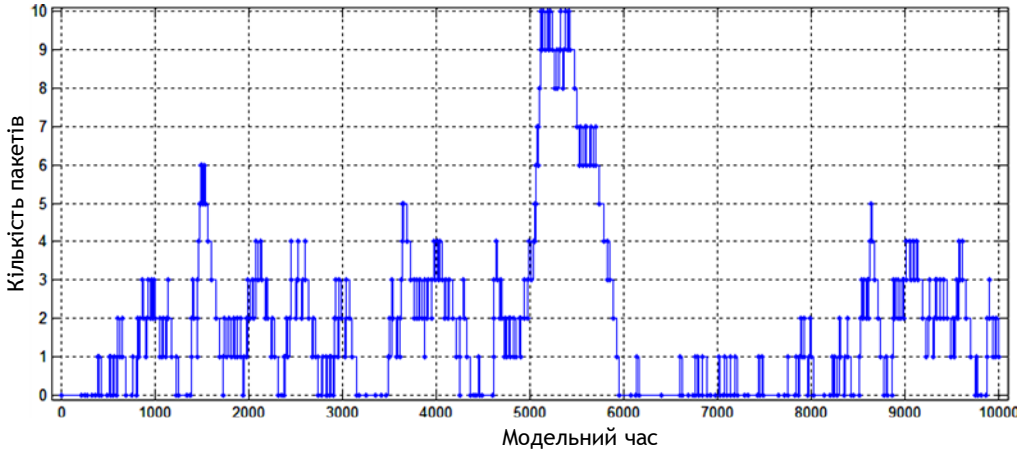


Рис.4.29. Завантаження буфера віртуального маршрутизатора потоками даних

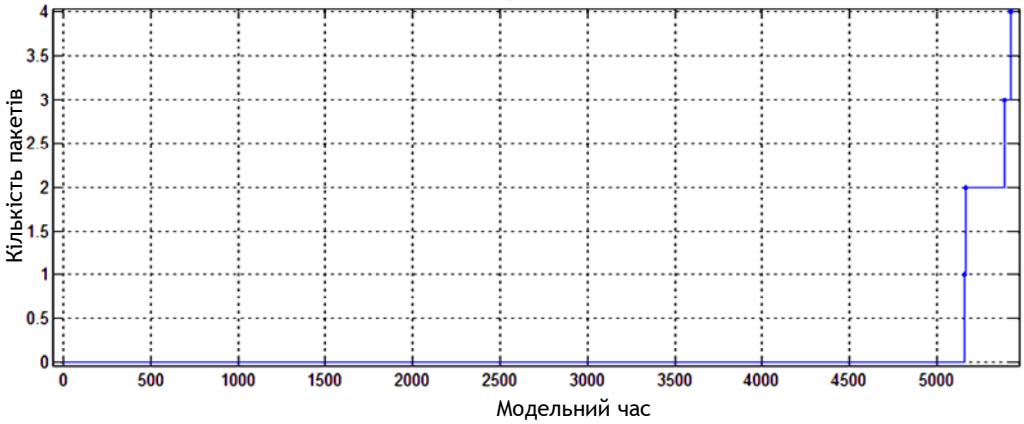


Рис.4.30. Кількість втрачених пакетів потоку даних у буфері віртуального маршрутизатора

Шляхом імітаційного моделювання встановлено, що для відео послуг та голосового трафіку максимальна кількість пакетів у буфері становить 7 (рис.4.27.-4.28). На протязі всього часу спостереження кількість пакетів, які були втрачені рівна нулю. Внаслідок того, що переповнюється буфер у віртуальних маршрутизаторах, що обслуговували відео та голос, не виникають втрачені пакети, адже ємності буферів даних маршрутизаторів розраховуються на зберігання до десяти пакетів за замовчуванням. Але у відповідальному за обслуговування потоків даних віртуальному маршрутизаторі максимальна кількість пакетів рівна 10 (рис.4.29). Тому з рисунку 4.30 бачимо, що втрати з'являються під час переповнення буфера віртуального маршрутизатора, що рівні 4 пакетам.

В такій ситуації при передаванні потоків даних, які є чутливими до втрат за рахунок недостатнього розміру буфера виникають втрати у мережевих пристроях, які призводять до погіршення якості сприйняття послуги кінцевими користувачами мережі. Щоб запобігти подібним ситуаціям, необхідно динамічно міняти розмір буферів віртуальних маршрутизаторів при змінах вхідного навантаження менеджером ресурсів. З попереднього дослідження видно, що є вільний запас ресурсу буфера у віртуальних маршрутизаторів при обслуговуванні голосового та відео потоків, які мають загальний розмір 6 пакетів. А для буфера призначеного для збереження потоків даних ресурсу недостатньо. Відповідно для забезпечення процесу обслуговування даних з мінімальними втратами шляхом динамічної віртуалізації ресурсів маршрутизатору потокам даних необхідно ємність буфера за замовчуванням виділити не 10, а 14 пакетів. Тому, після реконфігурації ресурсів фізичного буфера відповідно до потреб, буде отримано ємності, які зображені на рисунку 4.31.

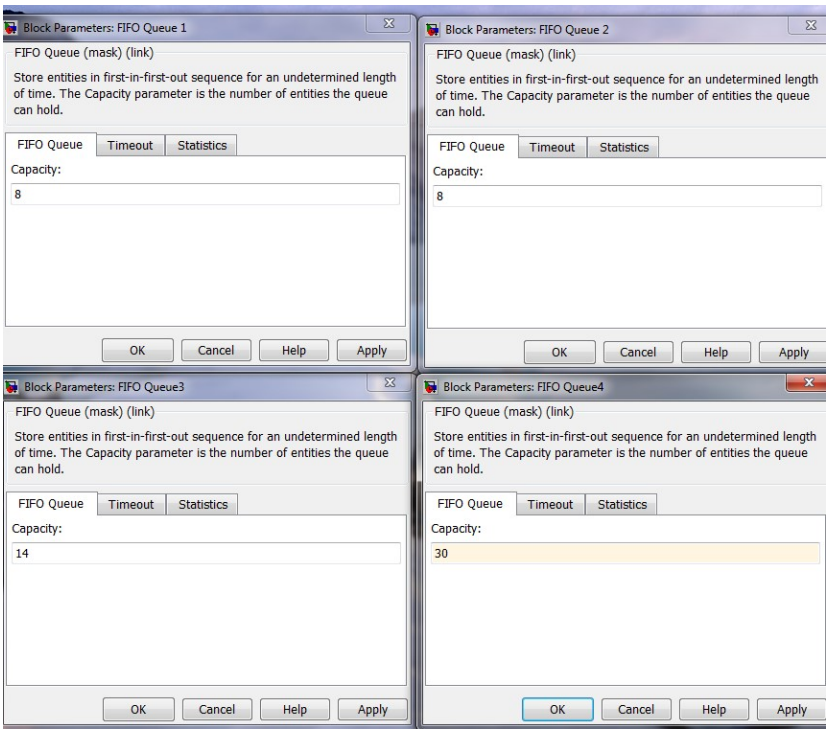


Рис.4. 31. Динамічна переконфігурація ємностей буферів віртуальних маршрутизаторів для забезпечення безвтратного режиму роботи маршрутизатора

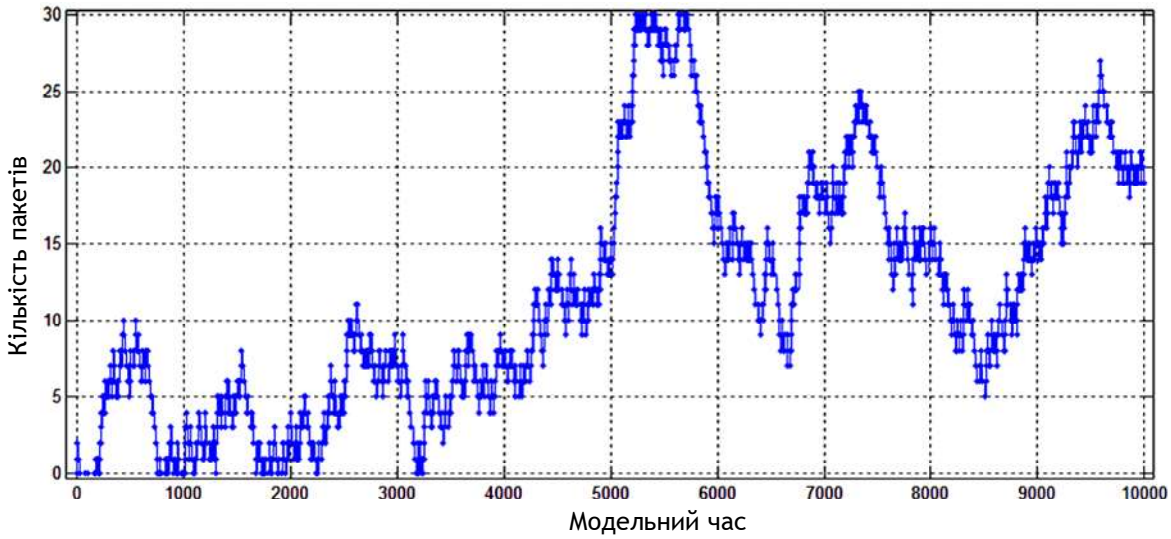


Рис.4.32. Завантаження буфера фізичного маршрутизатора потоками Triple Play

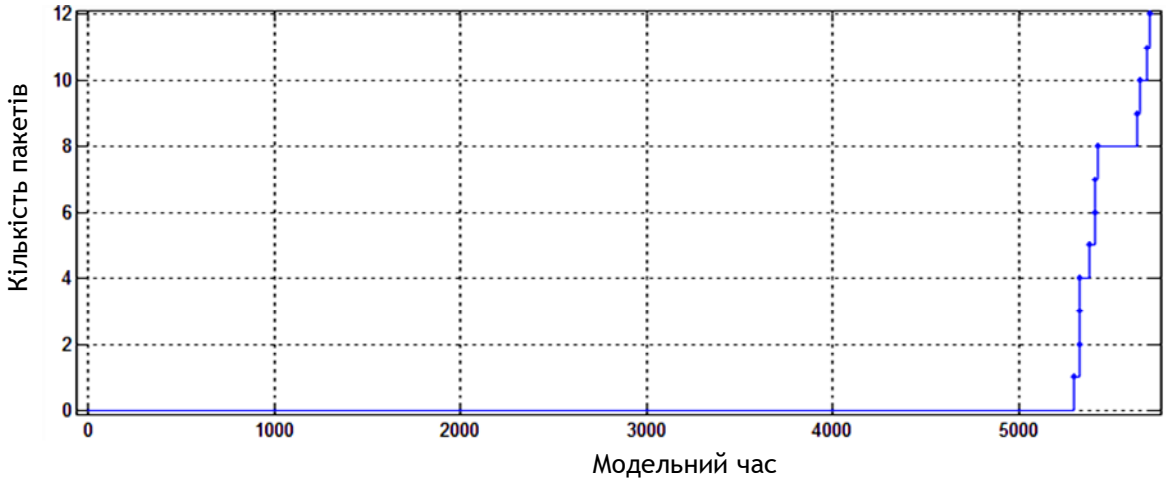


Рис.4.33. Кількість втрачених пакетів Triple Play у буфері фізичного маршрутизатора

У буфері фізичного маршрутизатора максимальною є кількість пакетів, яка рівна 30. Але з рисунку 4.33 видно, що є 12 відкинутих пакетів. Пояснити це можна тим, що для того, щоб забезпечити безвтратну систему не вистачає ємності буфера, яка була виділена під обслуговування потоків Triple Play. Тому, при порівнянні двох систем обслуговування інформаційних потоків бачимо, що коли відбувається віртуалізація мережевого пристрою сумарна ємність буферів віртуальних маршрутизаторів є меншою ($\sum_{i=1}^{3} buffer.capacity_i = 28$) для забезпечення безвтратного режиму роботи, ніж за стандартним обслуговуванням потоків ($buffer.capacity_P = 42$). Отже, надмірний розмір мережевого буфера при низькій пропускній здатності каналу призводить до великих затримок обслуговування. Проте, з іншої сторони, дуже малий розмір буфера при високих швидкостях передавання призводить до втрат пакетів. На даному кроці вирішено завдання вибору оптимального розміру мережевого буфера віртуального маршрутизатора, який вибирається відповідно з мінімальними затримками та втратами пакетів.

В роботі доведено, що найефективніша система обслуговування інформаційних потоків забезпечується динамічною віртуалізацією

обчислювальних ресурсів мережевого пристрою при організації віртуальних маршрутизаторів. Проте не виключено, що під час передавання великих обсягів мультимедійної інформації можуть виникнути ситуації, коли трапиться перевантаження віртуальних вузлів, що в свою чергу може призвести до погіршення параметрів QoS. Змоделювати схожу ситуацію можна шляхом збільшення інтенсивності поступлення пакетів певного потоку. При динамічній віртуалізації ресурсів фізичного мережевого пристрою всі обчислювальні ресурси будуть виділятися для віртуального маршрутизатора, який обслуговує даний потік. В такому випадку інші потоки не будуть забезпечені необхідним рівнем QoS. Для того, щоб уникнути таких ситуацій, запропоновано використати вимушене відкидання пакетів при зменшенні розміру буфера для потоків, які не є чутливими до втрат але чутливі до затримок. В ситуації коли на віртуальні маршрутизатори спостерігається висока інтенсивність поступлення пакетів на двох віртуальних пристроях, які призначені для потоків чутливих до втрат та потоків не чутливих до втрат, зменшивши розмір буфера віртуального маршрутизатора, призначеного для обслуговування потоків нечутливих до втрат (сервіс відео) при втраті декількох пакетів зміна якості сприйняття послуги для користувача буде непомітною [20, 25]. А відповідно його частину ресурсу буфера виділити для маршрутизатора, призначеного для потоків чутливих до втрат та нечутливих до затримок (сервіс дані-пошта). У таких потоків спостерігаються втрати пакетів через те, що буфер переповнюється, тобто розмір буфера є обмеженим. Отже при збільшенні для даного потоку буфера віртуального маршрутизатора під час високих навантажень пакетів буде досягнуто покращення такого параметру QoS, як імовірності відкидання пакетів. У роботі проведено моделювання та дослідження даної ситуації із використанням вимушеного відкидання пакетів. Спершу маршрутизатор з віртуалізцією, який відповідальний за обслуговування відео потоків при значній інтенсивності вхідних пакетів забезпечує передавання без втрат, тому що буферна ємність є достатньою і не

переповнюється. Ємність такого буфера встановлена розміром, який дає можливість буферизувати 8 пакетів. Відповідно при моделюванні із рис. 4.34 бачимо що кількість пакетів, які перебувають у буфері не перевищують 8 пакетів. В такому випадку жодні втрати не відбуваються. Проте при аналізі результатів кінцевих затримок у віртуальному вузлі видно, що кінцева затримка для відеопотоку не гарантована, адже з 6000 модельного часу спостерігається перевищення власного допустимого порогу, який рівний 100 мкс. Тому при використанні запропонованого методу керування структурними параметрами вузла (буфером) можна гарантувати необхідний рівень якості обслуговування за критерієм мінімальної затримки. З цією метою необхідно зменшити ємність буфера на 2 пакети. Таким чином на рисунку 4.35 відображено завантаження кількості пакетів протягом моделювання і видно, що максимальне значення становить 6 пакетів. Пакети, які буферизувались при максимально заповненому буфері, відкидались. Кількість відкинутих пакетів продемонстровано на рисунку 4.36. Оскільки декілька втрачених пакетів не вплинуть на якість сприйняття відео послуг реального часу для користувача, то при застосуванні вимушеного відкидання пакетів у межах допустимої ймовірності відкидання пакетів відповідно до рекомендацій IT-UT, надасть можливість покращення часових параметрів QoS. Розмір відео потоку становив 350 пакетів, шляхом впровадження в систему методу вимушеного відкидання пакетів спостерігається втрати пакетів у кількості 4 пакети . Відповідно відсоткове співвідношення кількості втрачених пакетів становить 1.14 %, що не перевищує допустимої межі для якісного надання сервісу. А кінцева затримка обслуговування зменшилась до потрібної межі для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування за критерієм мінімальної допустимої затримки (рис.4.37).

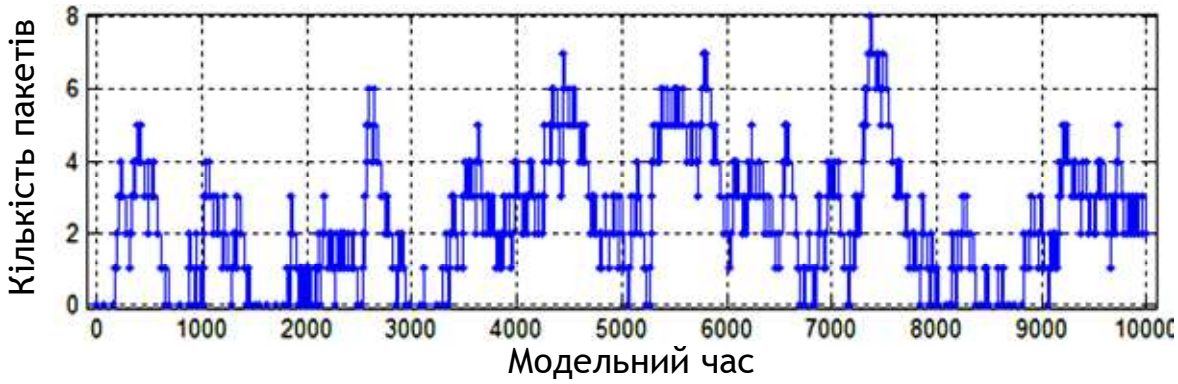


Рис.4.34. Завантаження буфера віртуального маршрутизатора потоками відео система без втрат

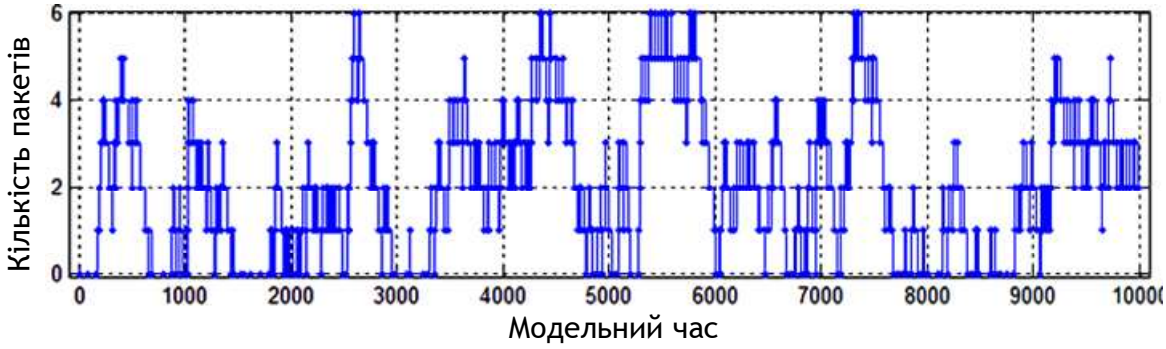


Рис.4.35. Завантаження буфера віртуального маршрутизатора потоками відео система з втратами

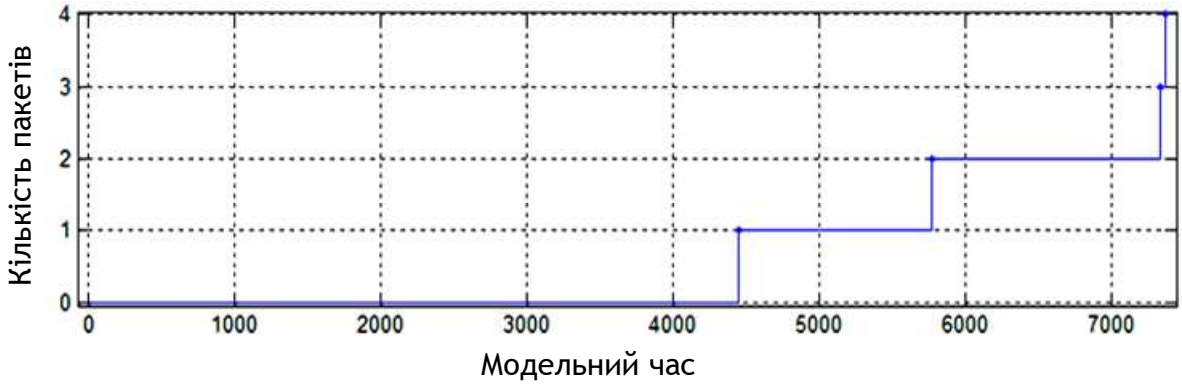


Рис.4.36. Кількість втрачених пакетів відео потоку у буфері віртуального маршрутизатора

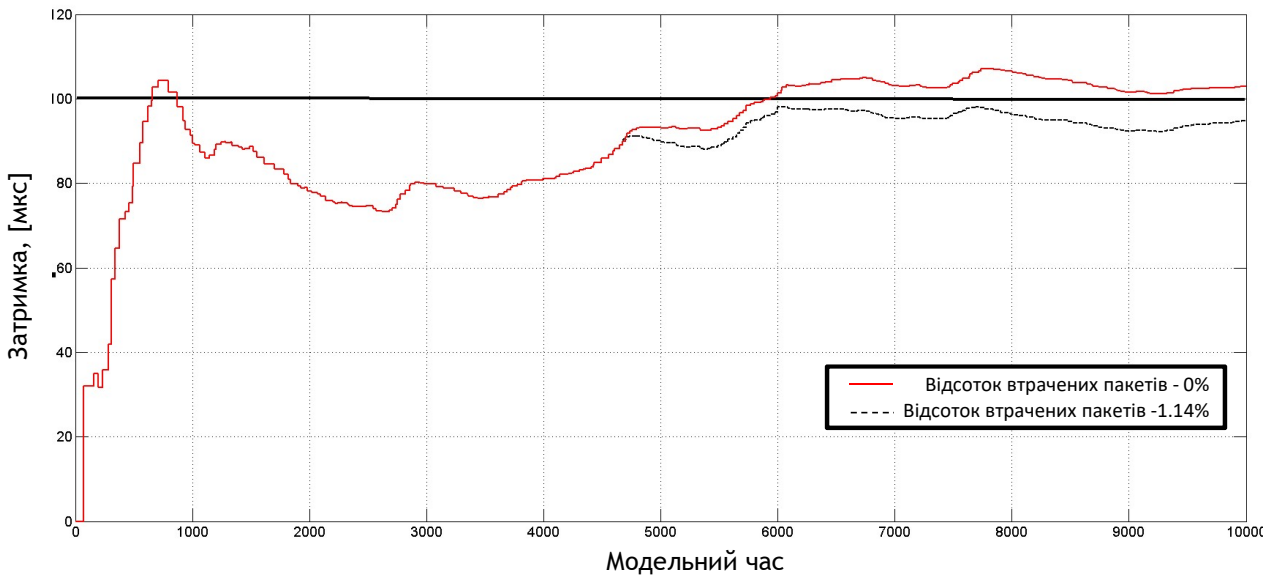


Рис.4.37. Порівняння тривалостей затримок пакетів відеопотоку віртуального маршрутизатора при вимушеному відкиданні пакетів

На віртуальному маршрутизаторі, що відповідає за обслуговування потоку даних при умові високої інтенсивності надхадження пакетів відбувається відкидання пакетів, тому що виділена буферна ємність, яка рівна 6 пакетам не дає можливості зберігати пакети, що поступають в чергу. Потік даних в даному випадку характеризує послугу пошти, який не чутливий до затримок, проте чутливий до втрат. Загальний обсяг відкинутих пакетів сягає 3 із 247 переданих пакетів, які утворюють дане повідомлення пошти (рис.4.38). А від загального повідомлення це становить 1.21%, що є неприпустимим для забезпечення гарантованого рівня QoS за критерієм ймовірності втрат пакетів для послуги пошти.

Рис.4.38. Кількість втрачених пакетів потоку даних у буфері віртуального маршрутизатора

Таким чином зменшивши розмір буфера для відеопотоку на два пакети в процесі вимушеного відкидання пакетів, звільнений ресурс надається віртуальному маршрутизаторові, призначеному для обслуговування послуги пошти. Для цього, у віртуальному маршрутизаторі, що призначений для потоку даних ємність буфера збільшуємо на 2 пакети та ємність відповідно становить 8 пакетів, що забезпечує безвтратний режим роботи системи.

4.3 Прогнозування тривалості затримки пакетів послуги і-го пріоритету та кількості вузлів для забезпечення QoS

Дослідження тривалості затримки послуги і-го віртуального маршрутизатора на всьому шляху передавання від джерела до адресата здійснювалось на основі моделі мережі, показаної на рисунку 4.39 із використанням запропонованої формули 2.44. та ефективності її використання порівняно із відомою формулою. Величину тривалості затримки розповсюдження пакету послуги і-го пріоритету по k-каналу зв’язку взято для всіх однаковою τ_{ik}=1мс виходячи з того, що випадковим процесом часу затримки є тривалість буферизації пакетів у вузлах, який важко прогнозувати за

рахунок впливу багатьох чинників, особливо при складних алгоритмах обробки черг, що використовують пріоритети [7].

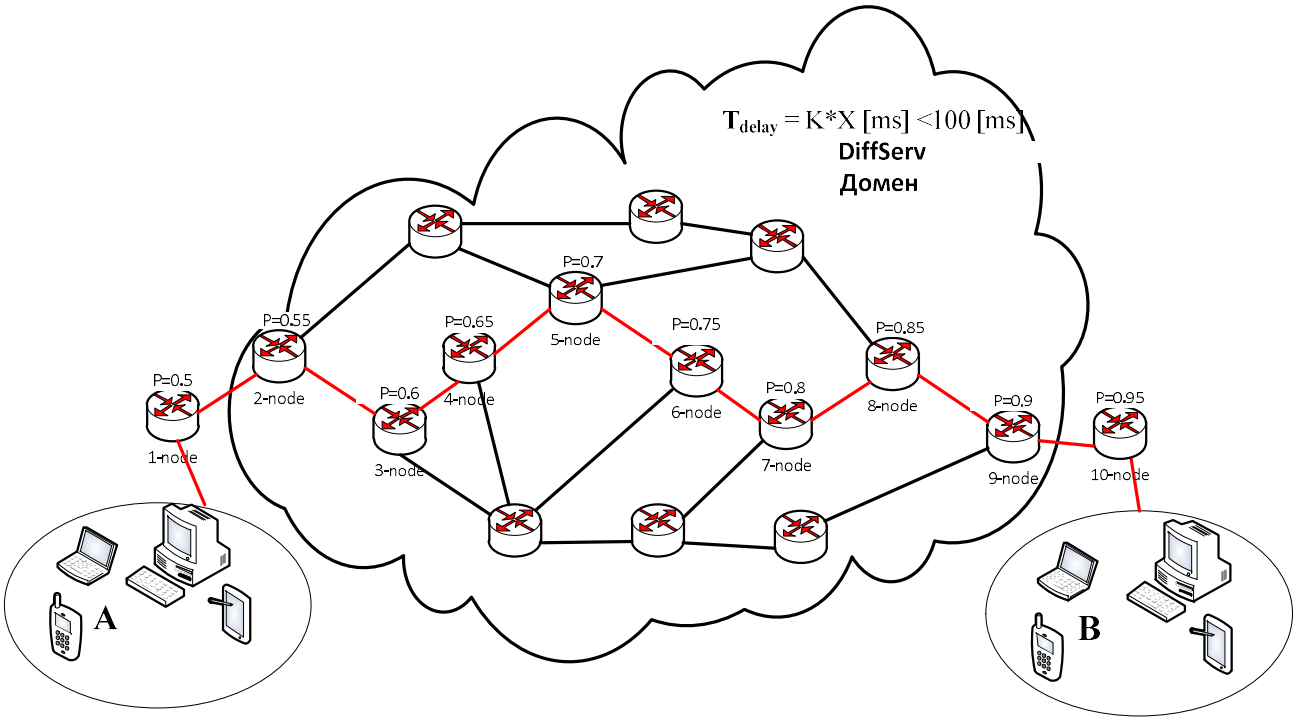


Рис. 4.39 Модель досліджуваної мережі прогнозування тривалості затримки

Як бачимо з рис. 4.39 модель побудована так, щоб під час проходження пакету від джерела до адресата врахувати різні випадки коефіцієнтів завантаження віртуальних вузлів, при яких виникають черги із різними віртуальними зонами завантаження буферного ресурсу. Прогнозування здійснювалось для трафіку, створюваного трьома групами користувачів, які користуються різними послугами в різному обсязі. Для кожної із групи показано графіки прогнозування часів затримок послуг і-го віртуального маршрутизатора..

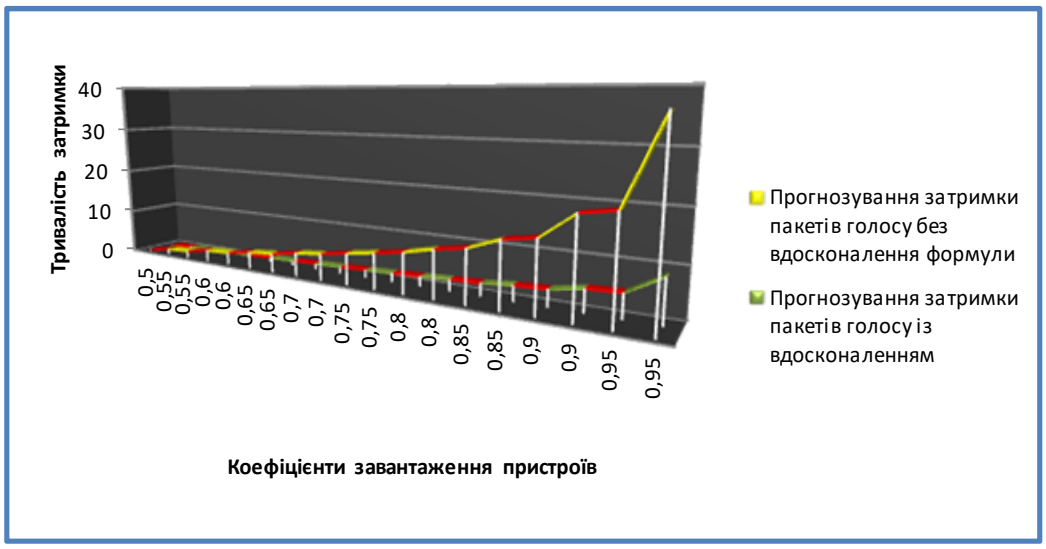


Рис. 4.40. Прогнозування тривалості затримки пакетів голосу дослідженої мережі для домашніх користувачів

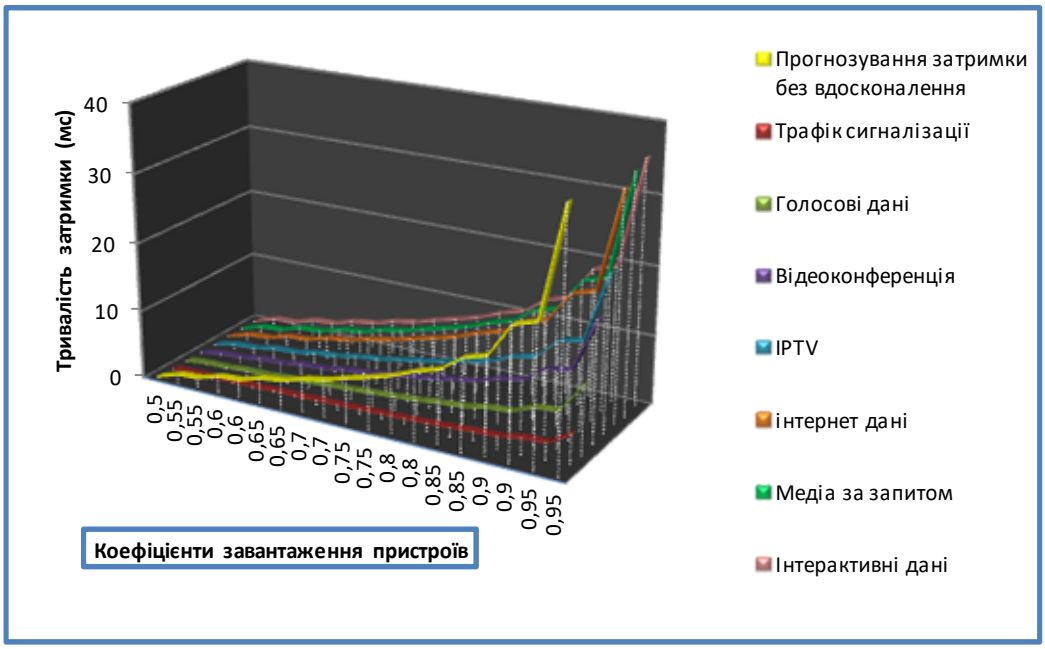


Рис. 4.41. Прогнозування тривалості затримок пакетів послуг і-го пріоритету дослідженої мережі для домашніх користувачів

Із рисунку 4.41 бачимо ефективність використання запропонованої формули (2.44), яка визначає тривалість затримки пакетів послуги і-го віртуального маршрутизатора на всьому шляху передавання від джерела до адресата.

Таблиця 4.2

Результати моделювання

Коефіцієнт завантаження вузла ρ	**Трафік сигналізації** *Т- затримка (мс)*	**Голосові дані** *Т- затримка (мс)*	**Відеоконференція** *Т- затримка (мс)*	**IPTV** *Т- затримка (мс)*	**Інтернет дані** *Т- затримка (мс)*	**Медіа за запитом** *Т- затримка (мс)*	**Інтерактивні дані** *Т- затримка (мс)*
0,5	0,022637363	0,039295045	0,082663466	0,101390738	0,163814981	0,176299829	0,19639739
0,55	0,132527473	0,230047688	0,483942425	0,593578789	0,959033334	1,032124243	1,14978278
0,55	0,164395604	0,285365955	0,600313323	0,736313323	1,189646657	1,280313323	1,426264543
0,6	0,274285714	0,476118598	1,001592283	1,228501374	1,98486501	2,136137737	2,379649932
0,6	0,31989011	0,555280945	1,168123051	1,432759414	2,314880626	2,491304869	2,775304869
0,65	0,42978022	0,746033589	1,56940201	1,924947465	3,11009898	3,347129283	3,728690258
0,65	0,496153846	0,861248186	1,811774502	2,222229047	3,590410865	3,864047229	4,304535034
0,7	0,606043956	1,052000829	2,213053461	2,714417097	4,385629219	4,719871643	5,257920423
0,7	0,705934066	1,225394982	2,577816035	3,161816035	5,108482702	5,497816035	6,124547742
0,75	0,815824176	1,416147626	2,979094994	3,654004085	5,903701055	6,353640449	7,077933132
0,75	0,973406593	1,689686917	3,554529022	4,359801749	7,044044174	7,580892658	8,44508778
0,8	1,083296703	1,88043956	3,955807981	4,8519898	7,839262527	8,436717072	9,39847317
0,8	1,35043956	2,344159237	4,931317132	6,04849895	9,772438344	10,51722622	11,71615305
0,85	1,46032967	2,534911881	5,332596091	6,540687	10,5676567	11,37305064	12,66953844
0,85	1,970769231	3,42095791	7,196536857	8,826900494	14,26144595	15,34835504	17,09801358
0,9	2,080659341	3,611710554	7,597815817	9,319088544	15,0566643	16,20417945	18,05139897
0,9	3,30043956	5,729064897	12,05201227	14,7823759	23,88358802	25,70383045	28,63397679
0,95	3,41032967	5,919817541	12,45329123	15,27456395	24,67880638	26,55965486	29,58736218
0,95	8,482087912	14,7236243	30,97351904	37,99051904	61,38051904	66,05851904	73,58895806

Порівняно із результатами прогнозування тривалості затримки пакетів визначених за формулою коли ми не знаємо кількість пакетів і-ї послуги, які перебувають у буфері, а саме за формулою відомою– ti= 36.1мс, а за формулою удосконаленою – ti=9.8 мс. Як бачимо ефективність прогнозування тривалості затримки пакетів голосу підвищилась у 3.6 рази трафіку створюваного групою домашніх користтувачів. З рисунку 4.42 визначено ефективності прогнозування тривалості затримки пакетів всіх послуг, що передаються у мережі групою домашніх користувачів, які показано в таблиці 4.2, де k – коефіцієнт підвищення ефективності прогнозування тривалості затримки пакетів послуг.

Таблиця 4.3

Ефективність прогнозування тривалості затримки пакетів послуг запропонованої формули

Послуга	**K**
Голосові дані	3,656941813
Відеоконференція	2,056688548
IPTV	1,589633977
Інтернет дані	1,093147158
Медіа за запитом	1,0520732
Інтерактивні дані	1,022597916

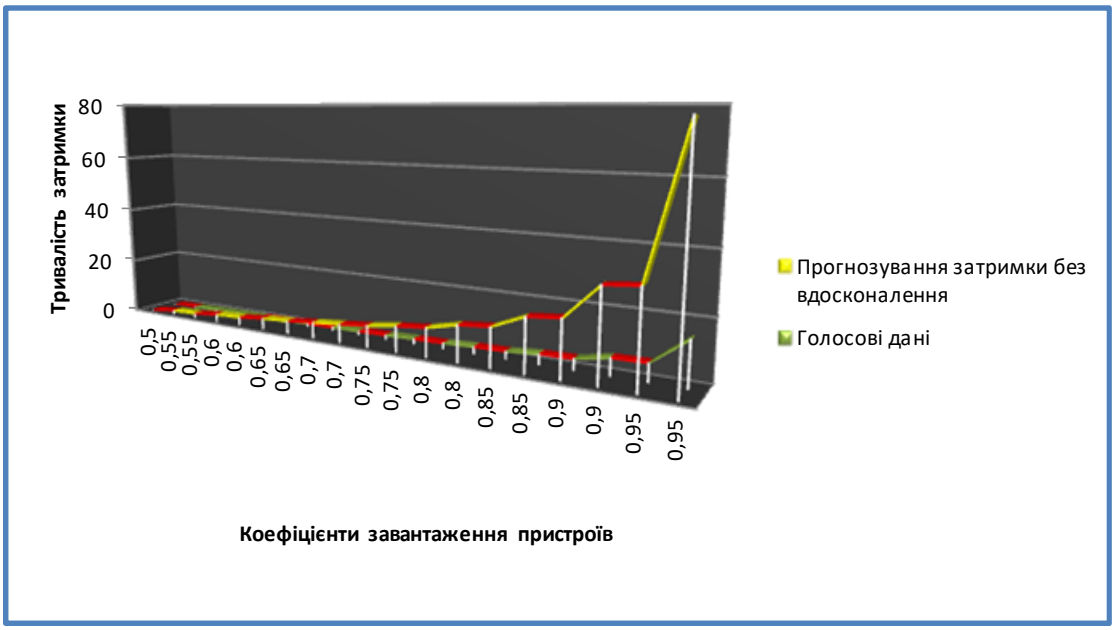


Рис. 4.42. Прогнозування тривалості затримки пакетів голосу дослідженої мережі для офісних користувачів

З рисунку 4.43 визначено ефективності прогнозування тривалості затримки пакетів всіх послуг, що передаються групою офісних користувачі

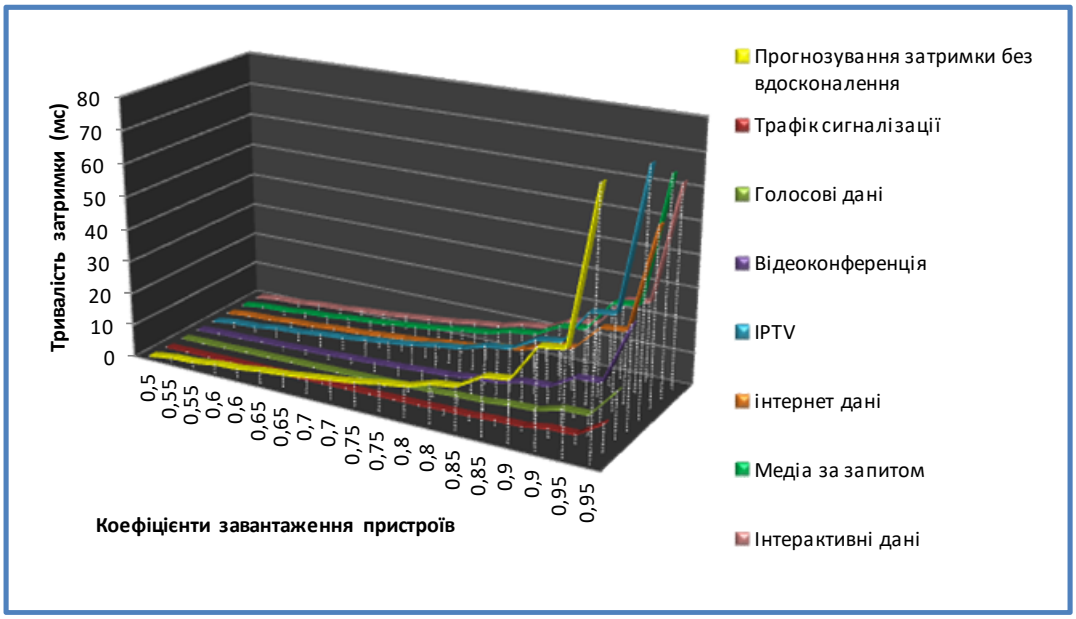


Рис. 4.43. Прогнозування тривалості затримок пакетів послуг і-го пріоритету дослідженої мережі для офісних користувачів

Таблиця 4.4

Ефективність прогнозування тривалості затримки пакетів послуг запропонованої формули

Послуга	K
Голосові дані	5,242391304
Відеоконференція	2,492031981
IPTV	1,048893775
Інтернет дані	1,419830823
Медіа за запитом	1,159452151
Інтерактивні дані	1,247084569

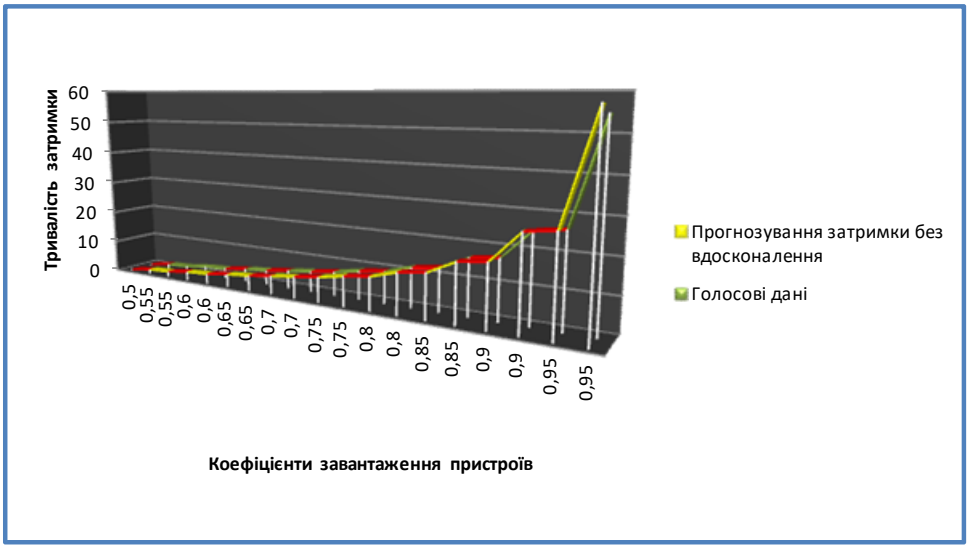


Рис. 4.44. Прогнозування часу затримки пакетів голосу дослідженої мережі для центру обробки даних

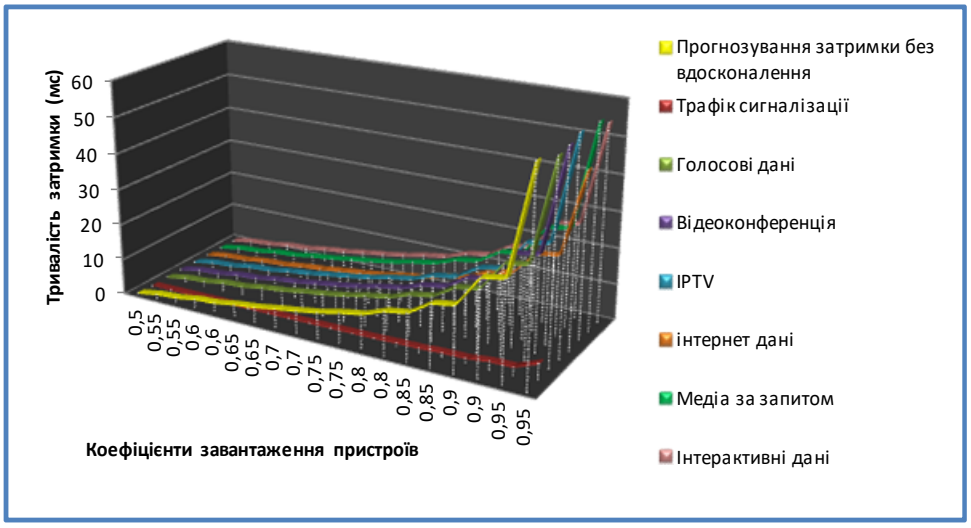


Рис. 4.45. Прогнозування часів затримок послуг і-го пріоритету дослідженої мережі для центру обробки даних

З рисунку 4.45 визначено ефективності прогнозування тривалості затримки пакетів всіх послуг, що передаються у мережі групою центрів обробки даних, які показано в таблиці 4.4, де k – коефіцієнт підвищення ефективності прогнозування тривалості затримки пакетів послуг . Як бачимо, отримані результати прогнозування тривалості затримки пакетів послуг співпадають із результатами невдосконаленої формули. Це можна пояснити тим, що користувачам центрів обробки даних не є важливими послуги голосу, тому вони оброблятимуться із гіршою якістю за рахунок поміщення пакетів у непріоритетну зону буфера, і тривалість оброблення пакетів голосу буде характеризуватись тривалістю обробки всіх пакетів послуг, поміщених у буфері.

Таблиця 4.5

Ефективність прогнозування тривалості затримки пакетів послуг запропонованої формули

Послуга	K
Голосові дані	1,044663908
Відеоконференція	1,0301216
IPTV	1,005460956
Інтернет дані	1,253073463
Медіа за запитом	1,017641898
Інтерактивні дані	1,05376165

З рисунку 4.46 – 4.48 визначено прогнозування кількості вузлів в мережі, яка забезпечує QoS при різних значеннях середнього коефіцієнта завантаження мережі для трьох груп користувачів, та показано ефективність прогнозування із застосуванням вдосконаленої формули для послуг реального часу.

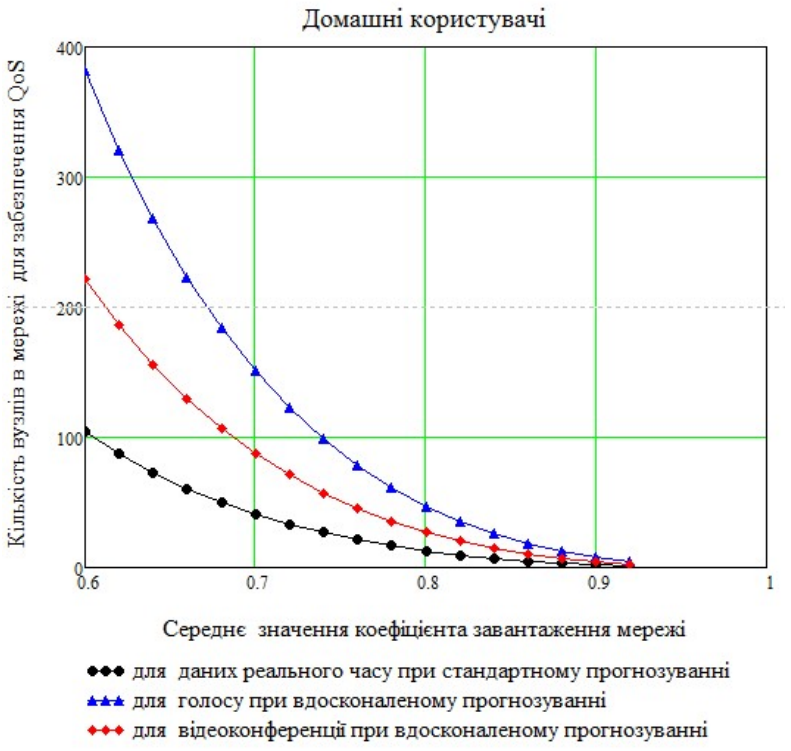


Рис. 4.46. Прогнозування кількості вузлів в мережі, яка забезпечує QoS для групи домашніх користувачів

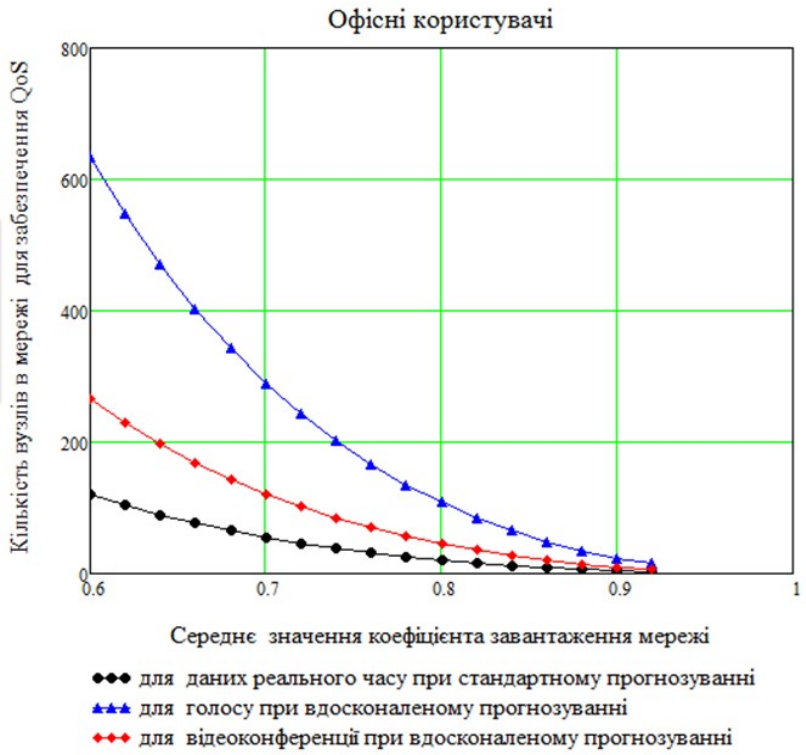


Рис. 4.47. Прогнозування кількості вузлів в мережі, яка забезпечує QoS для групи офісних користувачів

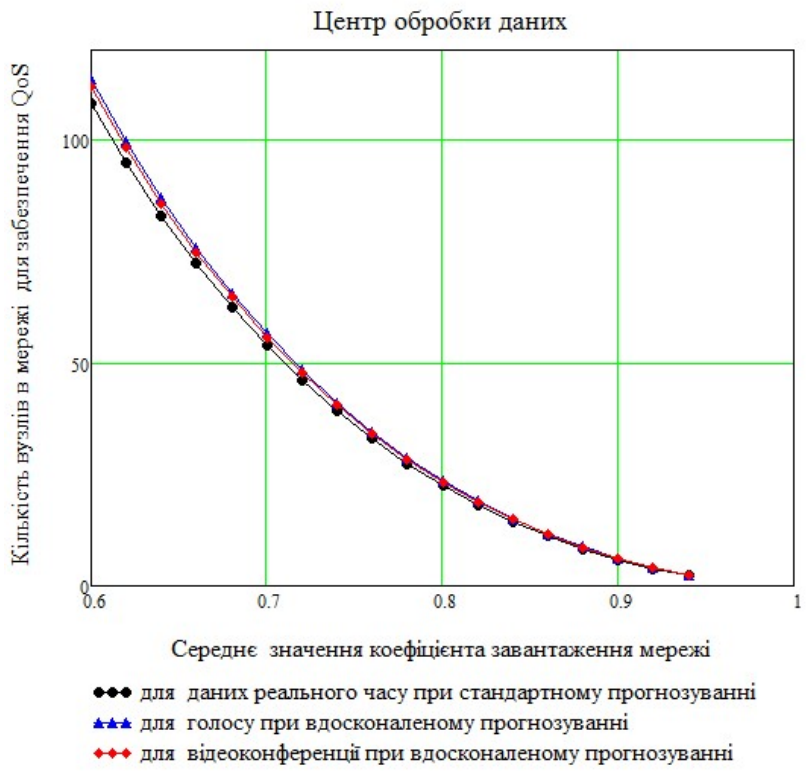


Рис. 4.48. Прогнозування кількості вузлів в мережі, яка забезпечує QoS для групи центру обробки даних

З графіків бачимо переваги використання запропонованих формул, які дають змогу ефективніше управляти мережевими ресурсами, із забезпеченням необхідної якості обслуговування абонентів. Також дозволяє отримати результати з вищою точністю (табл.4.3 – табл.4.5), загальної тривалості буферизації пакетів певного сервісу при проходженні через віртуальні вузли із різним коефіцієнтом завантаження на етапі проектування та прогнозуванням кількості вузлів в мережі, яка забезпечує QoS для даних реального часу створюваними різними групами користувачів. Отже вищеозначений підхід для прогнозування вузлів можна використати на етапі проектування мережі для різних груп користувачів [7, 24].

Висновки до 4-го розділу

1. Розроблено імітаційну модель віртуального маршрутизатора для дослідження якості обслуговування абонентів корпоративних мереж. Модель дасть можливість проектувальникам обирати оптимальні параметри мережевого обладнання для організації віртуальних маршрутизаторів, яка, на відміну від існуючого принципу обслуговування, дасть змогу забезпечити необхідну якість надання послуг кінцевим користувачам.

2. Проведено порівняння системи обслуговування інформаційних потоків зі статичною віртуалізацією обчислювальних ресурсів маршрутизатора із системою, яка функціонує в існуючих маршрутизаторах з алгоритмом обслуговування в чергах FIFO. Статична віртуалізація не забезпечує гарантований рівень QoS для усіх існуючих потоків у мережі за критерієм мінімальної затримки, відповідно у роботі запропоновано модель маршрутизатора з динамічним виділенням ресурсів, що забезпечує гнучкість управління обчислювальними ресурсами в умовах значни флуктуацій трафіку без залучення додаткових ресурсів.

3. Виконано порівняння затримки обслуговування пакетів послуг системи із динамічним розподілом ресурсів маршрутизатора із системою пріоритетного обслуговування.

4. Запропоновано підхід щодо прогнозування тривалості затримки обслуговування пакетів послуги і-го віртуального маршрутизатора, на основі якого можна отримати результати з вищою достовірністю, загального часу буферизації пакетів класу при проходженні через віртуальні вузли із різним коефіцієнтом завантаження на етапі проектування для різних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж. А також визначено максимальну кількість транзитних вузлів, яка може бути встановлена для якісного надання інформаційних послуг. Для голосових даних прогнозована допустима кількість транзитних вузлів збільшилась у 3.6 разів після застосування віртуалізації. Відповідно для трафіку голосових даних, що створюються офісними

користувачами, кількість прогнозованих вузлів збільшилась у 5.28 рази після проходження яких забезпечується допустима якість обслуговування, а для відео-конференцій у 2.2 рази. В свою чергу, для трафіку голосових даних, що створюються центрами обробки даних, кількість прогнозованих вузлів збільшилась у 1.04 рази після проходження яких забезпечується допустима якість обслуговування, а для відео-конференцій у 1.02 рази.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОЇ КОРПОРАТИВНОЇ МЕРЕЖІ ІЗ ВПРОВАДЖЕННЯМ ПРОГРАМНИХ МАРШРУТИЗАТОРІВ

5.1 Розроблення фрагменту віртуальної тестової платформи корпоративної мережі нового покоління для дослідження ефективності запропонованих методів та моделей

Мережі, в основі яких лежить стек TCP / IP, пройшли довгий і складний шлях покращень та модифікацій. Одним з найскладніших завдань, яке потрібно вирішити, є забезпечення високої якості обслуговування в таких мережах. Основна проблема щодо забезпечення якості обслуговування полягає у змінній довжині IP пакету. Тривалість передавання та обробки пакету мережевим пристроєм залежить від довжини пакету. Оскільки інтенсивність вхідного трафіку дуже складно передбачити, дуже важко заздалегідь оцінити, якої затримки набуде конкретний пакет у процесі передачі по обраному маршруту. Інтегрований тип сервісу частково вирішує проблему забезпечення необхідної якості обслуговування, проте, з іншого боку, таке вирішення призводить до неефективного використання мережевих ресурсів, зокрема пропускної здатності каналів та обчислювальної потужності мережевих пристроїв. У випадку використання диференційованого типу обслуговування, кожному пакету присвоюється мітка в залежності від вимог QoS. Таким чином, пакети, що мають вищий пріоритет, обслуговуються в першу чергу у порівнянні з пакетами з нижчим пріоритетом. Для кожного класу трафіку виділяється пам'ять у вхідному буфері маршрутизатора. Таким чином, у процесі безперервного обслуговування пакетів з вищим пріоритетом, пакети з нижчим пріоритетом зберігаються у вхідному буфері. Такий метод має декілька серйозних недоліків. Перший з них полягає в тому, що пакети одного класу обробляються шляхом наскрізної передачі один за одним. Це означає, що пакет

з високим пріоритетом, який зазнав великої затримки, ставиться в чергу, у той час як пакет того самого класу з набагато меншою затримкою обслуговується мережевим пристроєм. Оскільки кількість потоків мультимедійного трафіку постійно зростає, а такому трафіку зазвичай надається найвищий пріоритет, якість обслуговування для мультимедійного трафіку буде поступово погіршуватися, що неодмінно вплине на якість надання послуг та рівень задоволення користувачів.

Інший недолік полягає в тому, що кожному класу трафіку (кожен клас отримує свій відносний пріоритет) відповідає окрема черга у вхідному буфері маршрутизатора. Це означає, що коли інтенсивність трафіку з низьким пріоритетом низька, то пам’ять, виділена під чергу для таких пакетів, не використовується. У той же час, інтенсивність трафіку реального часу може бути високою, що викличе переповнення черги для високопріоритетних пакетів, що призведе до їх відкидання, при цьому значна частина пам’яті вхідного буферу може залишатися практично не задіяною. Як результат – неефективне використання ресурсу маршрутизатора та низька якість обслуговування.

Деякі автори пропонують вирішити другу проблему за допомогою динамічної зміни розміру черг індивідуально для кожного класу трафіку. Такий метод може допомогти, але має серйозний недолік, який полягає в механізмі розподілу пам'яті. Перерозподіл пам’яті черг може виявитися довготривалим з урахуванням кількості черг та динамічності інтенсивності навантаження. Більше того, у процесі перерозподілу пам’яті, інші процеси, наприклад пакетів, будуть змушені зачекати допоки не завершиться процес перерозподілу пам’яті. Саме тому у роботі пропонується процес перерозподілу, що передбачає переміщення пакетів, що вже знаходяться в черзі, щоб забезпечити необхідну довжину для високопріоритетних черг у памятях комірки, де вони не задіяні.

Однією з основних проблем забезпечення високої якості обслуговування є вартість модифікації існуючої інфраструктури операторів, особливо коли

характеристики трафіку дуже швидко змінюються внаслідок збільшення кількості та типів сервісів. А отже, забезпечення якості обслуговування залишається дуже важливою та актуальною практичною проблемою.

На даний момент, існує велика кількість засобів для моделювання мережевих процесів, які дозволяють тестувати запропоновані алгоритми та оцінювати ефективність конкретного рішення. Проте серйозним недоліком більшості з таких засобів є те, що вони використовують статистичні методи та аналітичні залежності для розрахунку стану системи в певний момент часу. Таким чином, годину реальної роботи мережі можна моделювати протягом десятків секунд. Такий метод показує низьку ефективність.

Саме тому у роботі, розроблено програмну модель, яка буде не тільки описувати всі процеси, що відбуваються, а також давати гнучкі механізми для керування та дослідження моделлю в режимі реального часу з можливістю генерації потоків реальних даних та їх обробки за принципом апаратної архітектури мережевих пристроїв [8, 47].

Найпершим у UML-діаграмі виділено об’єкт «**Потік**», який представляє собою *багатовимірний масив,* де першим значенням в стовпці є *унікальний ключ* (відлік часу для пакетів). Решта значень – *набір параметрів, які описують конкретний елемент* (адреса одержувача, тип пакету, пріоритет, необхідна пропускна здатність, допустимі вимоги до QoS та ін.). В даному об’єкті також реалізовано кілька додаткових методів: оцінка параметру Херста та ступеня пачечності потоку, визначення його статистичних властивостей та характеристик та ін. Потік необхідно створювати згідно певних своїх правил для кожного окремого взятого випадку. Наприклад для мультисервісних послуг – послідовність пакетів, розподілених за певним законом, що описуються реальними властивостями та їх пріоритет за певний проміжок часу. Для цього потрібно створити об'єкт - **«Генератор початкового потоку»**. Його завданням буде зчитування необхідного потоку із певного адресата відправника, або ж генерація цього потоку за певними

принципами.

Також у всіх структурах присутній **«Робочий елемент»**. Він являє собою програмно-конфігурований мережевий пристрій (комутатор чи маршрутизатор), який повинен обробляти пакети згідно принципу апаратної архітектури та включати у себе ті елементи, які будуть вносити у систему поняття обмеженості ресурсів: смуга пропускної здатності каналу в IP мережі. Цей об'єкт є дуже специфічним для кожного окремого завдання. Але йому можна задати за допомогою таких параметрів: *робочий ресурс* (потужність процесора фізичної (віртуалізованої машини), максимально можлива пропускна здатність, *рівень завантаження (*процесора системи, буферного та канального ресурсу.). Через те, що завжди присутня група «**робочих елементів**», що виконують спільно завдання, створено інтегруючий об'єкт - **«Система»**, яка описує роботу елементів в сукупності. Параметрами даного об’єкту є: *масив **«робочих елементів»**, стан та зміна стану системи, показники завантаження.* Останнім основним об'єктом є «**Розподільник**» - це об'єкт, який за допомогою «потоків», дає змогу взаємодіяти об'єктам «**генератор початкового потоку**» та «**система**», при цьому вирішуючи поставлене завдання щодо розподілу потоків. В якості його параметрів виступає ряд об'єктів, які вирішують різні типові завдання. Вони будуть перелічені нижче. Найбільш важливим елементом є об'єкт «**Керування**», який призначений для вирішення завдання розподілу вхідного та вихідного потоків пакетів в «**Розподільник**» між вихідними та вхідними потоками. Об'єкт «**Оптимізація**» використовується для того, щоб оцінювати адекватність запропонованих наукових рішень шляхом оптимального розподілу ресурсів. В даному випадку програмно-керований маршрутизатор з перспективою на майбутнє має можливість аналізувати та зберігати інформацію попередніх рішень, вихідних даних та приймати рішення в залежності від цієї інформації. Для цього створюється об'єкт-параметр - «**Пам'ять**». А об'єкт- параметр «**Прогноз**» дасть можливість застосування

механізмів прогнозування для виділеннях необхідних обчислювальних ресурсів в певні моменти часу. Вищеназвані об'єкти дають можливість описати принцип взаємодії даної моделі із завданнями мережевої оптимізації та прогнозу. Дану програмну модель мережевого пристрою було реалізовано за допомогою програмних засобів динамічної об'єктно-орієнтованої мови програмування C++. Нижче представлений загальний вигляд такої моделі, здійснений за допомогою UML-діаграми – рисунок 5.1.

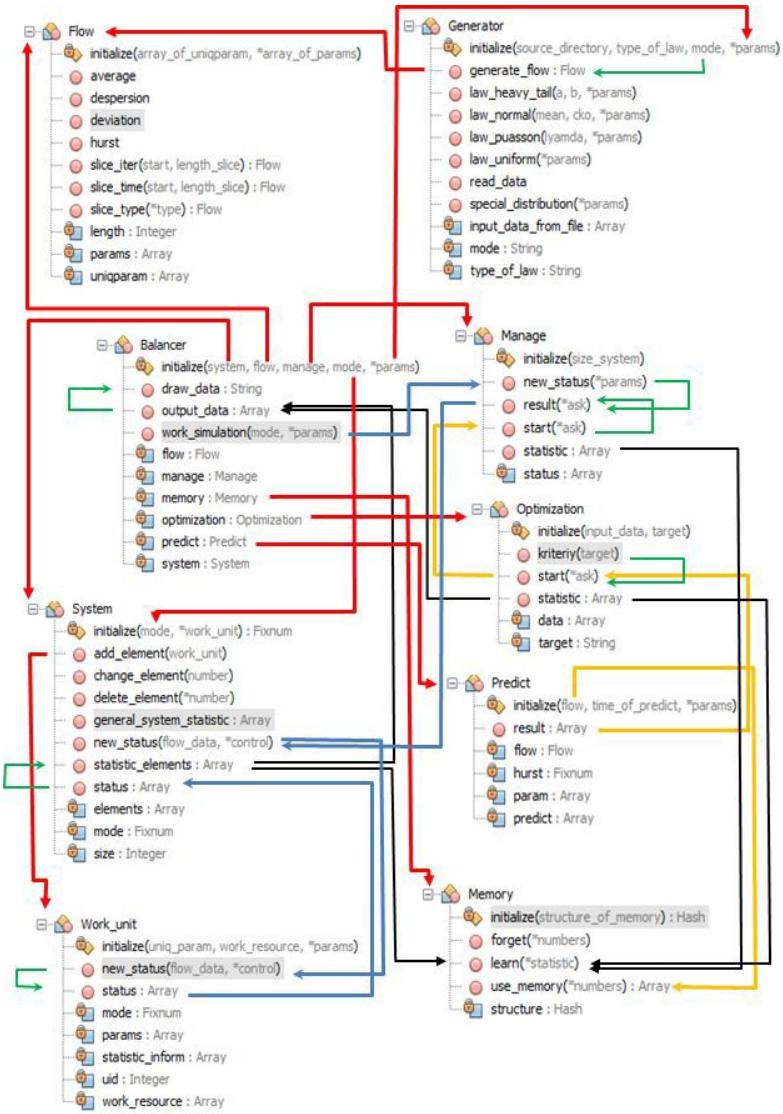


Рис.5.1. UML-діаграма програмної моделі віртуальної тестової платформи мережі нового покоління

Відзначимо, що кольори стрілок не несуть собою додаткової інформації, вони призначені для полегшення. Для оцінки ефективності запропонованих

рішень у роботі, створено віртуальну тестову платформу з використанням інструменту QtCreator (версія 5.2). Перевагою цього інструменту є те, що створені на її основі програми можуть бути скомпільовані для роботи на будь-якій операційній системі, наприклад, Windows, Linux або Mac.

Основою для розробки віртуалізованих мережевих компонентів є мережеві API, які надаються програмістам у формі сокетів. Сокет - це об'єкт, який поєднує IP-адресу кінцевого пристрою та TCP порт програмного процесу на операційній системі кінцевого пристрою. Дані передаються між сокетами у потоковому режимі по мірі їх надходження на передавач. У розробленій платформі, сокет відповідає фізичному порту справжнього мережевого вузла. Таким чином, забезпечується абстракція від канального рівня і вся увага зосереджується на обробці даних на мережевому рівні.

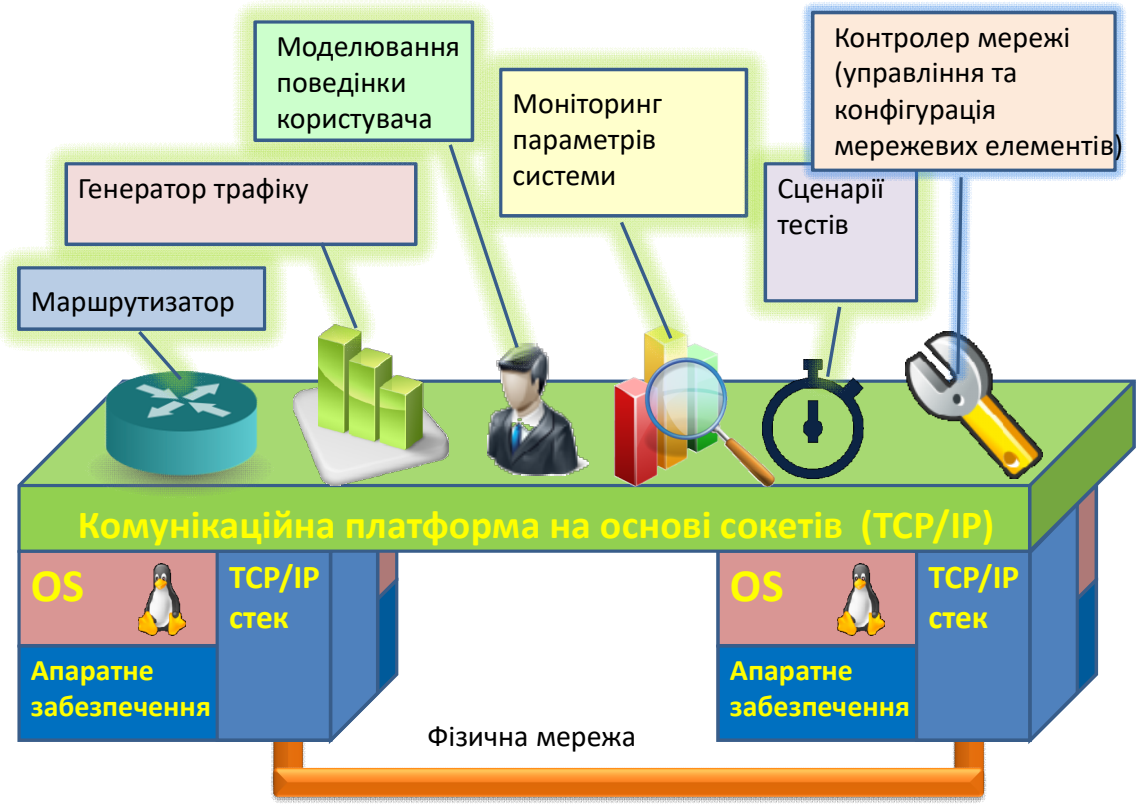


Рис.5.2. Мережевий стек розробленої тестової платформи мережі нового покоління

Щоб повністю абстрагуватися від канального рівня, створено віртуальний IP-пакет, з яким можуть працювати вузли тестової платформи. Мережевий стек,

задіяний у розробленій тестовій платформі відображено на рис.5.2. На основі розробленої тестової платформи, розроблено програмну модель IP-маршрутизатора (далі VNR - віртуалізований мережевий маршрутизатор) та генератор мережевого трафіку. Архітектура розробленого VNR представлена на рис.5.3 і складається з об'єктів, що моделюють конкретні функції маршрутизатора. Такі процеси як прийом та передавання пакетів моделюються в паралельних потоках [35].

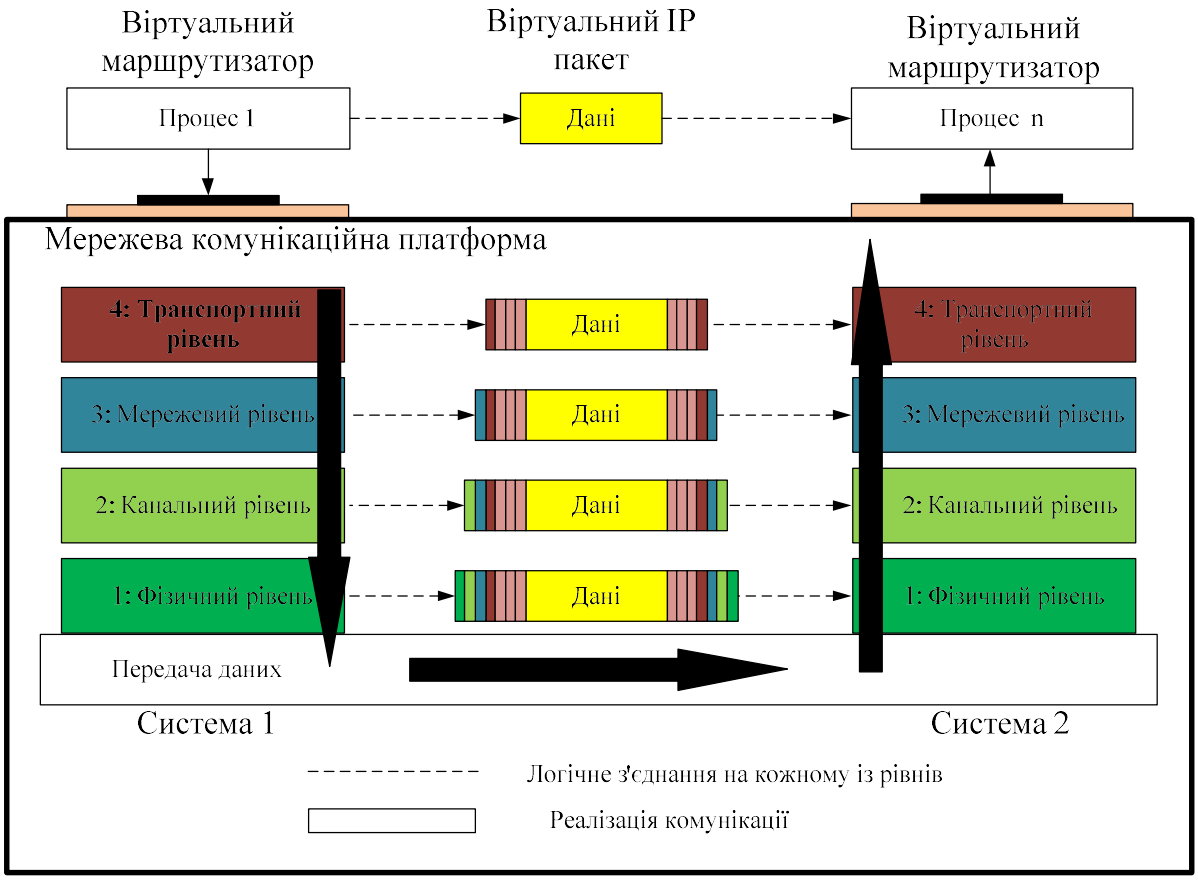


Рис.5. 3 Мережевий стек розробленої тестової платформи

Центральним елементом в архітектурі VNR є буфер без блокування, реалізований на основі бібліотеки Boost версії 1.53. Для кожного класу трафіку у буфері створюється окрема черга з заданою довжиною. Пакети потрапляють в буфер через сокети. Сокет відповідає порту фізичного маршрутизатора. Кожен сокет обробляється в окремому потоці, який читає інформацію по мірі її надходження і створює віртуальний IP-пакет. Коли пакет сформовано, потік

перерахує контрольну суму CRC і записує пакет у чергу буфера відповідно до класу трафіку, після чого потік готується до отримання нового пакету. Завдяки такому механізму, можна моделювати будь-який тип пакету чи протоколу.

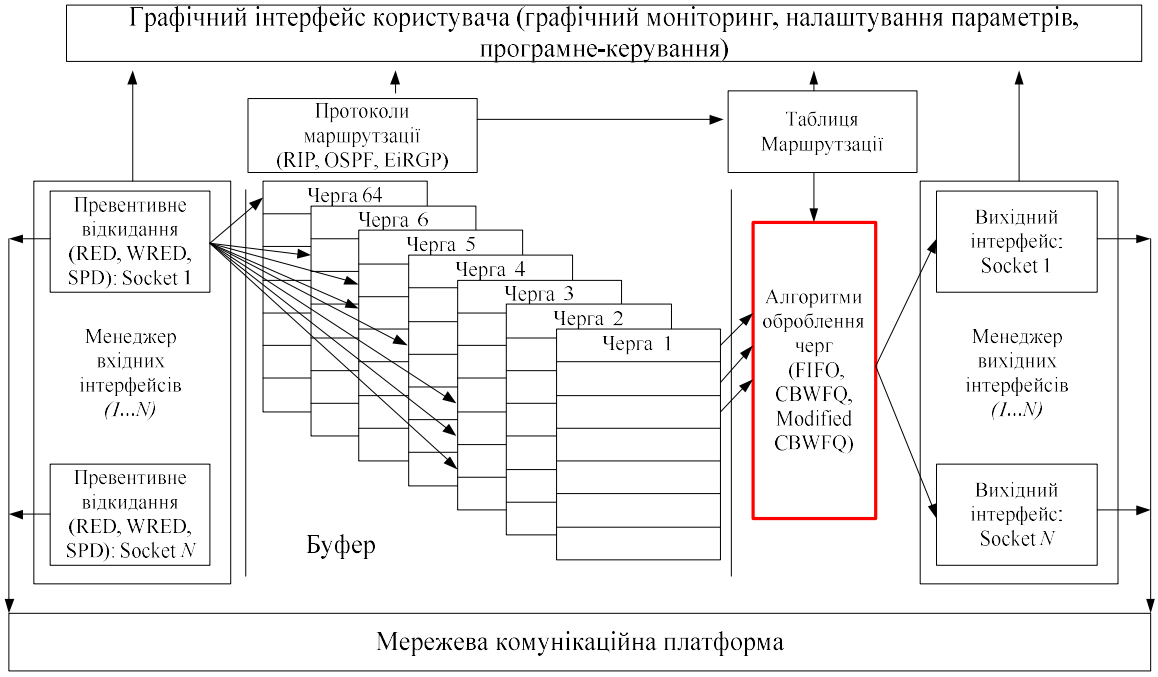


Рис.5.4 Архітектура віртуального мережного маршрутизатора (VNR)

Для зчитування пакетів з буфера використовується окремий потік, який виконує функції маршрутизації. Такий потік може реалізувати будь-який заданий алгоритм обробки черги. Потік зчитує пакет з черги, аналізує його IP-адресу та здійснює її пошук у таблиці маршрутизації. Якщо запис у таблиці маршрутизації знайдено, потік збільшує значення поля TTL на одиницю, а також змінює значення поля ToS, а саме до значення затримки, записаного в цьому полі, додає затримку набуту пакетом у процесі його обробки на поточному маршрутизаторі. Після цього пакет надсилається до пункту призначення через відповідний вихідний порт. Вихідні порти перебувають під керуванням окремого потоку, який реалізує функції менеджера вихідних портів. Користувач має змогу налаштовувати параметри моделі в режимі реального часу за допомогою графічного інтерфейсу, що дає змогу динамічно змінювати швидкість обробки пакетів, правила маршрутизації, параметри

портів та встановлювати маршрути через декілька послідовно з'єднаних мережних пристроїв. Основне вікно для налаштування параметрів VNR відображено на рис.5.6. Для проведення експериментів у роботі створено універсальний генератор трафіку, в основі якого використана розроблена тестова платформа. Використовуючи сокети, генератор підключається до комутатора та створює віртуальні IP-пакети заданого розміру та пересилає їх на віртуальний маршрутизатор. Генератор дає змогу вибрати профіль трафіку в залежності від експерименту. Перший тип генерації це генерація на основі випадкових послідовностей. Для цього бібліотека Boost містить ряд генераторів випадкових чисел, які працюють на основі законів розподілу Ерланга, Паретто та можливість генерувати значення, розподілені за броунівським рухом. Для аналізу мережевого трафіку використано інтрумент під назною TCPUMP. У результаті збору цією утилітою отримано дані про потоки та пакети, що надходили на вибрані порти транспортної мережі Національного університету «Львівська політехніка».

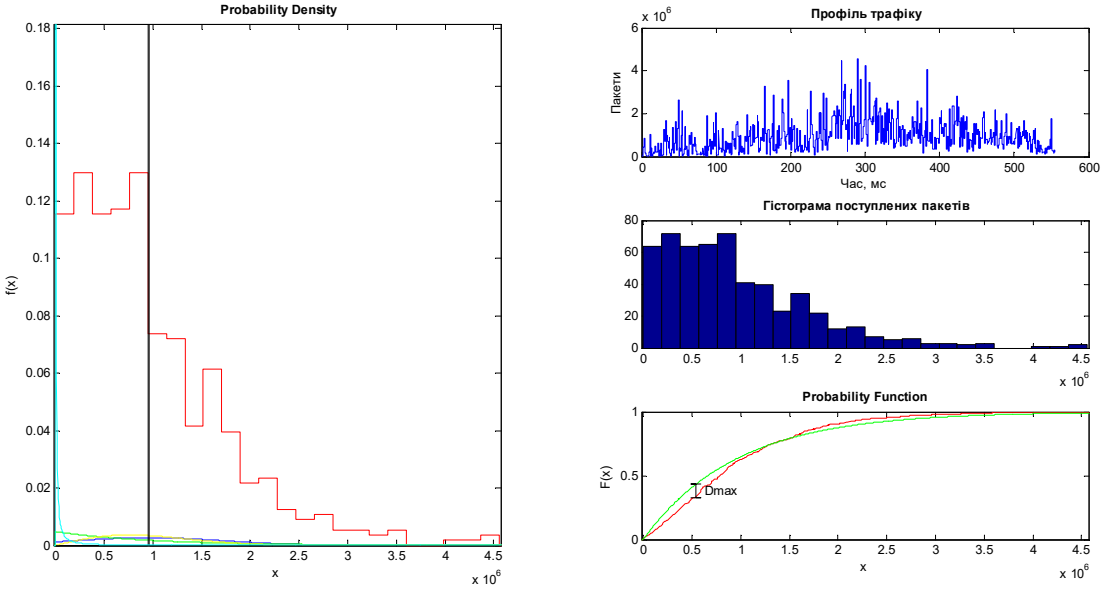


Рис. 5.5. Імовірнісно-статистичний аналіз вихідного трафіку корпоративної інфокомунікаційно мережі

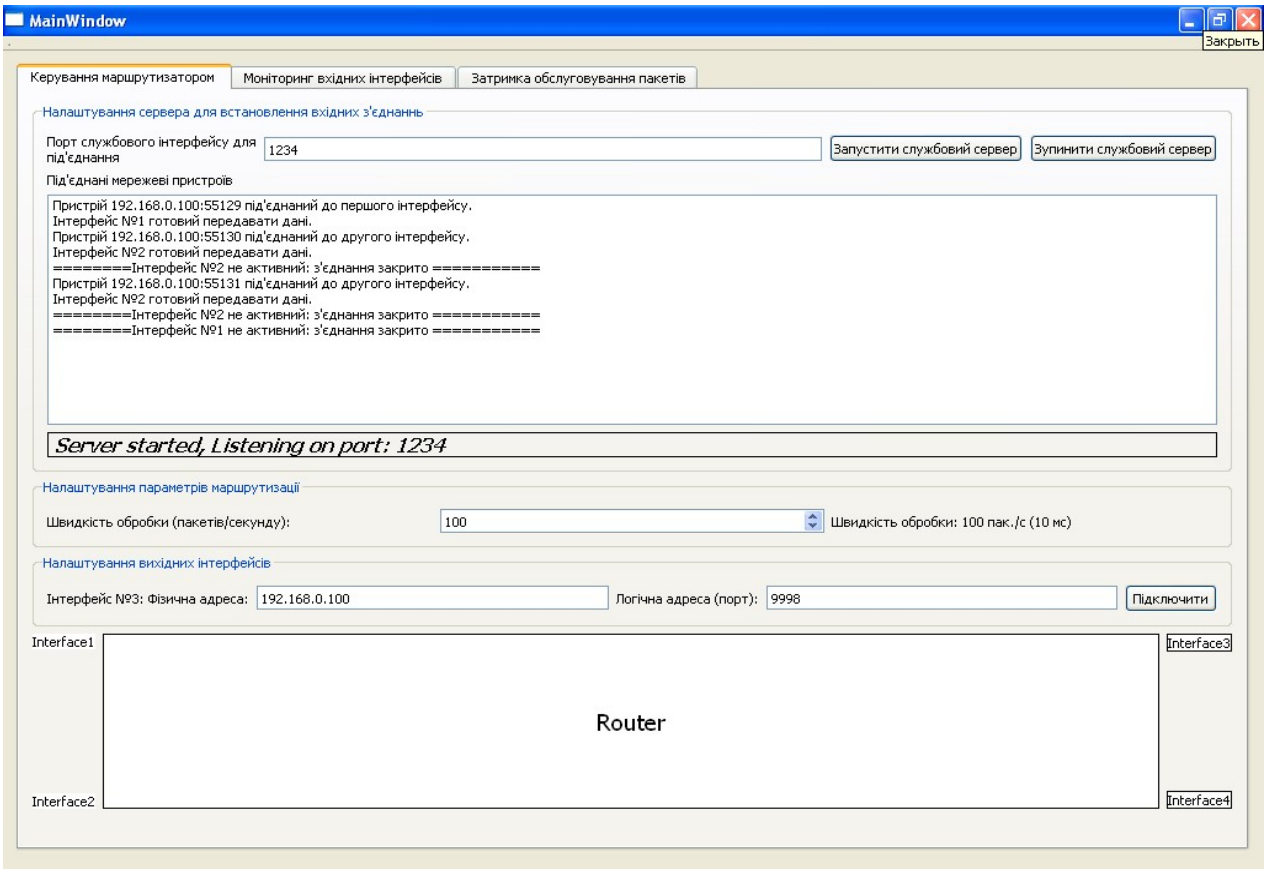


Рис.5. 6. Основне вікно для налаштування параметрів VNR

Збір трафіку проводився протягом чотирьох годин і п'яти хвилин. В результаті аналізу отриманих результатів, виявлено, що у транспортній мережі передається в основному шість класів трафіку, які відповідають специфікації MCE-T. Велика частина трафіку - це потоки реального часу VoIP та IPTV.

5.2 Оцінка точності і адекватності програмного маршрутизатора рівня агрегації з апаратним

Експеримент з 1 апаратним та програмним маршрутизатором

Для підтвердження адекватності розробленого програмного маршрутизатора в роботі проведено порівняльний експеримент тривалостей оброблення пакетів з використанням апаратного (серії 2800 виробника CISCO) маршрутизатора та розробленого програмного.

На протязі 30 хвилин (50000 пакетів) проводилось спостереження за інтенсивністю створюваного вхідного трафіку на інтерфейс реального маршрутизатора серії 2800 виробника CISCO [156-157]. Експериментальна схема показана на рис.5.11.

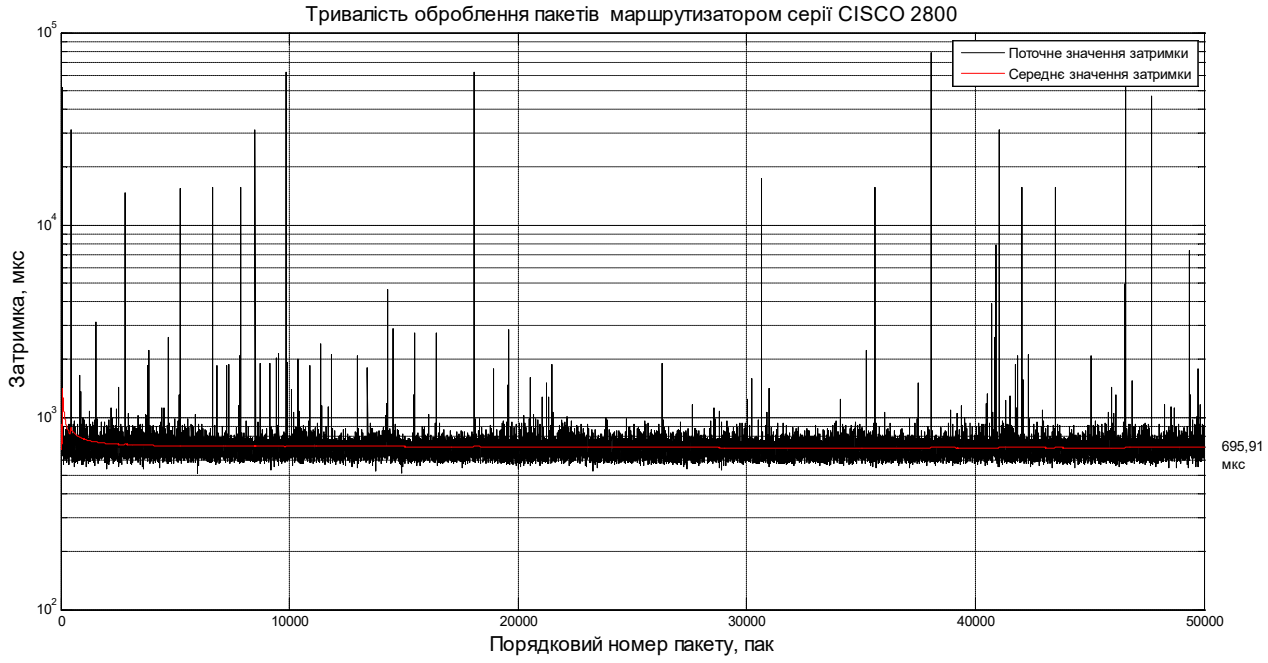


Рис.5.7. Ряд значень тривалості затримки пакетів через маршрутизатор серії 2800 виробника CISCO

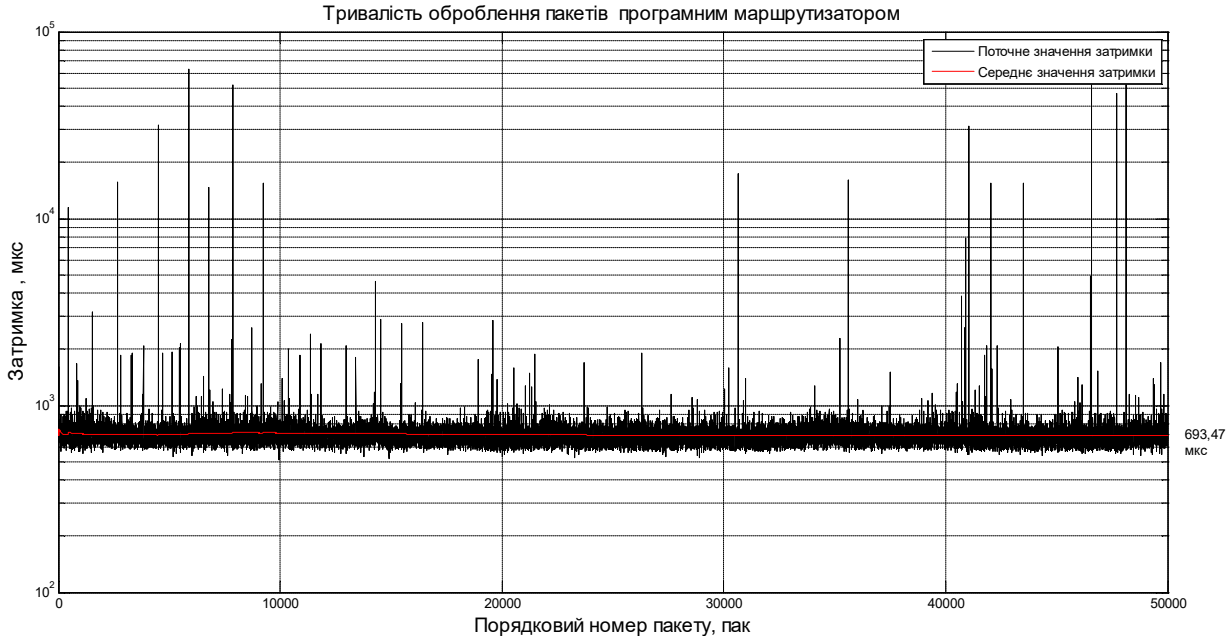


Рис.5.8. Ряд значень тривалості затримки пакетів через програмний маршрутизатор

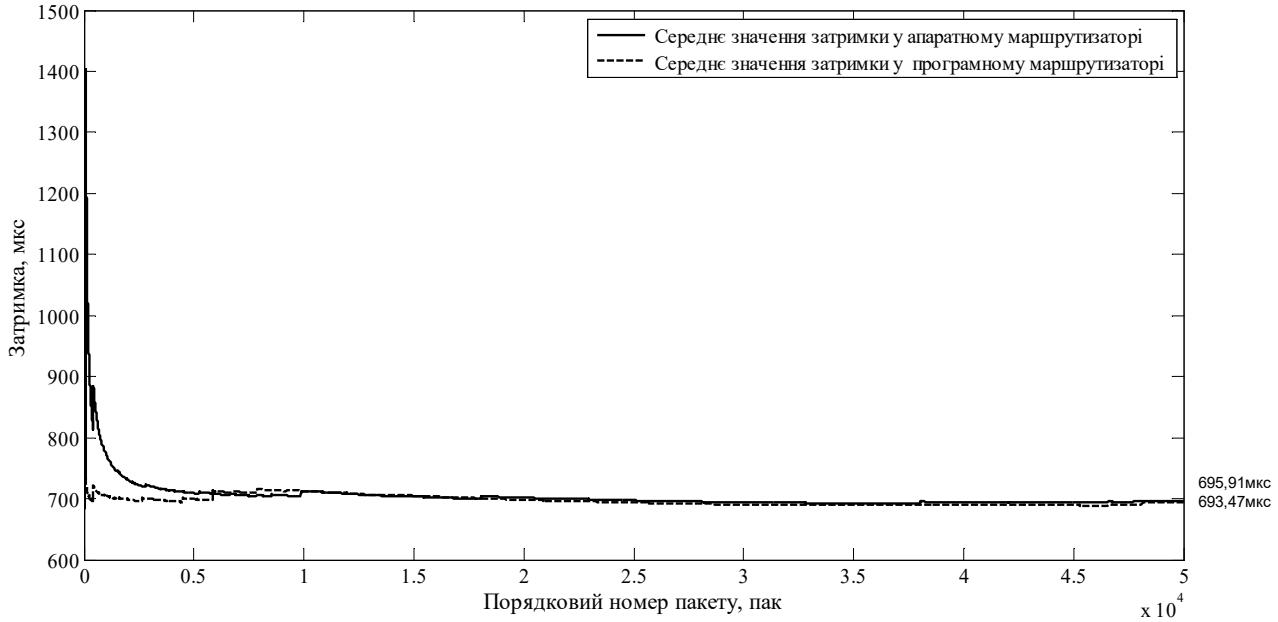


Рис.5.9.Порівняння середніх значень тривалостей оброблення пакетів, внесених програмним та апаратним маршрутизатором

В реальному часі отримано графіки, які відображають ряд значень часу проходження усіма пакетами потоку та функцію щільності ймовірності розподілу цих значень за кількістю з кінця в кінець. Сніфером Wireshark відбувалась фіксація процесу фрагментації, групування та підтвердження доставки пакетів інформаційних потоків. Застосування програми Wireshark дозволило спостерігати за процесом передачі даних крізь маршрутизатор на мережевому рівні з виявленням пакетів сигналізаційних даних та фіксування мережевих аномалій, які впливають на часові показники якості обслуговування трафіку реального часу .

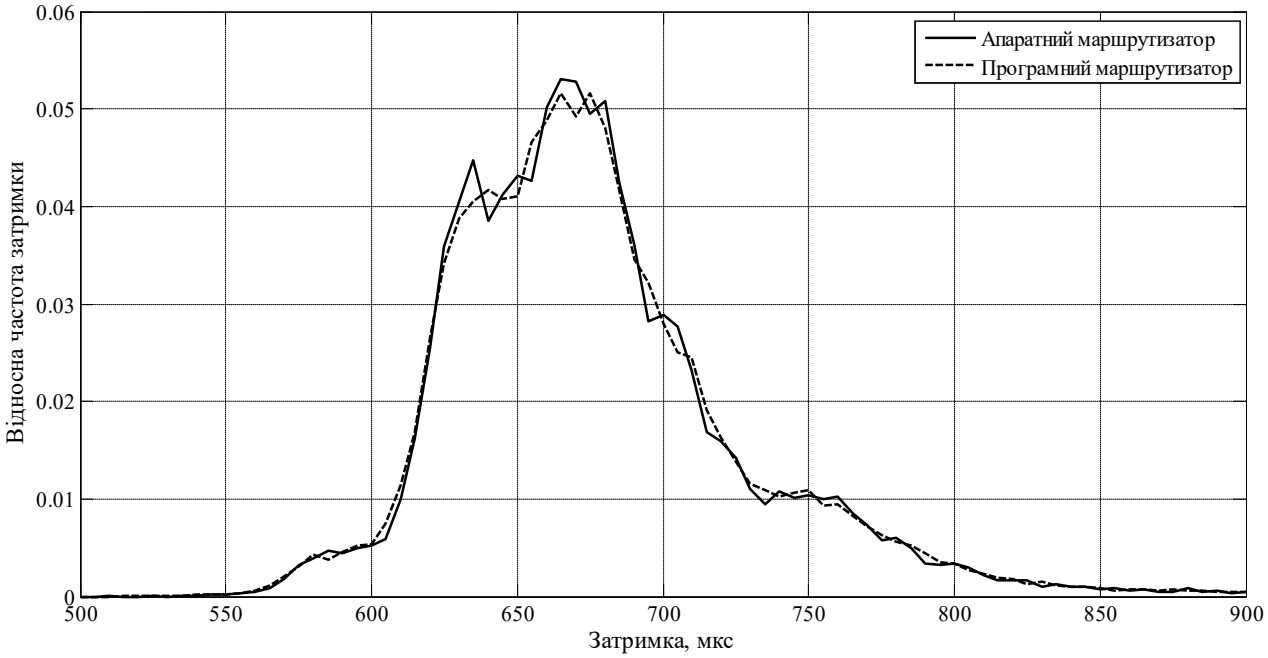


Рис.5.10. Порівняння густини розподілу ймовірностей тривалості оброблення пакетів апаратним та програмним маршрутизатором

Проведені експериментальним шляхом дослідження підтверджують адекватність результатів, отриманих імітаційним моделюванням програмного маршрутизатора з апаратним серії 2800 виробника CISCO. Середнє значення тривалості затримки пакетів апаратним маршрутизатором А становить 695.91 мкс, а через програмний 693.47 мкс при обробленні одного й тогож самого інформаційного потоку. Як бачимо, похибка розробленого програмного маршрутизатора становить 2.44 мкс. Також достовірність отриманих результатів апаратного маршрутизатора описаних розподілом (рис.5.16) підтверджується в порівнянні з розподілом одержаного в роботі [10].

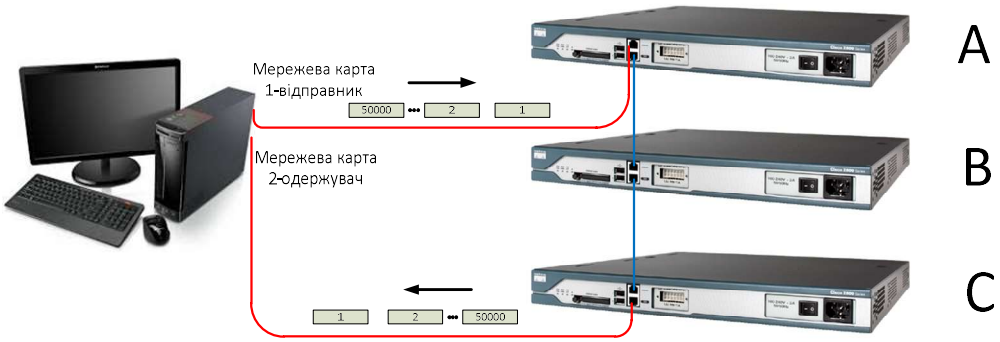


Рис.5.11. Експериментальний макет для визначення тривалості оброблення пакетів апаратним маршрутизатором

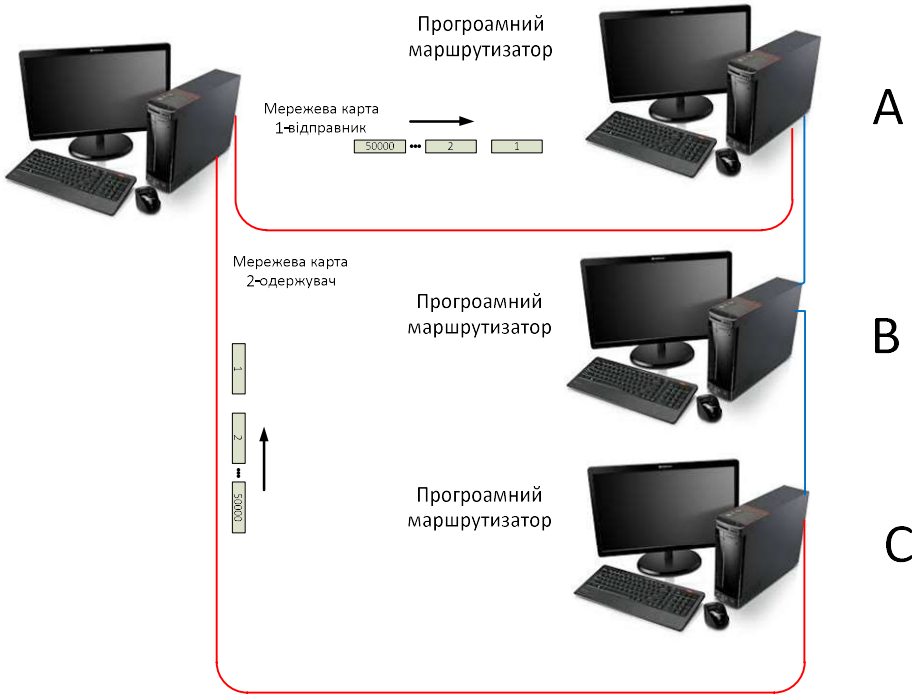


Рис.5.12. Експериментальний макет для визначення тривалості оброблення пакетів програмним маршрутизатором [10]

Для точнішого отримання результатів часової затримки пакетів, створюваних маршрутизатором серії 2800 виробника CISCO, проведено експеримент, коли інформаційний потік проходив через маршрутизатори A, A-B та A-B-C

Експеримент з 2-ма апаратними та програмним маршрутизатором

Для дослідження часової затримки через маршрутизатори А-В в експерименті конфігуровано мережу з двох мережевих пристроїв серії 2800 виробника CISCO та підключенням до них генератора трафіку, встановленого на персональному комп'ютері із двома мережевими картами для обчислення різниці між відправленням та отриманням пакету.

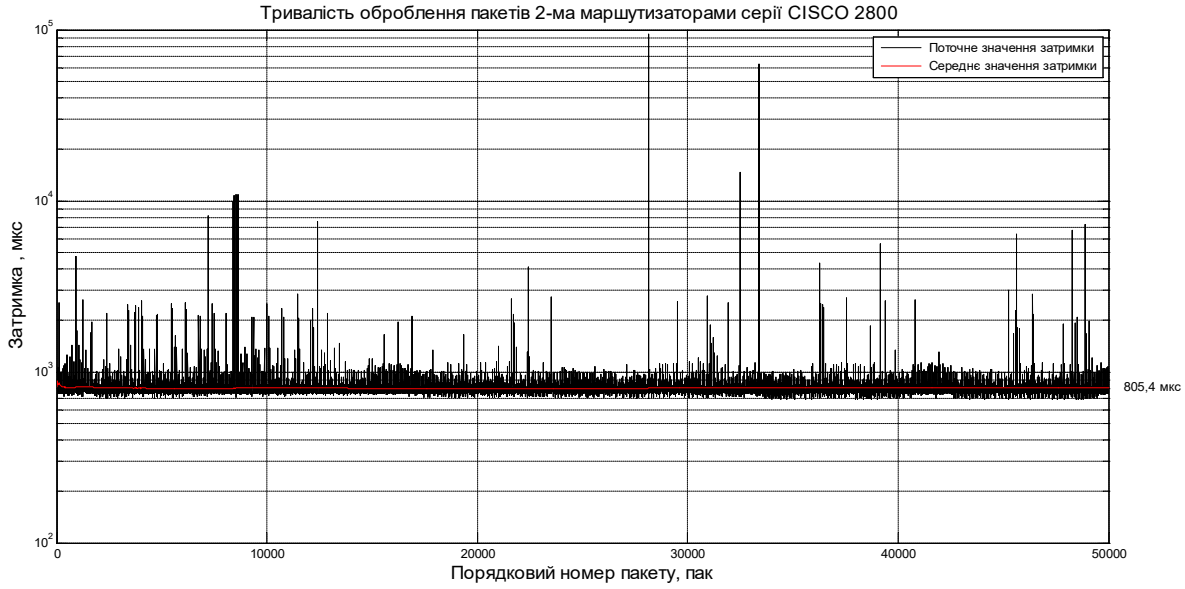


Рис.5.13. Ряд значень тривалості затримки пакетів через 2 маршрутизатори серії 2800 виробника CISCO

Рис.5.14. Ряд значень тривалості затримки пакетів через 2 програмних маршрутизатора

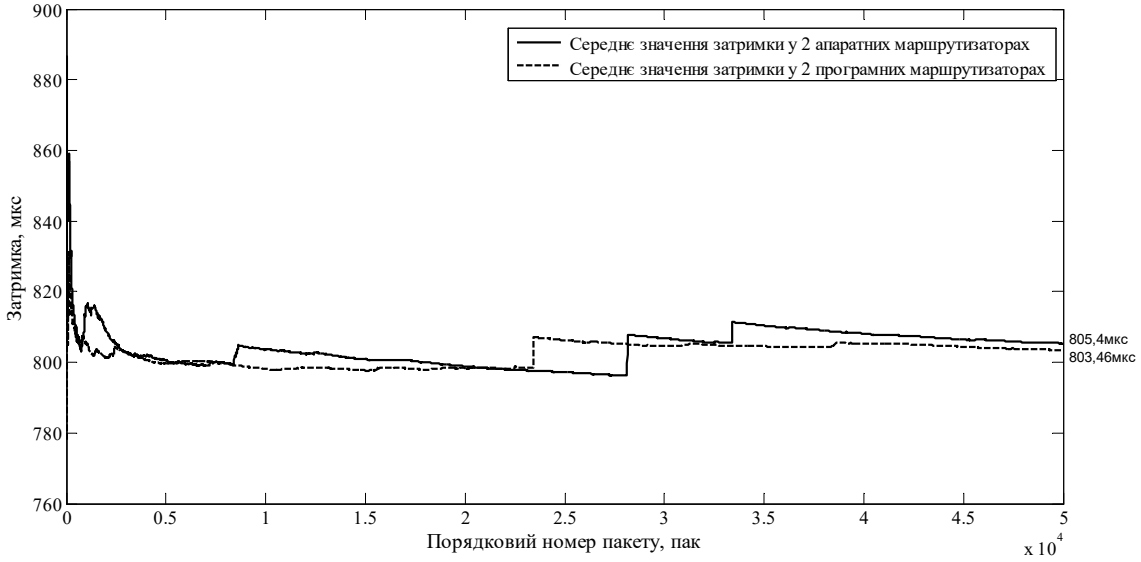


Рис.5.15.Порівняння середніх значень тривалостей оброблення пакетів внесених двома програмним та апаратним маршрутизаторами

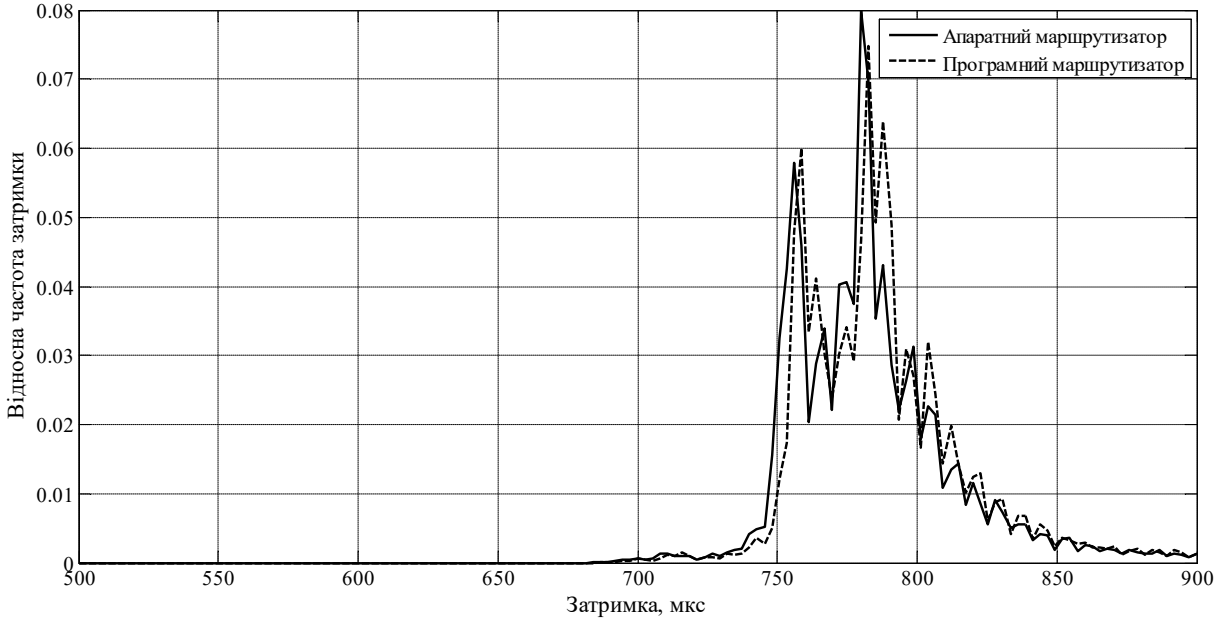


Рис.5.16. Порівняння густини розподілу ймовірностей тривалості оброблення пакетів двома апаратними та програмними маршрутизаторами

В експериментальному дослідженні встановлено, що через передавання цього ж трафіку через два апаратні маршрутизатори середня тривалість

оброблення пакетів становить 805.4 мкс, відповідно тривалість оброблення пакетів через 2 програмних маршрутизатори становить 803.46 мкс (рис.5.15.). Як бачимо при порівнянні часових затримок похибка становить 1.94 мкс, приблизно співпадає з даними першого експерименту. Проте потрібно зосередити увагу на середніх значеннях часових затримок пакетів при 1 і 2 досліді, оскільки значення затримки внесених апаратними маршрутизаторами при проведенні 2 досліду відрізняються на 805.4 – 695.91=109.49 мкс. Проведеним експериментом встановлено, що затримка одним маршрутизатором серії 2800 виробника CISCO становить 109,49 мкс, а затримка 586,42 вноситься операційною системою комп'ютера та залежить від системної продуктивності сервера. При проведенні досліду на менш потужному сервері з одноядерним процесором, частотою 2.4 Ггц та 1Гб RAM системна затримка зросла у 1.8 рази. З рисунка 5.5 бачимо, що функція щільності ймовірності значень тривалостей оброблення пакетів програмних маршрутизаторів наближається до функції щільності ймовірності апаратних маршрутизаторів серії CISCO 2800.

Експеримент з 3-ма апаратними та програмними маршрутизаторами

Для точнішої оцінки тривалості обробки пакетів реальним маршрутизатором та визначення часової затримки з кінця в кінець проведено експеримент з використанням 3-х маршрутизаторів, які обробляли інформаційний потік. Мережа налаштовулась в 215 лабораторії CISCO XI навчального корпусу Національного університету "Львівська політехніка". Маршрутизатори конфігурувались з алгоритмом обслуговування черг FIFO, який виставлений по замовчуванню. Після проведення налаштування макету здійснювалось спостереження за тривалістю обробки пакетів протягом 30 хв.

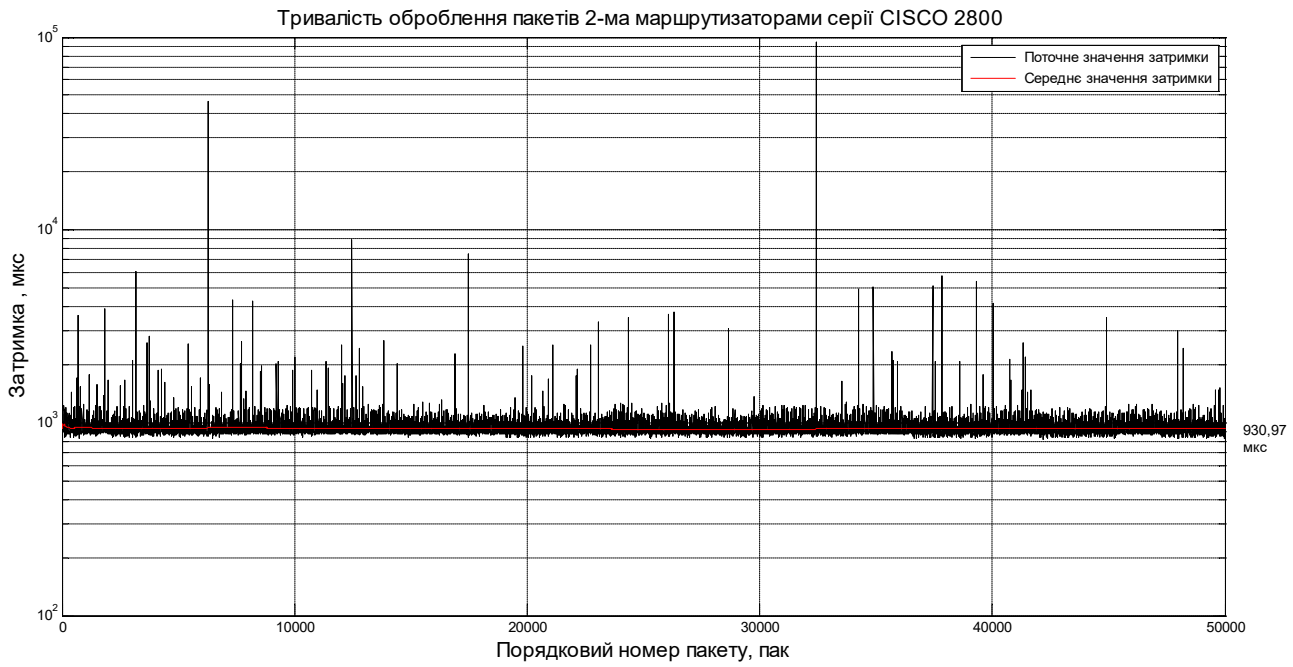


Рис. 5.16. Ряд значень тривалості затримки пакетами через 3 маршрутизатори серії 2800 виробника CISCO

Рис. 5.17.Ряд значень тривалості затримки пакетів через 3 програмних маршрутизатора

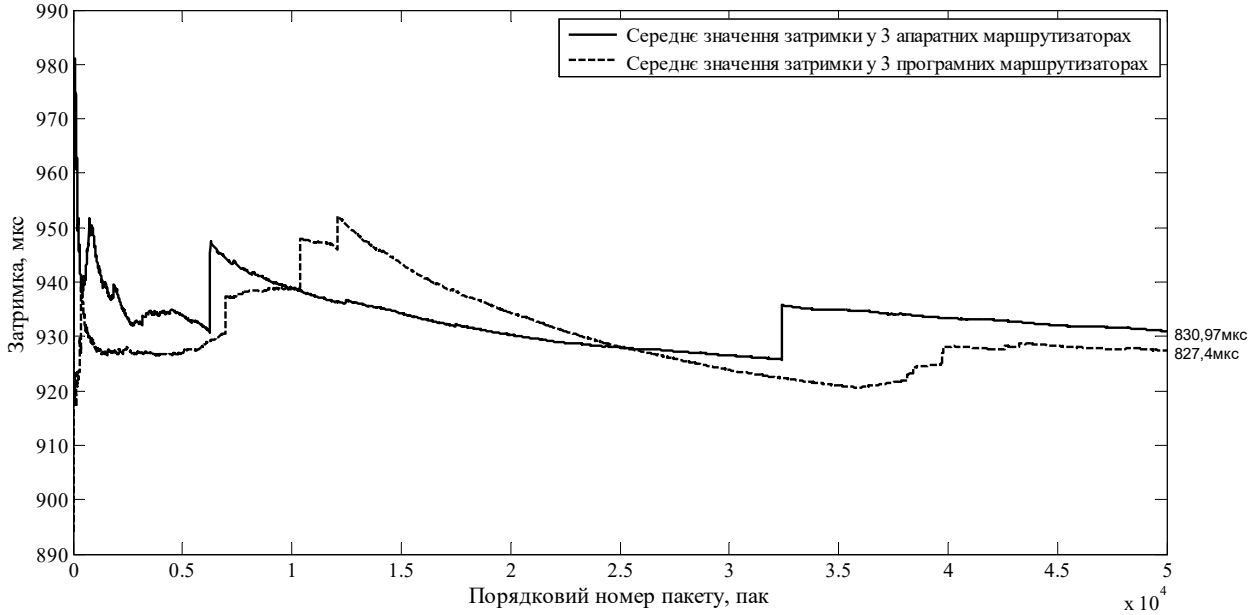


Рис.5.18.Порівняння середніх значень тривалостей оброблення пакетів внесених 3-ма програмними та апаратними маршрутизаторами

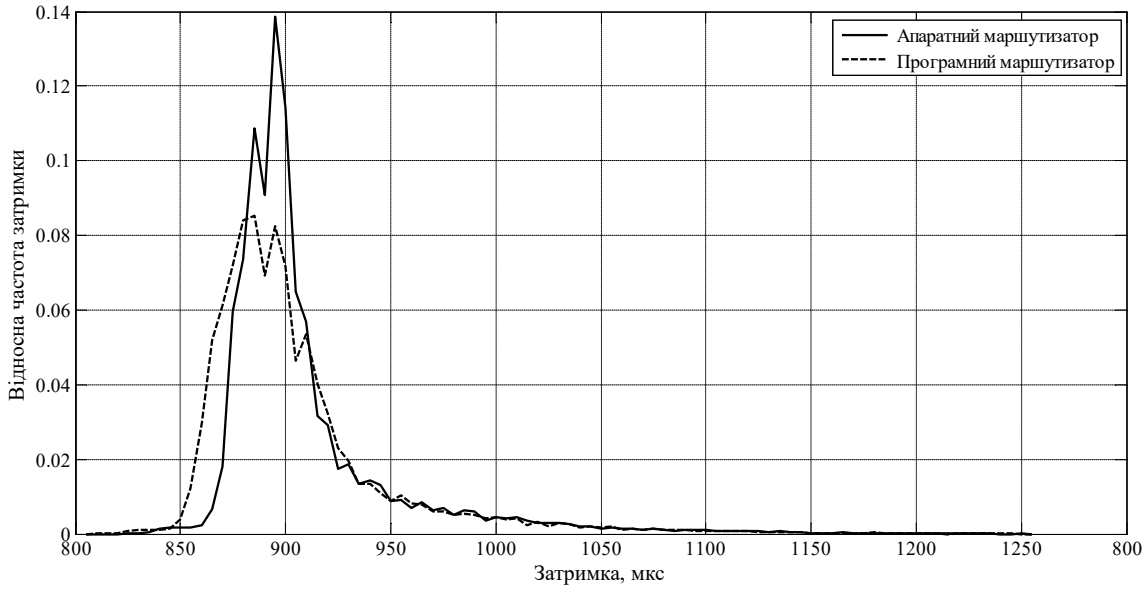


Рис.5.19. Порівняння щільності розподілу ймовірностей тривалості оброблення пакетів 3- ма апаратними та програмними маршрутизаторами

Після проведення експерименту середні значення тривалості затримки пакетів апаратними маршрутизаторами становить 930.97 та через програмні 927.4 мкс.

Похибка становить 3.57 мкс. Функція щільності ймовірності тривалостей затримки програмних маршрутизаторів наближається до функції щільності ймовірності часових затримок створюваними реальними маршрутизаторами. Оцінка середньої тривалості затримки пакетів апаратним маршрутизатором при проведенні 3-х експериментів визначається, як.

$$T_{cp} = \frac{(T_{(A-B)_2} - T_{(A)_1}) + (T_{(A-B-C)_3} - T_{(A-B)_2})}{2}. \quad (5.1)$$

Підставивши отримані значення у формулу 5.1 отримаємо Тср = ((805.4 – 695.91) +(930.97-805.4))/2=117.53 мкс.

5.3 Налаштування тестової платформи мережі нового покоління та постановка експерименту для оцінка ефективності удосконаленого алгоритму оброблення черг

Для перевірки ефективності запропонованого алгоритму CBWFQ було налаштовано тестову платформу відповідно до схеми на рис.5.20

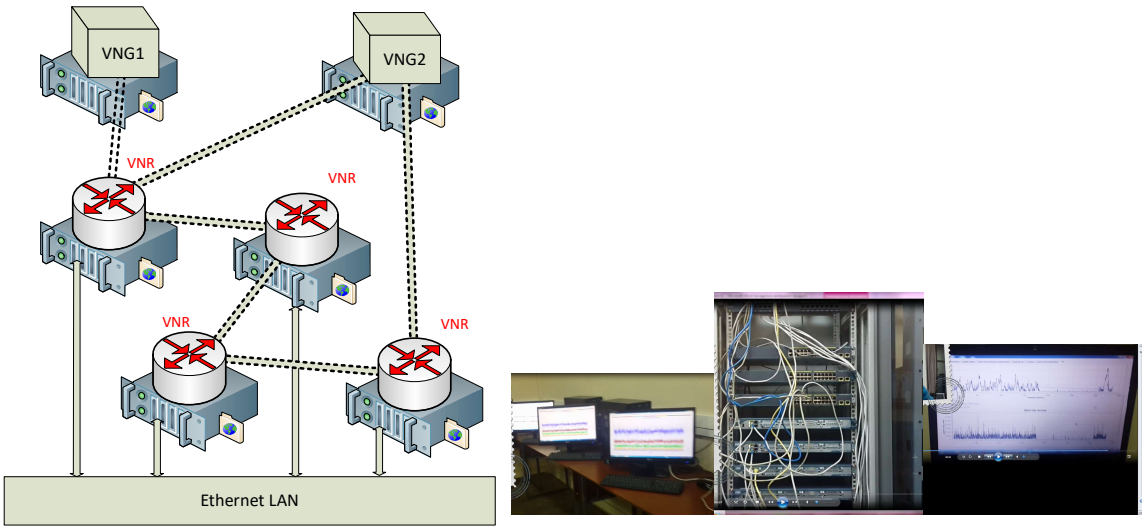


Рис.5.20. Схема налаштування тестової платформи для перевірки ефективності запропонованого алгоритму CBWFQ [33, 45-46]

Побудована тестова платформа складається з чотирьох маршрутизаторів, які з’єднані між собою, і з двох генераторів трафіку. Кожен маршрутизатор і

генератор встановлюється на окрему фізичну машину, параметри якої є такими: модель процесора Intel E2200, обсяг оперативної пам'яті 3 Гб. Всі фізичні машини з'єднані за допомогою однієї локальної мережі, максимальна швидкість каналів якої становить 100 Мбіт/с. Кожен маршрутизатор налаштований таким чином, щоб обробляти в середньому 100 пакетів в секунду зі всіх вхідних інтерфейсів. Це означає, що для обробки одного пакету потрібно близько 10 мілісекунд. Така продуктивність вибрана з метою візуального відображення процесу обслуговування пакетів у реальному часі. Відповідно до цього були налаштовані генератори трафіку. Для оцінки ефективності алгоритму CBWFQ створено маршрут, який проходить через усі створені маршрутизатори. Цей маршрут починається з генератора (VNG1) і проходить через усі VNR. Останній VNR відправляє усі пакети знову до VNG1. VNG має порт, що дозволяє отримувати пакети. Таким чином, VNG може відмітити пакет і, отримавши його назад, обчислити загальну затримку (RTT – час обходу петлі) пакету вздовж маршруту. VNG1 призначений для генерування мультисервісного трафіку. Профіль трафіку отриманий внаслідок моніторингу реальної транспортної мережі. Профіль трафіку представлений на рис.5.21

Рис.5.21. Профіль мультисервісного трафіку, що генерується першим генератором

Другий генератор (VNG2) налаштовано на генерацію одного потоку IPTV з міжпакетним інтервалом, що дорівнює 20 мс. Розмір кожного пакету в цьому потоці - 1400 байт. Параметри для генерації цього потоку взято на основі усереднення параметрів IPTV потоків, отриманих внаслідок моніторингу локальної мережі за допомогою WireShark. Цей експеримент дає змогу показати, що CBWFQ може гарантувати мінімальну затримку пакетів в режимі реального часу, навіть для тих пакетів, які вже зазнали критичної затримки. Таким чином, значення критичної затримки для цього IPTV потоку вибрано 100 мс в кожному маршрутизаторі. Другий генератор налаштований таким чином, щоб цілеспрямовано вносити випадкову затримку в усі пакети IPTV потоку, що дає змогу наочно оцінити ефект роботи алгоритму CBWFQ. Варто зазначити, що кожен віртуальний маршрутизатор дає змогу динамічно включати та виключати алгоритм CBWFQ прямо у процесі обслуговування трафіку. Моделювання проводилося протягом 200 секунд. Інтенсивності потоків з першого та другого генераторів відображено на рисунках 5.22 та 5.23

Рис.5.22. Агрегований мультисервісний трафік з першого генератора

Отримані графіки дають змогу спостерігати, що середня кількість пакетів, що надходили до першого маршрутизатора, становила 100 пакетів. Таким чином, пакети, які неможливо обробити одразу, записуються в буфер.

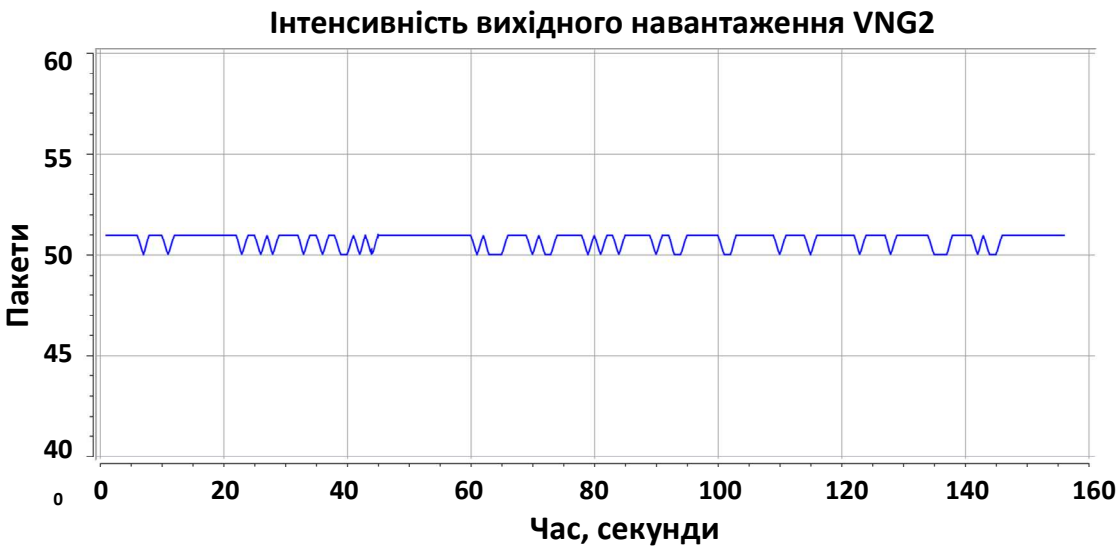


Рис. 5. 23. IPTV потік, отриманий з другого генератора

На графіках (рис.5.24 та рис.5.25) відображено тривалість обходу петлі пакетами. На 5.24 відображено тривалість обходу петлі кожним пакетом, що повернувся на перший генератор, а на рис. 5.25– тривалість обходу петлі кожним пакетом згенерованого IPTV потоку на другому генераторі. Експеримент складався з двох етапів. На першому етапі алгоритм CBWFQ був вимкненим на всіх VNR. Другий етап розпочався через 80 після першого етапу, у якому CBWFQ було включено.

Рис.5. 24.Тривалість обходу петлі пакетами агрегованого потоку на першому генераторі VNG1

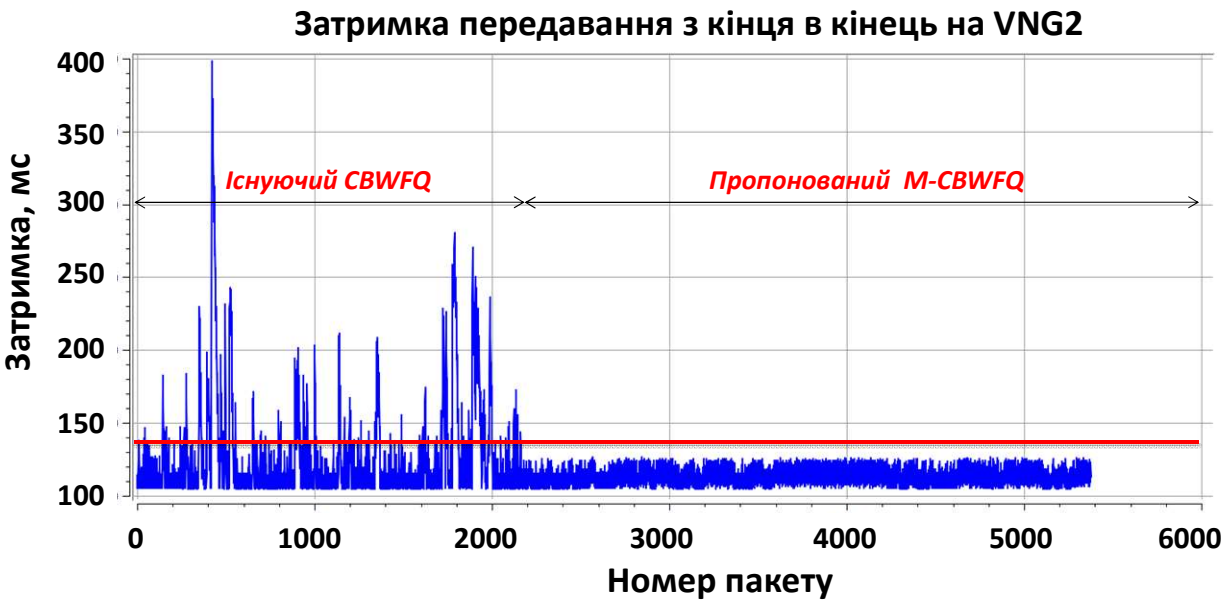


Рис.5.25. Тривалість обходу петлі пакетами IPTV потоку на другому генераторі [48]

На першому етапі експерименту, середнє значення тривалості обходу петлі для пакетів агрегованого трафіку складається як із затримки пакетів IPTV потоку, так і з затримки пакетів агрегованого потоку. З отриманих графіків тривалості обходу петлі для IPTV потоку можна зробити висновок, що затримка пакетів IPTV в деякі моменти зростала до 150-200 мс, що на 100 мс більше, ніж критична затримка. На другому етапі, коли включено алгоритм CBWFQ, середня затримка пакетів IPTV потоку суттєво зменшилася. Враховуючи, що значення початкової затримки пакетів IPTV потоку було встановлено в 100 мс, кожен віртуальний маршрутизатор оцінював затримку, набуту кожним окремим пакетом, та зберігав ці пакети у відповідну чергу. Пакети IPTV потоку, затримка яких перевищувала критичну, маршрутизатор зберігав у високопріоритетну чергу і безперервно обслуговував цю чергу аж до моменту коли черга ставала пустою. Після цього маршрутизатор знову перемикався на обслуговування пакетів з низькопріоритетних черг [48].

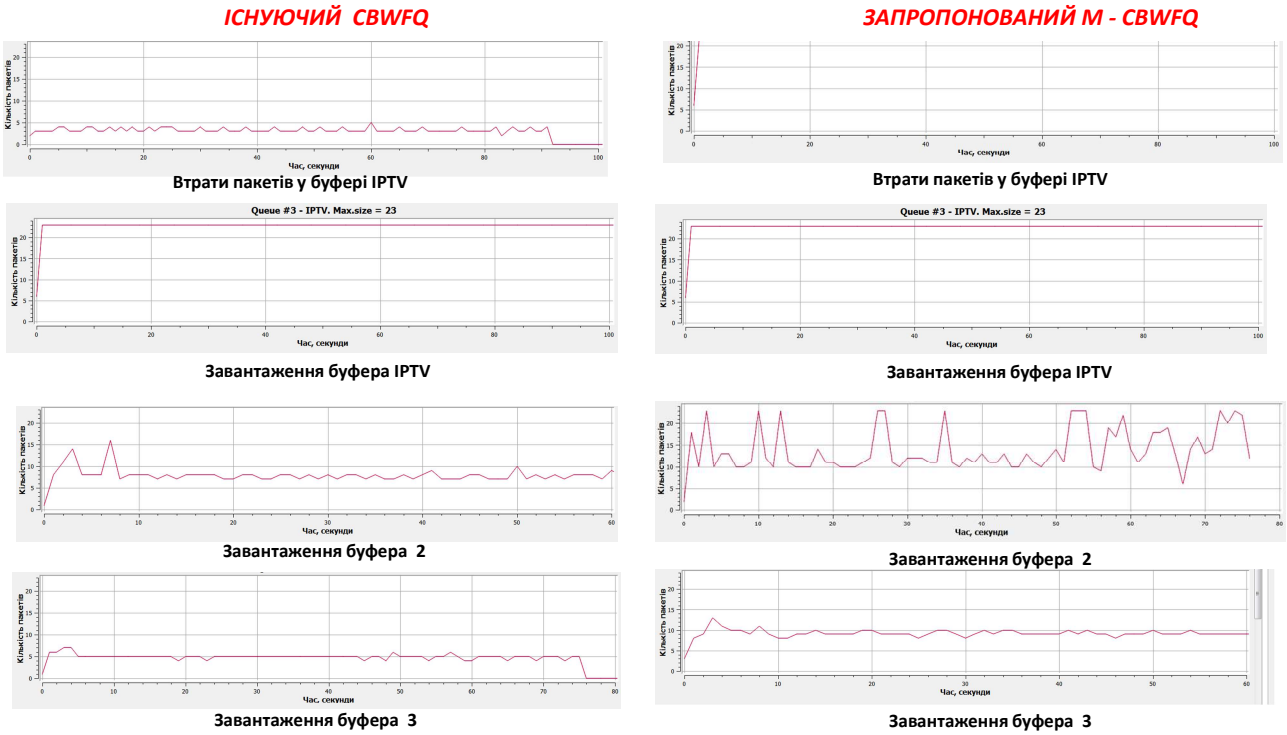


Рис.5.26. Завантаження буферів та втрати до і після застосування модифікованого алгоритму обслуговування черг

Запропоновані рішення дозволять виробляти динамічне адаптивне налаштування системи управління якістю обслуговування, забезпечуючи гарантовану якість усім інфокомунікаційним послугам в мережах нового покоління, побудованих на програмно-керованих маршрутизаторах та комутаторах..

Висновки до 5-го розділу

1. Для оцінки ефективності запропонованих рішень у роботі, створено віртуальну тестову платформу мережі нового покоління з використанням інструменту QtCreator (версія 5.2). Перевагою цього інструменту є те, що створені на її основі програми можуть бути скомпільовані для роботи на будь-якій операційній системі, наприклад, Windows, Linux або Mac. Щоб повністю абстрагуватися від канального рівня, створено віртуальний IP-пакет, з яким можуть працювати вузли тестової платформи.

2. На основі розробленої тестової платформи, розроблено модель віртуалізованого програмно-керованого маршрутизатора, який володіє функцією адаптивного вибору алгоритму обслуговування черг в умовах виникаючого явища випадкового сплеску трафіку характерного для мультисервісних мереж нового покоління. Адекватність розроблених моделей підтверджено на основі дослідження імовірнісних властивостей трафіку мультисервісної корпоративної мережі.

3. В результаті проведення імітаційного і практичного експерименту доведено, що застосування розроблених моделей та методів надання іфокомунікаційних послуг в мережах нового покоління, призведе до покращення якості обслуговування потоків реального часу, в середньому у 2 рази знизить затримку обслуговування та зменшить ймовірність втрат пакетів на 3%.

РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ МЕРЕЖНИХ ПРИСТРОЇВ В КОРПОРАТИВНУ ІНФРАСТРУКТУРУ

6.1 Реалізація механізму віртуалізації мережевого пристрою в корпоративній інфраструктурі

Технологія віртуальної маршрутизації магістральних мереж, яка є одним із сучасних досягнень в галузі обладнання магістральних IP-мереж, дає основу для масштабних змін у сфері надання послуг різного роду за допомогою мережі Internet.

Також важливою ланкою є віртуальні маршрутизатори. Саме вони дадуть можливість для нових послуг Internet, які будуть ізольовані від трафіку, який створюють інші послуги у мережі та забезпечать контроль над продуктивністю, маршрутами та адмініструванням адрес, за допомогою управління та мережевої безпеки.

Такі віртуальні магістральні маршрутизатори можна сформувати за допомогою логічного розбиття звичайних маршрутизаторів. Кожен з таких маршрутизаторів може працювати зі своїми протоколами маршрутизації, власною буферною пам’яттю, виділеними портами вводу/виводу, власною таблицею маршрутів, адресним простором та програмами управління мережею.

Гнучка конфігурація і простота розгортання віртуальних маршрутизаторів забезпечує значну економію на операційних витратах [46, 214]. Ці маршрутизатори працюють на віртуальній машині, встановленій на звичайному сервері x86, так само як і інші віртуальні додатки. А у відповідності до зростання вимог щодо продуктивності, ресурси на маршрутизаторах можуть динамічно виділятися та нарощуватися [233-238].

Служби, що використовують віртуальні магістральні маршрутизатори, дають клієнту можливість встановлювати контроль над приватними магістральними мережами та надавати їм належний рівень безпеки без значних

витрат. Також вони надають змогу організовувати віртуальні моно-сервісні мережі із мультисервісних (рис. 6.1). В такому випадку, при використанні мультисервісних мереж, завдання щодо визначення моделі вхідного трафіку спрощується.

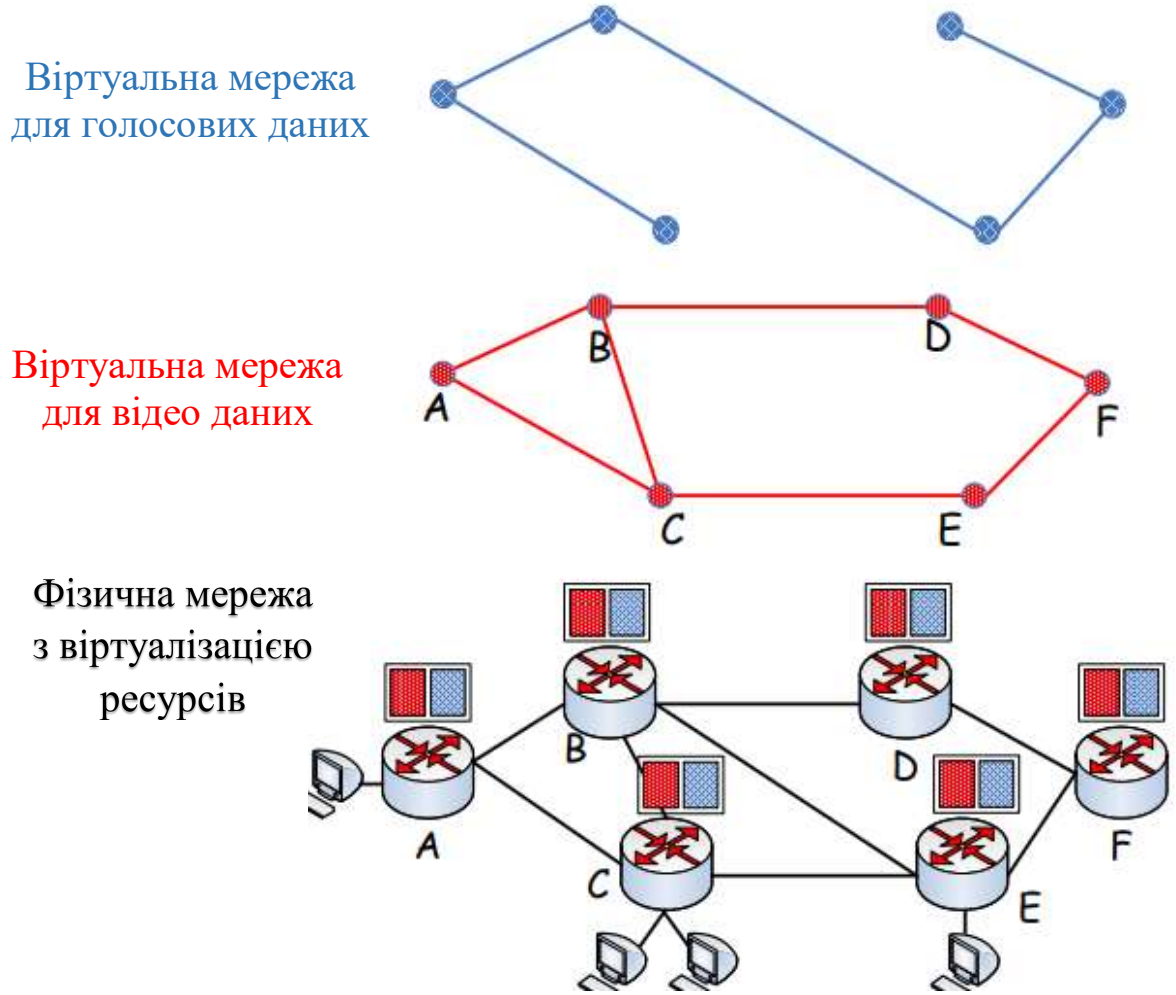


Рис.6.1. Мережева віртуалізація з декомпозицією на моносервісні мережі [7]

Програмне забезпечення, що управляє віртуальною маршрутизацією, має модульну структуру, використовується кілька примірників ПЗ (по числу віртуальних маршрутизаторів), які виконуються в операційній системі, наприклад Unix, Linux, розподіляючи обробку по процесам. Процеси кожного віртуального маршрутизатора ізольовані і захищені від інших процесів; для цього залучаються додаткові ресурси для управління процесами і захисту пам'яті, що належать операційній системі. Так досягається високий рівень

безпеки: який би програмний модуль не дав збій, він не зможе пошкодити дані на іншому віртуальному маршрутизаторі.

Технологія віртуальної маршрутизації дає змогу на кожному віртуальному маршрутизаторі запустити свій екземпляр програм підтримки протоколів маршрутизації (наприклад, Open Shortest Path First, Border Gateway Protocol, Intermediate System to Intermediate System) і програмних засобів управління мережами (скажімо, SNMP). Таким чином, користувач може займатися моніторингом і адмініструванням будь-якого віртуального маршрутизатора незалежно від інших.

Використання окремих екземплярів ПЗ підтримки протоколів означає, що для кожного віртуального маршрутизатора створюється повністю ізольований домен IP-адрес, який можна налаштовувати незалежним чином, не побоюючись будь-яких конфліктів. За допомогою функцій управління можна контролювати конфігурацію і процес роботи кожного віртуального маршрутизатора як окремого, самостійного об'єкта. Модель безпеки, орієнтована на користувача, також гарантує, що всі функції мережевого управління та інформація, що відноситься до конкретного віртуального маршрутизатора, будуть доступні лише власникам певних повноважень доступу.

Канал пересилання пакетів кожного віртуального маршрутизатора може бути ізольований від інших каналів, так що адміністратори можуть регулювати продуктивність кожного віртуального маршрутизатора окремо, незалежно від інших. Якщо через якийсь віртуальний маршрутизатор в системі пройде трафік більший, ніж зазвичай, то це ніяк не позначиться на роботі інших маршрутизаторів. У підсумку всім кінцевим користувачам даної служби гарантується єдиний рівень обслуговування. Можлива і організація спільного наналу для передавання потоків через віртуальні маршрутизатори. В такому випадку відбувається управління процесорним часом обслуговування потоків. Тоді з’являється можливість гнучко управляти обчислювальними ресурсами фізичного маршрутизатора. На сьогоднішній час відбувається інтенсивний

розвиток телекомунікаційного обладнання. Сучасне апаратне обладнання має потужні обчислювальні ресурси з використанням багатоядерних процесорів [49, 240-241]. Відповідно, є змога для кожного віртуального маршрутизатора виділяти окремі фізичні ядра, а також робити багатофункціональні мережеві пристрої із розгортанням на них віртуальних маршрутизаторів та фаєрволів.

Планування виконання завдань (англ. Scheduling) є однією з ключових концепцій багатозадачності в багатопроцесорних системах, як в операційних системах загального призначення, так і в операційних системах реального часу. Планування полягає в призначенні пріоритетів процесам в черзі на обслуговування. Утиліта, що виконує це завдання, називається планувальником (англ. Scheduler).

Максимальне завантаження доступних ресурсів – основна мета планування завдань. Для цього планувальник повинен звертати увагу на:

- Використання процесора(-ів) — при можливості давати завдання процесору.
- Пропускну здатність — кількість всіх процесів, які виконуються за одиницю часу.
- Час на завдання — кількість часу, яку потрібно для повного виконання певного процесу.
- Час відповіді — час, який проходить від подання запиту до першої відповіді на запит.
- Очікування — кількість часу, яку процес очікує в черзі.
- Справедливість — рівність процесорного часу для кожного процесу.

У роботі пропонується розглядати варіант віртуалізації мережевого пристрою шляхом встановлення програмного маршрутизатора на сервер з одним фізичним ядром. Таким чином, дослідити принцип функціонування віртуальних маршрутизаторів можна, використовуючи управління процесорним часом для кожного процесу. Для цього необхідно визначити, який ресурс

процесора використовується процесами операційної системи Linux-Ubuntu 14.04. Визначено, що загальна кількість системних процесів становить 166, які використовують процесор в межах на 6-7% (рис.6.2). Тому при розгортанні віртуальних маршрутизаторів, для оброблення потоків голосу, відео і даних буде виділено приблизно 90% CPU процесора. У нашому випадку крім 166 системних процесів з’явиться, ще один процес, який міститиме у собі декілька потоків. У кожному потоці виконується окремий віртуальний маршрутизатор, призначений для обслуговування різних типів трафіку.

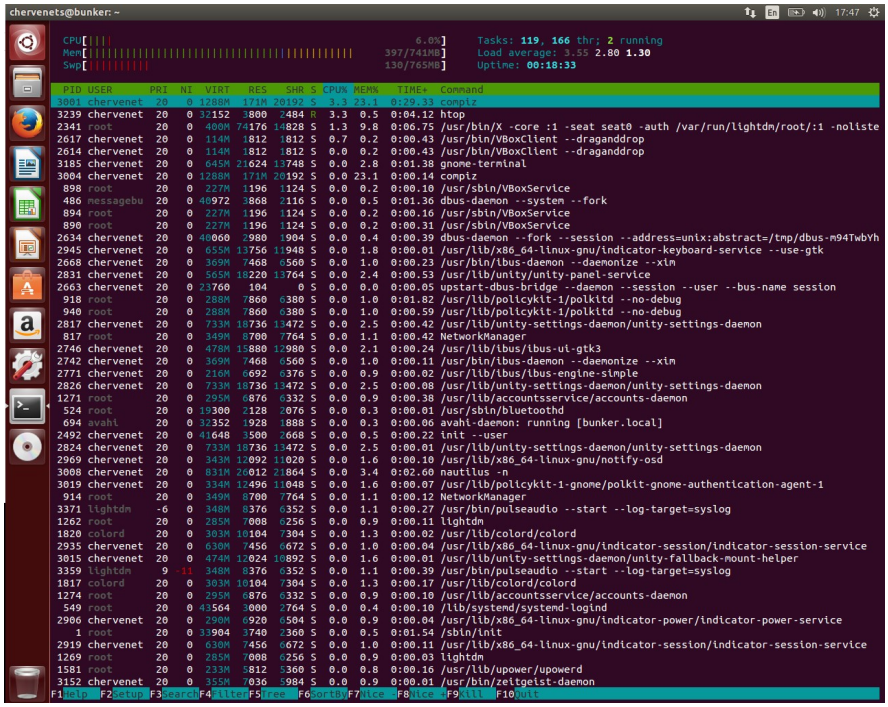


Рис.6.2. Оцінка завантаженості процесора системними процесами

Використання віртуальних маршрутизаторів дає змогу динамічно і з високою точністю задовольняти потреби сервісів в ресурсах смуги пропускання одночасно надаючи користувачу максимальний контроль над виділеною відповідному сервісу пропускною здатністю; все це дозволяє прогнозувати появу безлічі різноманітних, гнучко конфігурованих IP-служб, які можуть кардинально змінити підходи провайдерів і клієнтів до сфери послуг, що надаються на умовах оплати певної частини смуги пропускання [9].

6.2 Розробка програмного маршрутизатора з модульною структурою

На сьогоднішній час актуальним завданням є оптимізація конфігурованих параметрів маршрутизатора та аналіз ефективності функціонування мережі передавання даних.

Оцінити трафік, створюваний службовими повідомленнями, час перебування пакета у вузлі, кількість пакетів у буфері, адекватність таблиць маршрутизації в вузлах, ймовірність втрат пакетів, джитер, встановити оптимальні структурно-функціональні параметри вузла та параметри протоколу маршрутизації [9], дає можливість розроблена імітаційна модель програмного маршрутизатора з можливістю організації віртуальних мережевих пристроїв, яка представлена нижче.

Спочатку розробки моделі маршрутизатора потрібно побудувати модульну структуру програми у вигляді дерева. Після цього програмуються модулі програми, спочатку модулі найнижчого рівня (листи дерева модульної структури програми), для того, щоб для кожного модуля, який програмується в даний момент були запрограмовані всі модулі, до яких він звертається. Після програмування всіх модулів програми, потрібно провести тестування і налагодження кожнго окремого модуля в такому самому (висхідному) порядку, в якому вони були запрограмовані.

Для опису структури такої системи використано діаграму класів (рис.6.3). Це один із основних способів опису, оскільки UML в першу чергу об'єктно-орієнтована мова, і класи є основним (якщо не єдиним) "будівельним матеріалом".

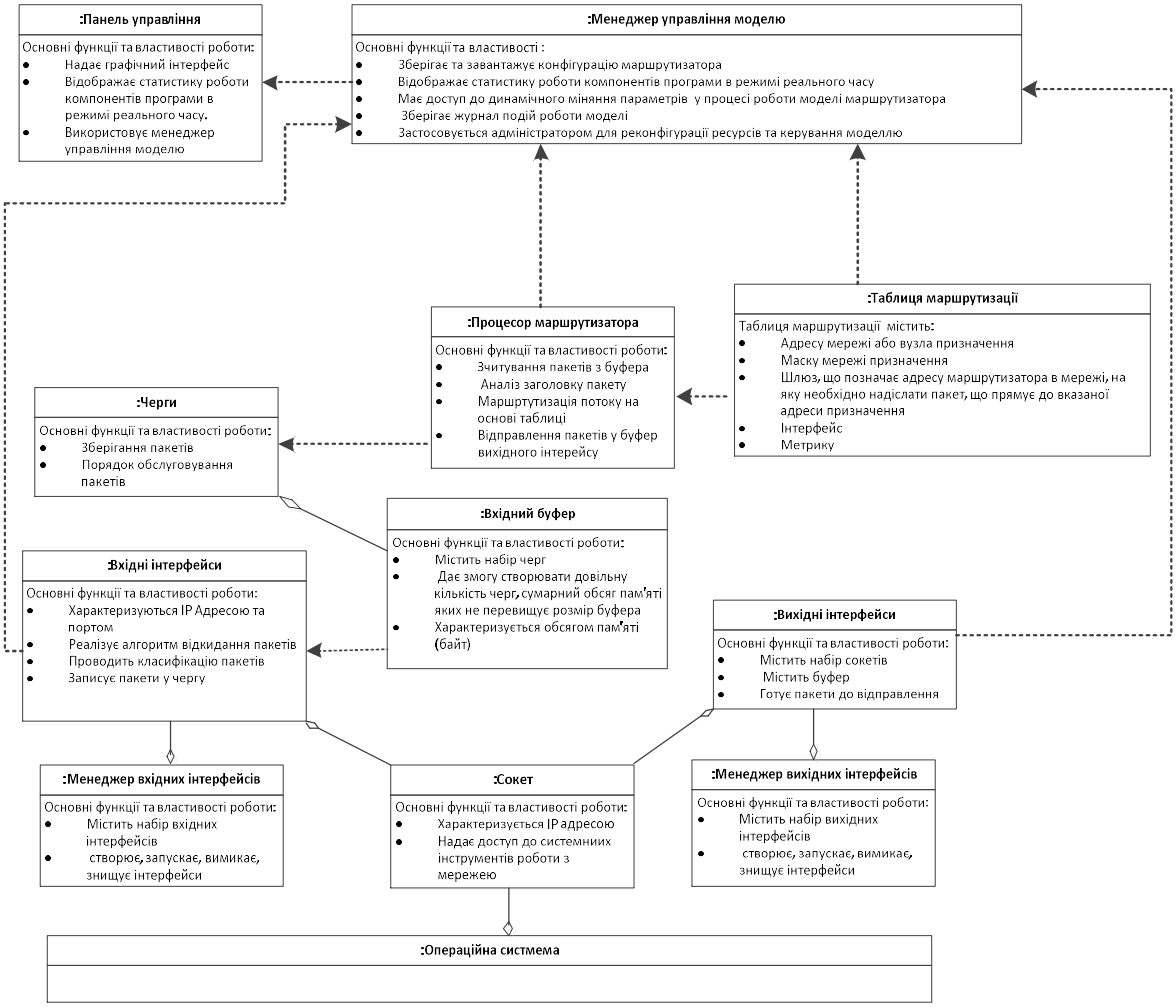


Рис.6.3. UML-діаграма імітаційної моделі програмного маршрутизатора

Програмна модель реалізована на мові C++ і має такі особливості:

- Кожен компонент моделі реалізований у вигляді окремого додатку і має свій IP-адрес і порт, що дає змогу підбирати і пов'язувати компоненти в залежності від конкретних умов;

- Імітаційна модель маршрутизатора може бути максимально наближена до конкретної моделі виробника;

- Розподіл компонентів моделі мережі передавання даних можливий як на одному, так і на не декількох комп'ютерах (серверах) з метою максимального наближення до реальних умов і моделювання мереж з необмеженим числом вузлів, не обмежуючись ресурсами одного комп'ютера.

Модель маршрутизатора представлена набором черг і обслуговуючих пристроїв (рис. 6.4) і відображає процес передавання пакетів, що реалізується в такий спосіб [9]:

1. На порти вхідних інтерфейсів поступає агрегований мультисервісний трафік.
2. Пакети потоків надходять у вхідну чергу
3. Процесор маршрутизатора на основі класифікатора, з урахуванням дисципліни обслуговування черг, вибирає пакет і аналізує його заголовок ToS, DSCP;
4. Процесор, який реалізує протокол маршрутизації, визначає напрямок для передавання повідомлення, і підтримує актуальність таблиць маршрутизації шляхом обміну службовими пакетами з іншими вузлами (при побудові мережі з декількох програмних маршрутизаторів);
5. Після обробки заголовка пакета і вибору порта вихідного інтерфейсу, пакет потрапляє в чергу очікування вихідного каналу.
6. Наступним кроком є передавання пакетів на інший мережевий пристрій, визначений протоколом маршрутизації.

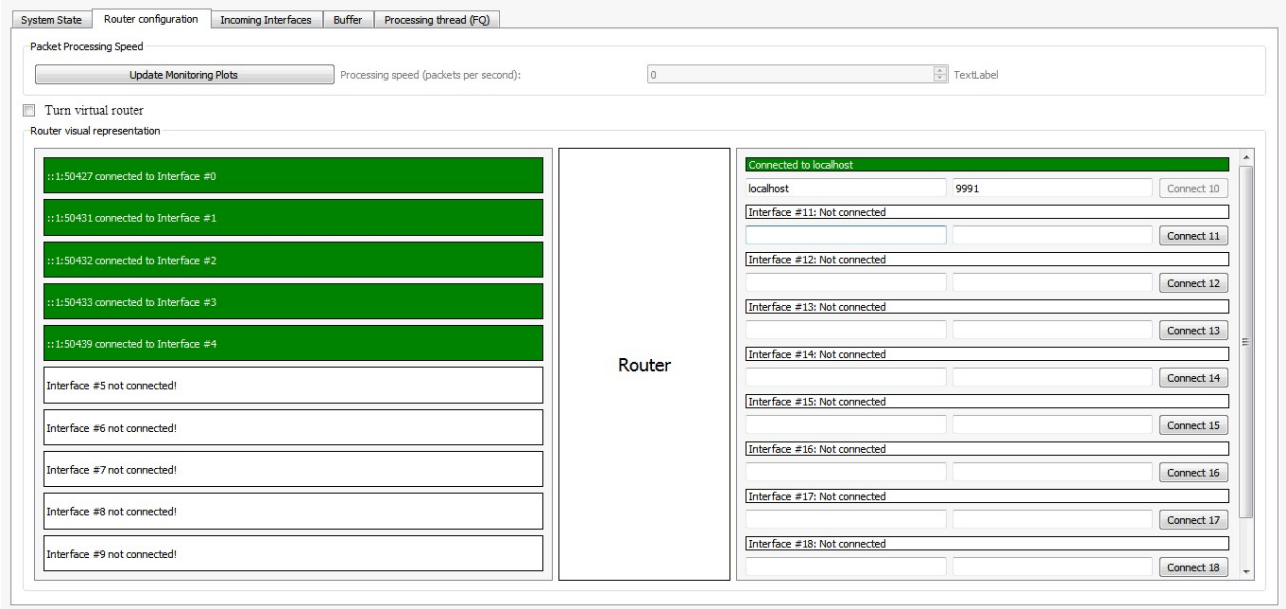


Рис.6.4 . Модель маршрутизатора з модульною структурою

Вихідними даними для розробленої імітаційної моделі є наступні характеристики мережі:

7. Мережеві:
   - Кількість вузлів;
   - Зв'язки між вузлами, які задаються за допомогою матриці інциндентності.
8. Вузлові:
   - Тип і кількість каналів зв'язку;
   - Обсяг буферної пам'яті;
   - Продуктивність та кількість пристроїв, що обробляють інформацію;
   - Протоколи маршрутизації, які підтримуються.
9. Канальні:
   - Максимальна пропускна здатність каналів зв'язку;
   - Вартість доставки пакета по каналу зв'язку.

За допомогою інтенсивностей надходження пакетів задавалися джерела навантаження. Сума трьох типів потоків, які представлені нижче, становить інтенсивність вхідного потоку пакетів, а саме:

- потоку пакетів від локальних мереж, підключених до даного маршрутизатора;
- потоку, що створюють пакети від інших вузлів мережі;
- потоку, створюваного службовими пакетами протоколу маршрутизації, що використовуються для поновлення маршрутної інформації в вузлах.

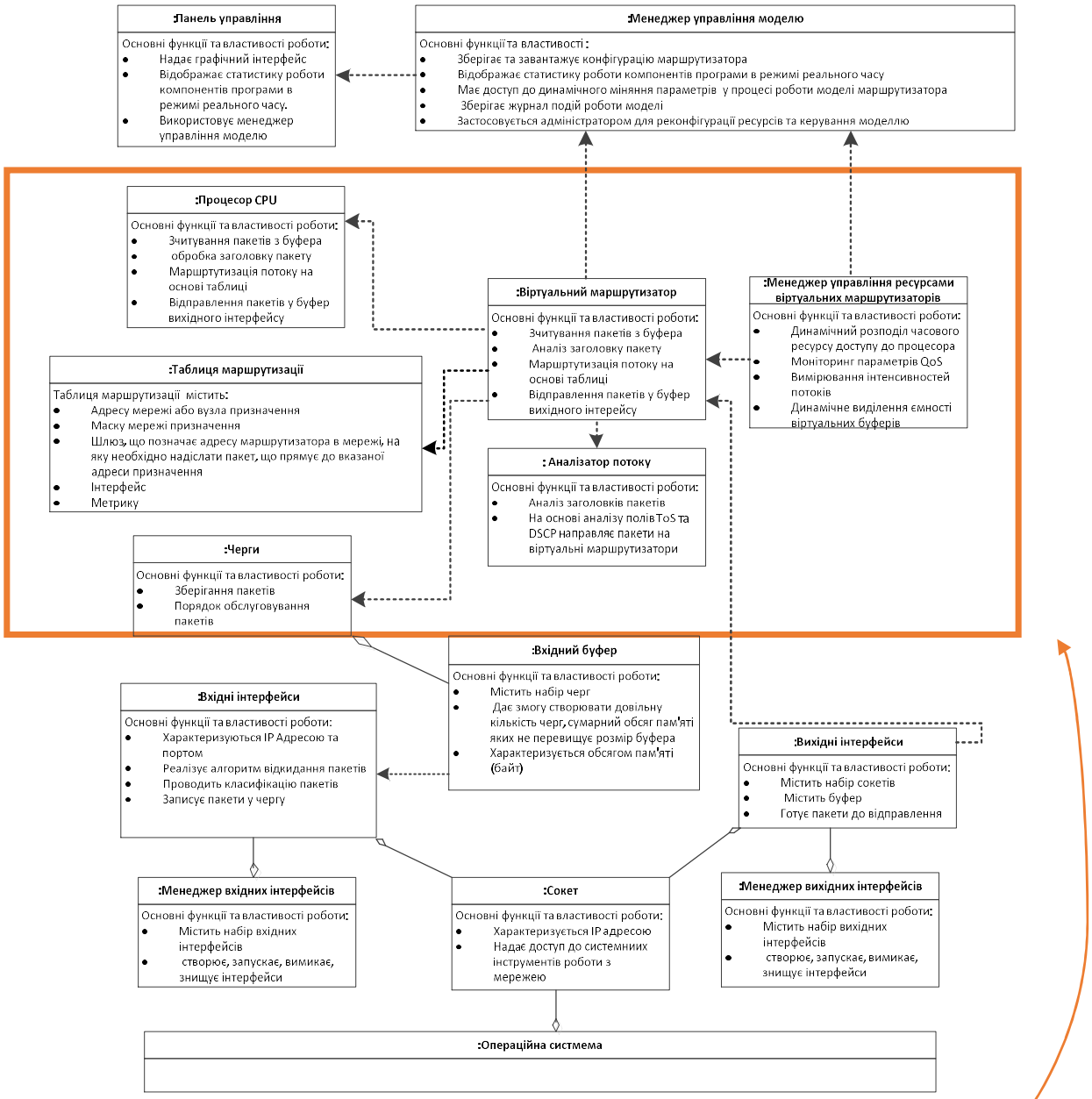
Генератор IP-пакетів – це практична реалізація джерела навантаження. Пакети, адресовані конкретному вузлу, мають визначений розмір із заданою інтенсивністю. Також потрібно відмітити, що основним параметром у моделі каналу зв’язку є пропускна здатність каналу.

6.3 Практична реалізація технології віртуалізації програмного маршрутизатора

Як найголовніший компонент в Інтернеті, маршрутизатор і комутатор виконують важливі ролі з точки зору забезпечення якості обслуговування.Розглянемо наприклад маршрутизатор. Він бере на себе відповідальність за переадресацію пакетів на основі адреси призначення, звернувшись до таблиці переадресації. Кожен маршрутизатор складається з набору віртуальних маршрутизаторів (комутаторів), що приймає відповідальність за переадресацію пакетів, позначених різними типами вимог QoS.

У роботі розроблено модель програмного маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів. UML-діаграма імітаційної моделі такого програмного маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів зображена на рисунку 6.5. Для розгортання віртуальних маршрутизаторів в програмній моделі використано компонент менеджера управління ресурсами віртуальних маршрутизаторів, основними функціями якого є динамічний розподіл часового ресурсу доступу до ресурсів процесора, в залежності від моніторингу поточних параметрів якості обслуговування. Віртуальний маршрутизатор є продуктивнішим тоді, коли час використання процесорного ресурсу є найбільшим.

Наступним етапом є реалізація роботи маршрутизатора з віртуалізацією. Для цього на сервері з операційною системою Linux встановлено програмний маршрутизатор, який працює в стандартному режимі обслуговування пакетів з алгоритмом обробки черг FQ (є можливість встановлення і інших алгоритмів обслуговування черг) та в режимі віртуалізації маршрутизатора.



Розроблені у роботі нові компоненти:

- Менеджер управління ресурсами віртуальних маршрутизаторів
- Аналізатор класу
- Віртуальний маршрутизатор:

1. Черги
2. Таблиця маршрутизації
3. Процесор CPU

Рис.6.5. UML-діаграма імітаційної моделі програмного маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів

Для включення режиму віртуальних маршрутизаторів необхідно в програмній моделі у блоці *Turn virtual router* поставити галочку (рис.6.6). Після чого на фізичному маршрутизаторі розгортається 3 віртуальні маршрутизатора, які призначенні для обслуговування свого типу трафіку. Розподіл обчислювальних ресурсів змінюється в залежності від потреб, щодо забезпечення гарантованого рівня QoS. На порти вхідних інтерфейсів надходять мультисервісні потоки. Визначення того, який віртуальний маршрутизатор буде приймачем, відбувається після того, як пакети вхідних потоків поступають на аналізатор заголовків. Після класифікації пакетів на різні віртуальні маршрутизатори, в режимі реального часу роботи конфігуруються структурно функціональні параметри вузла (буфер, CPU, RAM) з метою забезпечення необхідного рівня якості обслуговування інформаційних потоків. Буфер приймає рішення про те, в які моменти потрібно виконувати відкидання пакетів при переповненні і є важливим елементом управління QoS [30]. Після зчитування процесором заголовків IP - пакетів здійснюється маршрутизація потоків на порти для передавання пакетів, а також відбувається обмін сигналізаційними повідомленнями між віртуальними маршрутизаторами встановленими на шляху передавання з кінця в кінець для узгодження таблиць маршрутизації.

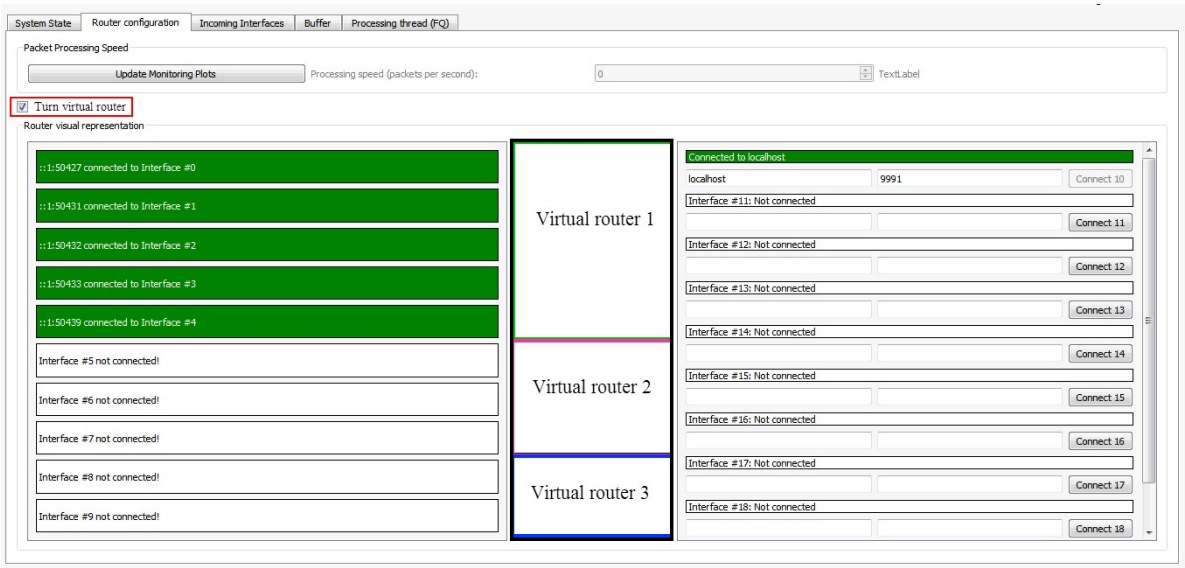


Рис.6.6 . Модель віртуальних маршрутизаторів [28]

6.4 Забезпечення гарантованого рівня якості обслуговування потокового трафіку у віртуальній мультисервісній інфраструктурі

Проведено дослідження якості обслуговування потокового трафіку, в основі якого лежала розроблена модель маршрутизатора з можливістю розгортання віртуальних обслуговуючих пристроїв класового призначення. Потоковий трафік здатний надавати послуги IPTV. Дослідження було проведено в два етапи.

Першим етапом є оцінка QoS параметрів при використанні справедливого алгоритму обробки черг, заснованого на потоках . Для варіанту FWFQ на базі потоків в маршрутизаторі створюється стільки черг, скільки потоків існує в трафіку. Під потоком в даному випадку розуміються пакети з певними значеннями IP-адрес відправника і одержувача та/або портів TCP/UDP відправника і одержувача (типу протоколів транспортного рівня), а також однаковими значеннями поля ToS або DSCP. Інакше кажучи, потік - це послідовність пакетів від однієї програми з певними параметрами якості обслуговування, заданими в поле ToS. Окрема вихідна черга відповідає кожному потоку, для якої механізм FQ виділяє рівні частки пропускної здатності порту в періоди перевантажень. В результаті цього алгоритм FWFQ інколи називають FQ (Fair Queuing) – що означає справедливе обслуговування.

Оцінка параметрів QoS послуги IPTV при використанні запропонованої технології віртуальних маршрутизаторів в режимі реального часу функціонування є другим етапом дослідження. Отже, запустивши програмний маршрутизатор на сервері, необхідно згенерувати вхідне навантаження на вузол. Для цього використано генератор трафіку, характеристики яких наближаються до характеристик реальних потоків даних. Генератор трафіку побудований за принципом використання технології сокетів. Дані, які потрібно передати, пакуються у пакети. Дані просуваються від прикладного рівня вниз через всі інші рівні, після того як вони надсилаються від джерела. Вони передаються на сеансовий рівень з рівня відображення, який відповідає за

синхронізацію хоста-адресата із сеансом. Після цього вони передаються на транспортний рівень, функцією якого є транспортування їх від хоста до хоста. До пакету, що формується, додається інформація про транспортування, ще перед тим як передаватися на мережевий рівень. Ця інформація, в свою чергу, поповнюється інформацією про маршрут на мережевому рівні і складає пакет. Далі, на канальному рівні, пакети формують кадри, що містять необхідні адреси для передавання. Передавання даних на фізичному рівні відбувається у вигляді одиниць та нулів. Коли потік одиниць та нулів досягне адресата, дані піднімуться вгору по рівнях моделі. Цей процес носить назву деінкапсуляція. Також, генератор дає змогу формувати трафік з довільними параметрами, на основі динамічного змішування потоків з різними статистичними характеристиками та вимогами до якості обслуговування .

На кожен із задіяних, чотирьох вхідних інтерфейсів, генерується мультисервісний потік. Після чого ці потоки агрегуються на вихідному інтерфейсі під номером 11. Результати інтенсивності поступлення пакетів на вхідні інтерфейси програмного маршрутизатора зображено на рисунку .6.7-6.10.

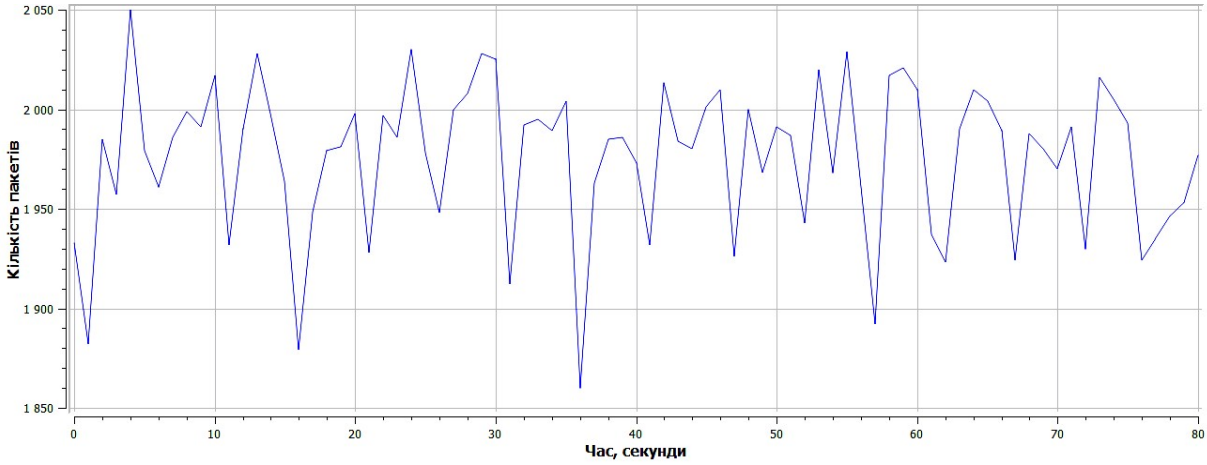


Рис.6.7 . Інтенсивність поступлення пакетів на інтерфейс №0

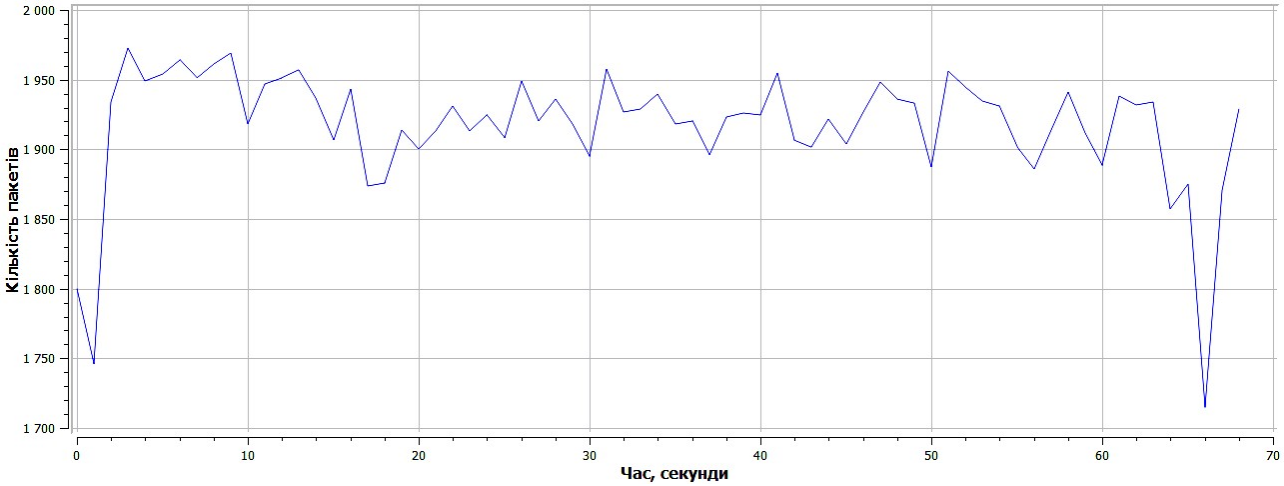


Рис.6.8 . Інтенсивність поступлення пакетів на інтерфейс №1

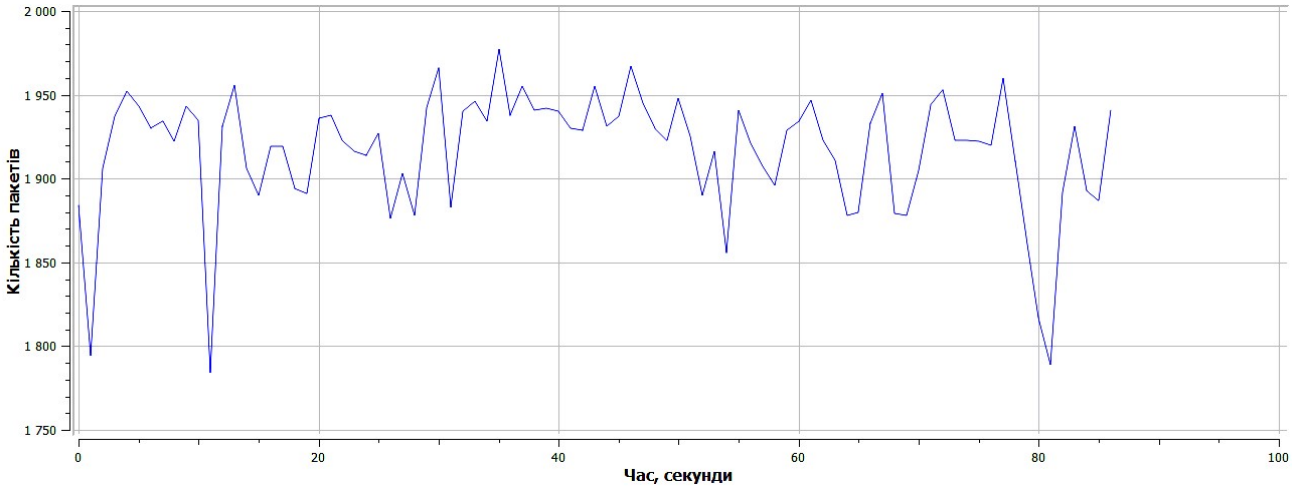


Рис.6.9 . Інтенсивність поступлення пакетів на інтерфейс №2

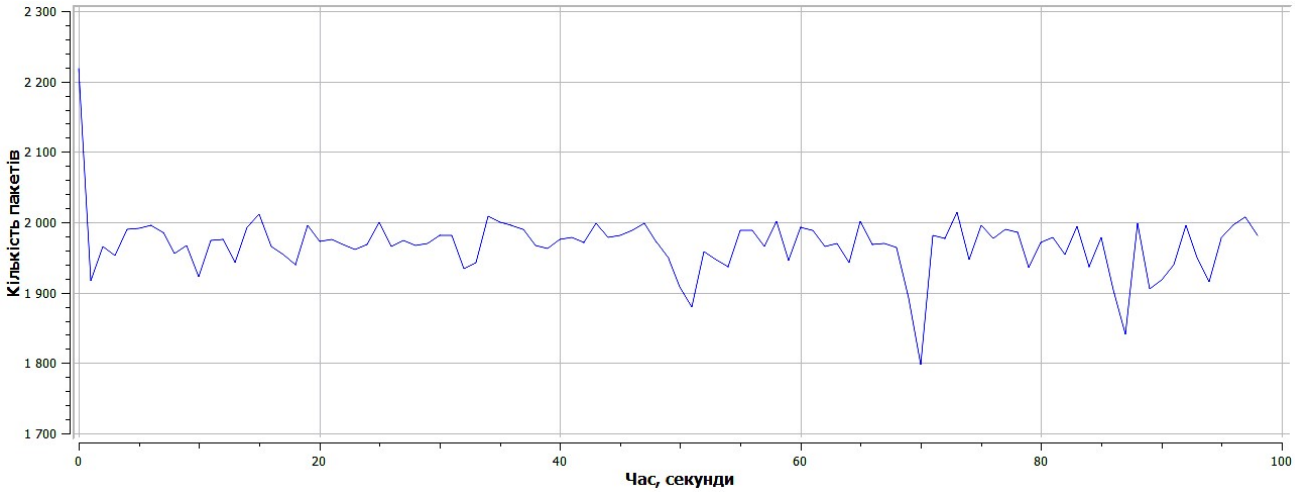


Рис.6.10 . Інтенсивність поступлення пакетів на інтерфейс №3

На вихідному інтерфейсі №0 утворюється агрегований мультисервісний потік з коефіцієнтом завантаження пристрою зображеного на рисунку 6.11

Рис.6.11 . Коефіцієнт завантаження маршрутизатора на рівні агрегації потоків

Для того, щоб дослідити якість обслуговування потокового трафіку IPTV, за допомогою програмного маршрутизатора генеруються пакети потоку на вхідний інтерфейс №4 (рис.6.12). Після цього пакети IPTV потрапляють на вихідний інтерфейс №0, який задіяний для обслуговування агрегованого трафіку з портів № 0, 1, 2, 3.

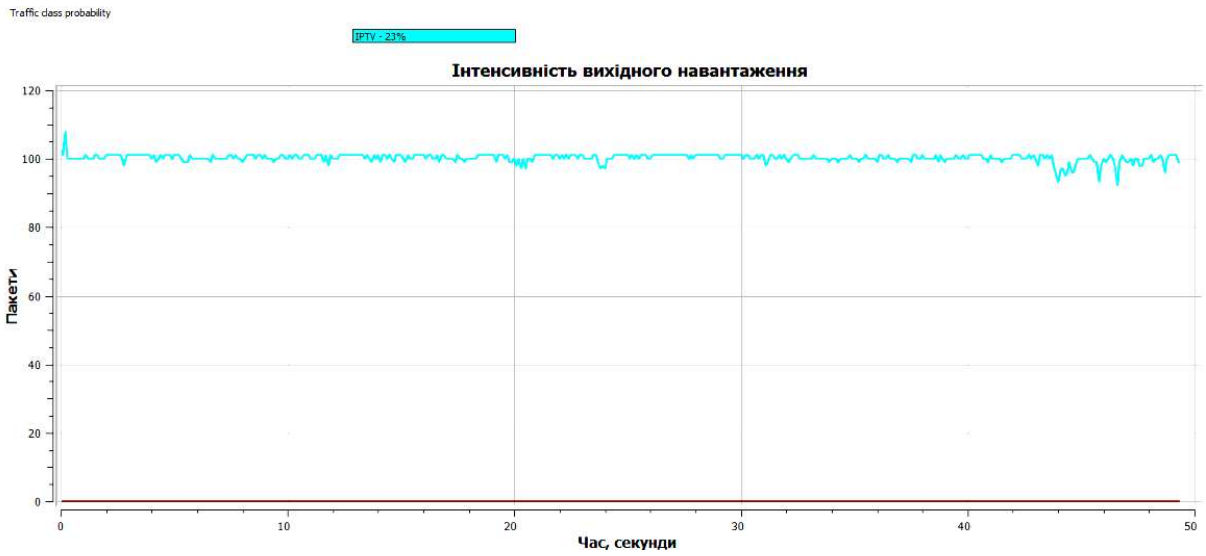


Рис.6.12.Інтенсивність надходження пакетів досліджуваного IPTV сервісу

Механізм FQ є одним із основних для підтримки якості обслуговування у багатьох мережевих пристроях, враховуючи й різні протоколи, які для координації поведінки пристроїв у мережі використовують методи сигналізації.

Саме тому для оцінки параметрів якості обслуговування потоку IPTV з кінця в кінець, в режимі реального часу, програмний маршрутизатор використовує алгоритм FQ. При використанні FQ, тривалість затримки пакетів IPTV з порядковим номером від 1 до 1800 та 3081 до 3500 перевищують встановлений необхідний рівень гарантованого обслуговування за критерієм затримки (червона штрих пунктирна лінія) згідно рекомендацій IT-UT (рис.6.13). Синьою кривою показано середнє значення затримки пакетів IPTV потоку, а чорною – поточні затримки пакетів протягом реального часу спостереження.

При використанні технології динамічної візуалізації обчислювальних ресурсів маршрутизатора, утворюється затримка пакетів з порядковим номером 1801-3080. Цей маршрутизатор дає змогу гнучкіше управляти ресурсами, в порівнянні з попередньою конфігурацією. Тому для потокового трафіку IPTV потрібно виділити окремий віртуальний маршрутизатор, який дасть змогу забезпечити необхідний рівень якості обслуговування пакетів відносно критерія затримки. Також показано джитер потоку з кінця в кінець на рисунку 6.14. Зважаючи на рівень якості обслуговування для кожного класу трафіку, модель віртуалізації мережевого пристрою забезпечує мінімізацію джитеру пакетів, в порівнянні з існуючим режимом роботи маршрутизатора. Слід відмітити, що втрата пакетів у вузлі не спостерігалась в жодному із двох випадків. На рисунку 6.15 показано розподіл тривалостей затримки пакетів IPTV, який є адекватним розподілу тривалості обслуговування пакетів в маршрутизаторах мультисервісної мережі при передаванні реальних потоків даних в режимі реального часу спостереження [9].

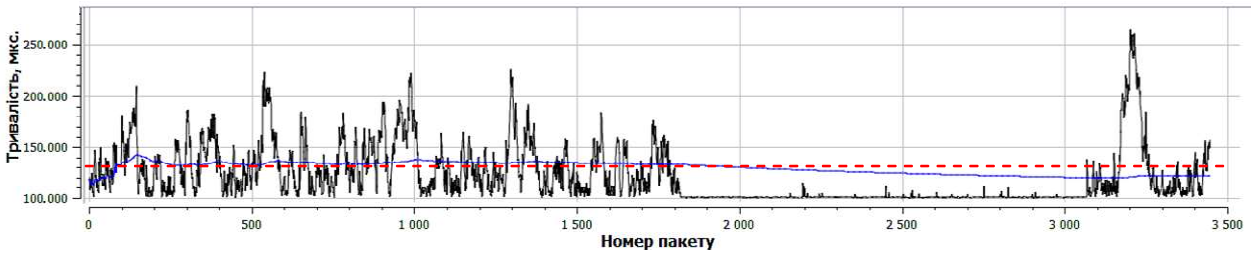


Рис. 6.13. Затримка з кінця в кінець при передаванні IPTV трафіку через агрегуючий маршутизатор

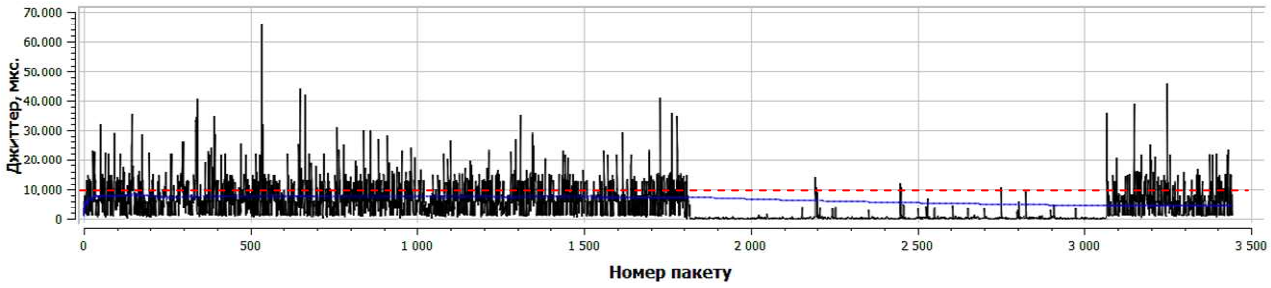


Рис.6.14. Джитер при передаванні IPTV трафіку через агрегуючий маршутизатор

В періоди тимчасових перевантажень, коли мережевий пристрій не встигає передавати всі пакети на вихідний інтерфейс, виникає необхідність черги. Пакети тимчасово поміщаються до вхідної черги, якщо причиною перевантаження є процесорний блок мережевого пристрою, або ж пакети тимчасово зберігаються у вихідній черзі, якщо причина перевантаження полягає в обмеженій швидкості вихідного інтерфейсу (а вона не може перевищувати швидкість підтримуваного протоколу).

Визначити параметри якості обслуговування, коли відомі характеристики трафіку, допомогла б оцінка можливої довжини черг в мережевих пристроях. Але цей процес (зміна черг) є імовірнісним процесом, який зазнає впливу безлічі факторів, враховуючи складні алгоритми обробки черг відповідно до заданих пріоритетів чи шляхом зваженого обслуговування різних потоків. Аналізом черг займається спеціальна область прикладної математики - теорія масового обслуговування (queuing theory), проте отримати з її допомогою кількісні оцінки можна тільки для дуже простих ситуацій, які не відповідають реальним умовам роботи мережевих пристроїв. Тому служба QoS використовує для підтримки гарантованого рівня якості обслуговування досить складну модель, вирішуючи завдання комплексно [13, 9]. Розроблена модель програмного маршрутизатора дає змогу оцінити завантаженість буферів протягом реального часу спостереження. На рис. 6.15 показано завантаженість буфера черги, у яку поміщаються пакети IPTV при використанні справедливого

алгоритму обслуговування черг FQ. З результатів бачимо, що максимальна кількість пакетів у буфері становить 23, а затримка буферизації в порівнянні з затримкою у віртуальному маршрутизаторі (рис.6.16) при максимальній кількості пакетів 6 є значно більшою.

В процесі розгортання віртуальних маршрутизаторів параметри якості обслуговування інших потоків погіршуються у допустимих межах для гарантування заданого рівня якості обслуговування в порівнянні із алгоритмом FQ.

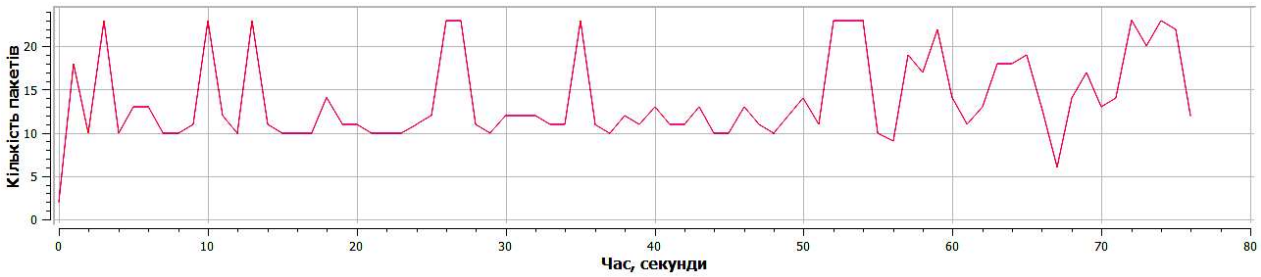


Рис. 6.15. Завантаження буфера черги з потоками IPTV при використанні алгоритму FQ

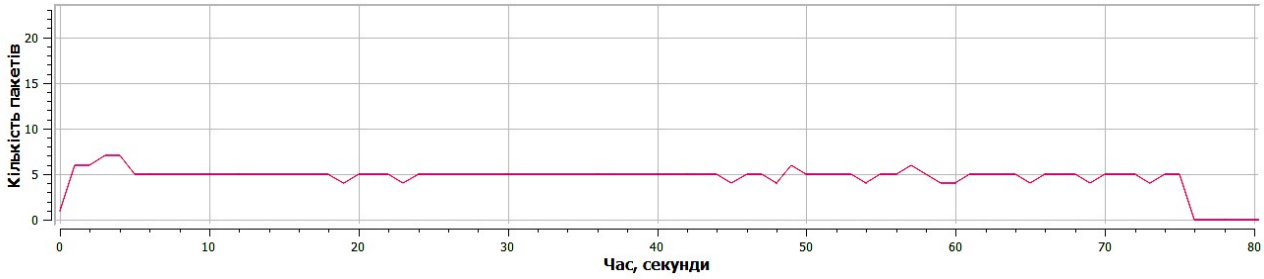


Рис. 6.16. Завантаження буфера віртуального маршрутизатора потоками IPTV

Таким чином, технологія динамічної віртуалізації мережевого пристрою забезпечує можливість вибору мінімального обсягу мережевих ресурсів для гарантування заданого рівня якості обслуговування та дає можливість на 25-30% підвищити якість обслуговування потокового відео трафіку реального часу за критерієм затримки та джитеру.

6.5 Дослідження методів оцінювання якості сприйняття послуги для різних типів трафіку мультисервісних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж

6.5.1 Структура та класифікація трафіку в мультисервісних корпоративних мережах

Стрімкий розвиток мультимедійних послуг (Інтернет, кабельне телебачення, телебачення за запитом, телефонія та ін.) сприяло переходу якості обслуговування на абсолютно новий рівень. В даний час послуги доступу в мережу Інтернет, інтерактивного кабельного телебачення, телефонії все більше проникають у віддалені райони.

Під комфортним сприйняттям користувача телематичної послуги будемо розуміти відповідність рівня якості обслуговування очікуванням клієнта. В першу чергу, очікування користувача регламентуються договором на надання послуг зв'язку. Договір на надання послуг зв'язку повинен чітко регламентувати параметри майбутнього тарифу, допустимі характеристики мережі (максимальний відсоток втрати пакетів, максимальну затримку і т. д.), в межах яких продуктивність мережі залишається незмінною.

Таким чином, першочерговим завданням при організації системи управління пропускною здатністю каналу зв'язку є визначення типів трафіків і відповідно використовуваних протоколів, в мультисервісній мережі, що не завжди є тривіальною задачею.

При цьому стрімке збільшення всіляких сервісів і додатків, які використовуються в мережі Інтернет, роблять завдання класифікації трафіку нетривіальним для операторів зв'язку.

З урахуванням цього різноманіття, в даний час виділяють декілька типів трафіку:

- Пульсуючий трафік (Bursty traffic)
- Інтерактивний трафік (Interactive traffic)

- Чутливий до затримок трафік (Latency sensitive traffic)
- Неінтерактивний трафік (Non-real time traffic)

Розглянемо задачу класифікації трафіку загального потоку даних, що проходять у мережі оператора зв'язку, з урахуванням впливу роботи цього трафіку на загальне враження абонента про якість сервісу (QoE) [122-123]. Дана характеристика є, в значній мірі, суб'єктивним поняттям і не має очевидної кількісної оцінки. Ця обставина є основною складністю в дослідженні методів оптимізації управління трафіком, оскільки кожен абонент має своє уявлення про те, як повинна працювати мережа [205]

Причому, можуть існувати й інші фактори, крім заявлених характеристик доступу до мережі в тарифному плані, що впливають на враження абонента. Наприклад, маючи можливість користуватися послугами доступу в мережу Інтернет на роботі і вдома, клієнт буде порівнювати одержувані сервіси, навіть у випадку, якщо послуга з більш низькою швидкістю доступу буде надаватися в повній відповідності з тарифним планом. Тому завдання визначення групи трафіків та їх вплив на QoE (враження абонента) вирішена з використанням статистичних даних, отриманих в результаті дослідження реальної мережі оператора зв'язку Львівської області протягом деякого часу [200-204]. Таким чином, в роботі запропоновано класифікація декількох груп трафіків і зіставлення деякої кількісної величини його впливу на враження абонента на основі сумарного досвіду роботи в реальній мережі зв'язку.

Розширення пропускної здатності і швидкості передачі даних в Інтернеті, а також зростання популярності медійного контенту суттєво вплинули на структуру світового трафіку. Потокове Інтернет-відео (включаючи сервіси платного ТБ, VOD, видимі на екрані персонального комп'ютера складають найбільшу частку інтернет-трафіку [118-119]. Онлайн-ігри, незважаючи на щорічне подвоєння трафіку у відносному вираженні становлять істотно менше 1%. Середній приріст Інтернет-трафіку в сегменті VoIP склав 4%, що значно менше середнього приросту за сегментами. Зміна структури трафіку в бік медіа

контенту змушує операторів зв'язку враховувати особливості передачі окремих його видів, а саме – необхідність забезпечення безперервності передачі сигналу в реальному часі, тобто сталість мережевої затримки. Оператори Інтернет-послуг повинні враховувати цю статистику при організації системи управління трафіком і надання кращої якості обслуговування.

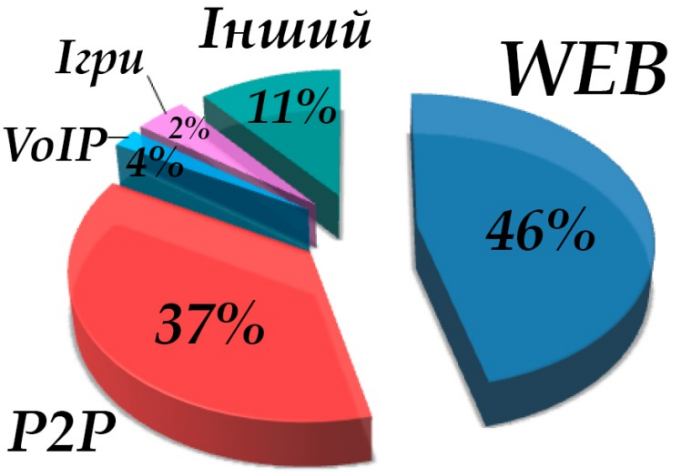


Рис. 6.17 Структура телетрафіка в мультисервісної мережі оператора зв'язку

Як показали результати дослідження, проведені в рамках роботи, в реальній мережі оператора зв'язку Львівської області (рисунок 6.17), протягом декількох років структура трафіку, повністю відповідає даним, опублікованими в [5].

У процесі організації всієї мережевої інфраструктури у мережі реального оператора зв'язку, та подальшого її функціонування, більшість дзвінків зі скаргами клієнтів, пов'язаних з працездатністю послуги доступу в мережу Інтернет та враження абонента в пікові моменти перевантажень каналу зв'язку показали абсолютно ідентичну тенденцію, пов'язану з виділенням декількох типів трафіку в [33].

Методологія дослідження полягала у зборі статистичних даних дзвінків клієнтів в пікові моменти перевантаження каналу зв'язку. Робота системи обробки заявок у діючій мережі оператора зв'язку виконувалася з

використанням спеціалізованих засобів, коли агент, що приймає дзвінок, повинен був зафіксувати короткий опис проблеми абонента.

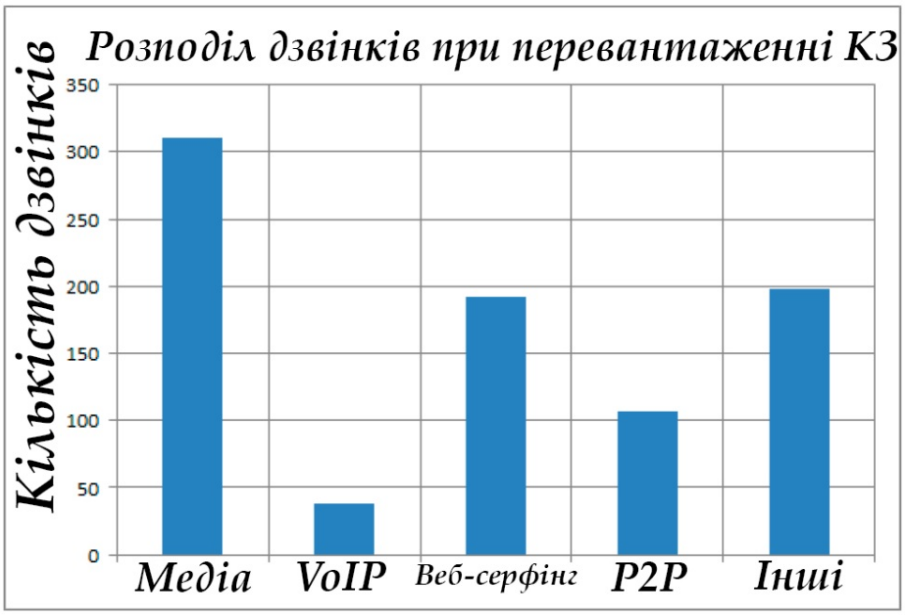


Рис.6.18 Дзвінки клієнтів в моменти перевантаження в каналі зв'язку

На основі статистичних даних, зібраних в call-центрі діючого оператора зв'язку проведено вибірку дзвінків зі скаргами клієнтів на роботу сервісів, в моменти перевантаження каналу зв'язку. З урахуванням отриманої вибірки була побудована діаграма дзвінків кінцевих абонентів зі скаргами на роботу мережевих додатків. Всі мережеві додатки були класифіковані за типами, опис яких наведено нижче у даному параграфі (рисунок 6.19).

Скорочення типів мережевих додатків означають наступне:

- Медіа – потокове відео/аудіо (онлайн фільми, аудіо файли і т. д.).
- VoIP – мережеві програми, що використовують VoIP протокол (Skype, TeamSpeak тощо).
- Веб-серфінг – інтерактивні сервіси Веб-браузера (Mozilla Firefox, Opera, Internet Explorer тощо) [222].
- P2P – сервіси, що генерують піринговий трафік (mTorrent, Shareaza тощо).
- Інші – дзвінки клієнтів, пов'язані з проблемною роботою інших мережевих додатків.

Як видно на діаграмі більшість дзвінків пов'язано з негативним враженням від роботи сервісів з відтворення потокового відео/аудіо в моменти перевантаження в каналі зв'язку. Опис з боку клієнта може характеризуватися наступним чином: «відео трансляція в Інтернеті якого-небудь фільму постійно переривається» і т. д. «Повільна» робота пірингових програм характеризується низькою швидкістю завантаження файлів відображається у відповідних клієнт-додатках.

При зборі статистики зі скаргами клієнтів на роботу мережевих сервісів, проведено дослідження, пов'язане з відмовою від надаваних послуг і відповідних причин припинення дії договорів. Дана статистика в наближенні відображає реальну ситуацію відмов клієнтів, викликану тільки роботою мережевих сервісів в моменти перевантажень. На діаграмі (рисунок 6.19) не відображаються відмови від послуг, викликані іншими причинами (переїзд, поломка клієнтського обладнання тощо). Ця статистика відображає ситуацію для заявок на припинення дії договору, коли клієнт сам повідомляв причину відмови. Для деяких типів сервісів відсутня статистика відмов. Варто відзначити, що це не означає фактичну їх відсутність. Тобто, статистика відмов характеризує відсоткове співвідношення заявок на припинення дії договору із заздалегідь відомого числа з зафіксованими причинами негативного враження клієнтів.

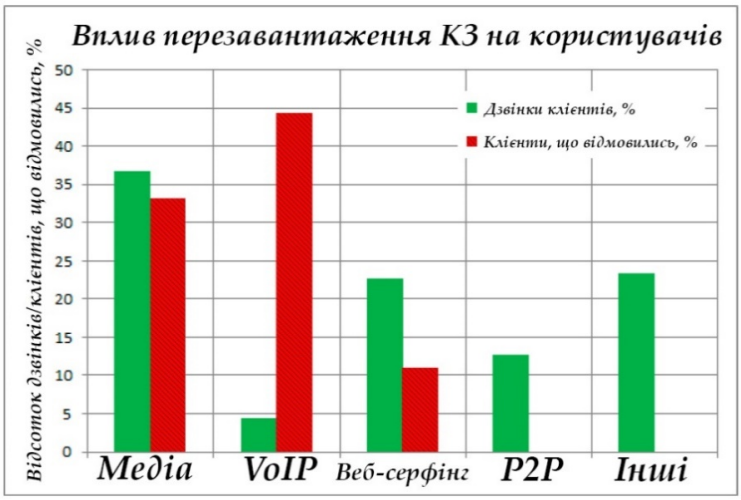


Рис.6.19 Співвідношення дзвінки-відмова клієнтів

На діаграмі (рисунок 6.19) найбільший зафіксований відсоток відмов пов'язаний з незадовільною роботою VoIP сервісів. Отримана статистична інформація буде використана у подальшому при пріоритизації виділених класів трафіку [17].

У роботі запропонована наступна класифікація Інтернет трафіку на основі його впливу на враження клієнта:

- Піринговий трафік (P2P, peer-to-peer).
- Потокове відео/аудіо (онлайн фільми, аудіо файли і т. д.).
- Веб-серфінг (HTTP, HTTPS протоколи).
- VoIP (Skype, TeamSpeak тощо).
- Інші:
- Mail (POP3, SMTP протоколи тощо).
- Службовий трафік (SSH, SNMP, Протоколи синхронізації часу тощо).

Таким чином, виділено п'ять видів трафіку з урахуванням його впливу на враження абонента. Під час проходження трафіку кінцевого клієнта через вузол агрегації, відбувається його ідентифікація і класифікація з відповідним типом, для подальшого управління. При цьому основна ідея розробки полягає в тому, що система буде управляти трафіком кожного класу по-різному, визначаючи найкращий варіант зміни враження абонента і відповідно QoE.

Розглянемо докладніше кожен тип трафіку, запропонований у дослідженні.

Основні характеристики і особливості пірингового трафіку (P2P, peer-to-peer) в мережі оператора зв'язку та її вплив на враження абонента були описані в попередніх главах. Варто зазначити, що метод ідентифікації даного трафіку є найбільш трудомістким, порівняно з іншими типами.

Веб-ресурси. До цього класу відноситься, в першу чергу, інтерактивний трафік, що проглядається абонентами як веб-ресурси через спеціальні програми Веб-браузери.

Netflix і YouTube використовують протокол TCP для організації відео потоку. Під час звичайного сеансу передачі, крім відео, сервери передають інші допоміжні дані. Наприклад, ці дані включають у себе службову інформацію (наприклад, інформацію про відео-файлі) та рекламу. Але саме відео дані становлять значну частку трафіку [34].

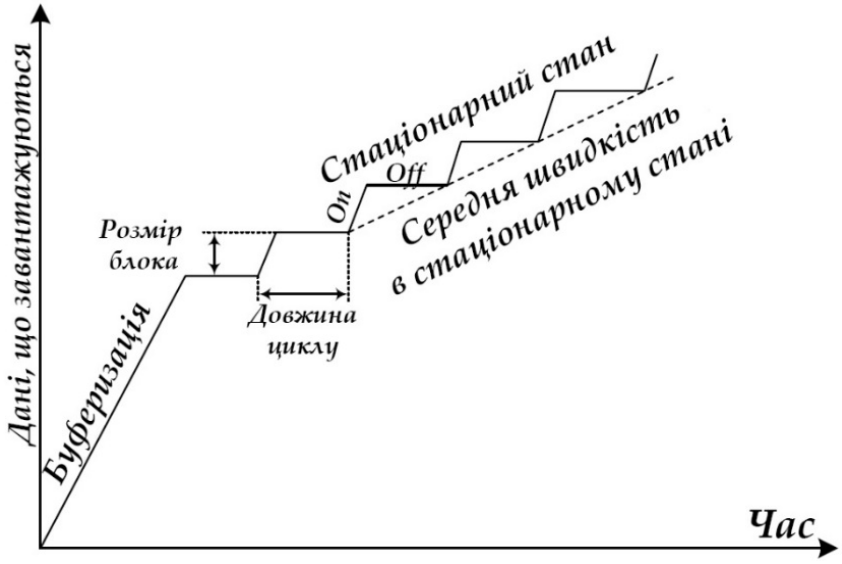


Рис.6.20 Фази завантаження відео

Під час сесії потокового мовлення, відео контент передається в дві фази: буферизація з переходом у стаціонарний стан. Протягом буферизації швидкість передачі даних обмежена тільки кінцевою пропускною здатністю каналу зв'язку між клієнтом і сервером. На рисунку 6.20 нахил лінії буферизації відповідає доступній пропускній спроможності. Відеоплеєр починає відтворення при наявності достатньої кількості даних в буфері. Відтворення не чекає закінчення фази буферизації. На рисунку 6.20 потокове відео починається з фази буферизації з переходом у стаціонарний стан. Цикли ON-OFF в стаціонарній фазі використовуються для обмеження швидкості завантаження.

У фазі стаціонарного стану середня швидкість завантаження трохи більше швидкості кодування відео – бітрейта. В форматах потокове відео і аудіо (наприклад, MPEG і MP3), що використовують стиснення з втратою якості, параметр бітрейт виражає ступінь стиснення потоку і, тим самим, визначає

розмір каналу, для якого стиснутий потік даних. Найчастіше бітрейт звуку і відео вимірюють в кілобітах в секунду (англ. kilobit per second, fps), рідше — в мегабітах в секунду (тільки для відео) [26]. Назвемо відношення середньої швидкості завантаження стаціонарної фази до швидкості бітрейта швидкістю накопичення (акумулювання). Якщо це співвідношення менше одиниці, відтворення відео буде перериватися. Значення більше одиниці означає, що обсяг даних відео контенту збільшується в буфері протягом стаціонарного стану, що підвищує стійкість до тимчасових перевантажень в каналі зв'язку.

Середня швидкість завантаження в стаціонарному стані досягається шляхом періодичної передачі одного блоку відео-контенту. Ці періодичні перекази здійснюються ON-OFF циклами. Протягом кожного ON періоду, передається блок даних зі швидкістю доступної смуги пропускання каналу зв'язку, що використовується TCP з'єднанням. Протягом OFF періоду TCP з'єднання простоює. Нахил лінії завантаження протягом ON періодів на рисунку 3.6 представляє доступну швидкість передачі інформації в каналі. Обсяг даних, переданих за один цикл, дорівнює розміру блоку.

Змінюючи параметри ON-OFF циклів можна впливати на стратегію відтворення відео. З цього припущення можна виділити три можливі варіанти: 1) відсутність ON-OFF циклів – ця стратегія передбачає передачу всіх відео даних на фазі буферизації. Цей метод досить простий в реалізації і не передбачає будь-яких механізмів керування трафіком між клієнтом і сервером. У цьому випадку, відеосесія може розглядатися як проста передача файлу по мережі; 2) короткі ON-OFF цикли; 3) довгі ON-OFF цикли. 2) і 3) стратегії регулюють розмір блоку даних, що передаються за один ON-OFF цикл, визначаючи швидкість завантаження даних [23]. Стратегії мовлення потокового відео залежать як від використовуваного браузера (Internet Explorer, Mozilla Firefox, Google Chrome і т. д.), так і від контейнера, що використовується веб-ресурсом (Flash, HTML5, Silverlight тощо). При цьому дослідження показало, що при використанні Flash контейнера YouTube використовує стратегію

коротких ON-OFF циклів, не залежних від веб-браузера. Для контейнера, що використовує технологію HTML5, сервіс YouTube не контролює яким-небудь явним чином швидкість відеопотоку, делегуючи цю функцію веб-браузерам. З деталями дослідження потокового відео в мережі Інтернет можна ознайомитися в [25].

VoIP (Voice over Internet Protocol). Технологія, що забезпечує передачу голосу в мережах з пакетною комутацією по протоколу IP, окремим випадком яких є мережі Інтернет, а також інші IP - мережі (наприклад, виділені цифрові канали). Для зв'язку мережі Інтернет (IP - мережі) з телефонною мережею загального користування PSTN (Public Switched Telephone Network), яка належить до глобальних мереж з комутацією каналів, використовуються спеціальні аналогові VoIP-шлюзи [66, 221].

Під IP-телефонією мається на увазі набір комунікаційних протоколів, технологій і методів, що забезпечують двостороннє голосове спілкування (у тому числі при відеоспілкуванні) мережею Інтернет або будь-яким іншими IP-мережами [223-230].. Сигнал по каналу зв'язку передається в цифровому вигляді і, як правило, перед передачею перетворюється (стискається) з тим, щоб видалити надлишок інформації. Технологія VoIP, в загальному випадку, передбачає всі варіанти передачі голосу через IP, в тому числі і ті, що не мають ніякого відношення до телефонії та спілкування людей. Наприклад, технологія VoIP застосовується для передачі звуку в системах IP відеоспостереження, в системах оповіщення, при трансляції вебінарів, при перегляді фільмів в режимі онлайн тощо. [67].

Всі механізми ідентифікації і класифікації трафіку VoIP виконані для сервісу Skype. Skype – безкоштовне програмне забезпечення з закритим кодом, що забезпечує текстовий, голосовий зв'язок і відеозв'язок через Інтернет між комп'ютерами (IP-телефонія), опційно використовуючи технології пірингових мереж, а також платні послуги для дзвінків на мобільні і стаціонарні телефони.

Протокол, що використовується Skype додатком, засновано на peer-to-peer архітектурі [191]. Специфікація протоколу представляє інтелектуальну власність компанії Microsoft і не є відкритим документом. Тому завдання ідентифікації і управління трафіком даного додатка є нетривіальною. В роботі пропонується метод ідентифікації Skype трафіку, заснований на використанні L7-filter.

Інші (Mail, Службовий трафік і т. д.). Представляє групу протоколів, що володіють найменшим впливом на враження кінцевого абонента про якість надаваних послуг у мережі згідно з точки зору доставки даних. В першу чергу, це пов'язано з тим, що частка такого класу трафіку в мережах оператора зв'язку є незначною. Також варто зазначити, що протоколи, які потрапляють під цю класифікацію, не є критичними до затримок в каналі зв'язку, які можуть виникати в пікові моменти часу завантаження. Погіршення роботи додатків, що використовують даний вид протоколів не є очевидним кінцевому користувачеві.

Даний клас трафіку не викликає труднощів ідентифікації та керування через чітку і відкриту специфікацію протоколів, що входять в дану групу. Основний принцип ідентифікації заснований на визначенні порту, використовуваного додатком при генеруванні трафіку. У разі, якщо вихідний або порт призначення в IP-пакеті співпадає з шуканим, то трафік такого додатка однозначно ідентифікується.

6.5.2 Імітаційна модель корпоративної мережі для передавання різнотипних потоків даних

В даній роботі розглянута модель передавання різнотипного пакетного трафіку, характерного для мультисервісних мереж, на основі клієнт-серверної архітектури, тобто кінцевий користувач, що має підключення до глобальної мережі, бажає отримати послуги з найвищою якістю. Ці послуги являють собою можливість перегляду Web-сторінок, прослуховування і перегляд

трансльованого потокового аудіо та відео в реальному часі. У якості постачальника послуг слугує сервер, на якому знаходиться потрібна кінцевому користувачу інформація, а саме: потоковий аудіо та відео контент і розміщені Web-сторінки. Отже, передача потрібної інформації здійснюється за наступною схемою: користувач посилає заявку на отримання певного виду послуг, після чого сервер надає можливість доступу користувачу до цього типу контенту і починається передача відповідних даних через глобальну мережу, де відбуваються основні втрати якості – затримка, втрати пакетів, внесення помилок при перевантаженні мережі.

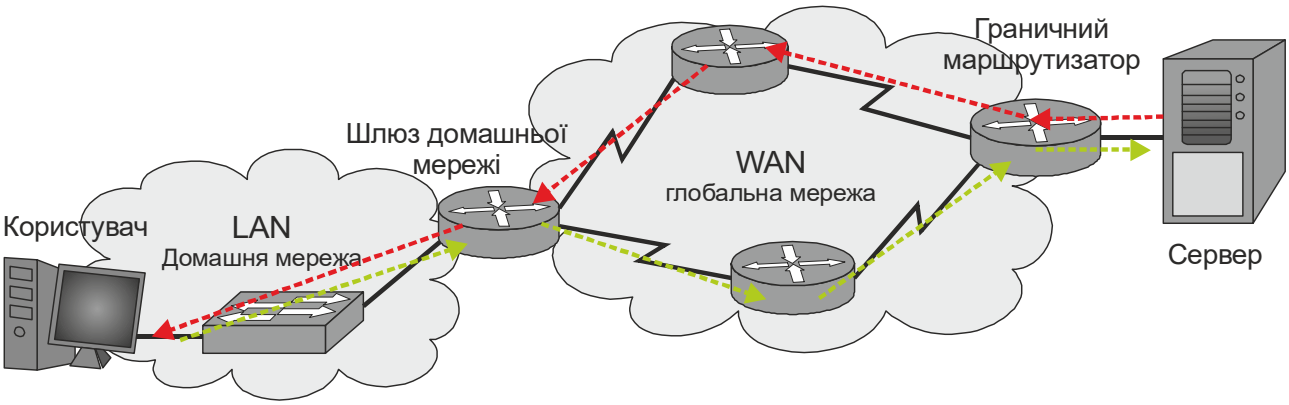


Рис.6.21 Найпростіший вигляд реальної клієнт-серверної моделі

Для того, щоб експериментально визначити або оцінити якість сприйняття послуги (QoE) потрібно створити імітаційну модель глобальної мережі із можливістю передавання різнотипних потоків даних. Ця модель повинна бути близькою до реальних умов і бути гнучкою у регулюванні її основних параметрів, таких як затримка, втрати пакетів, джитер, пропускна здатність. Пропонується використати безкоштовну утиліту Network Simulator, що являє собою симулятор глобальної мережі.

Network Simulator – інструмент, який дозволяє виконувати зміну пропускної здатності мережі і затримки моделювання (імітації повільних/перевантажених зв'язків між вузлами), втрат пакетів при спробі зв'язку комп'ютера з будь-яким віддаленим вузлом (в локальній мережі або

віддалено через Інтернет). Найбільш корисна функція цієї утиліти є можливість встановити її на робочій станції, на якій виконується тестування мережі та створення затримки, варіації затримки, обмеження пропускної здатності модельованого профілю трафіку.

Таким чином, для створення імітаційної моделі використаємо єдину робочу станцію, яка виконуватиме функції як серверної і клієнтської станції, так і вноситиме потрібні зміни у параметри потоку даних для імітації реальних характеристик глобальної мережі. Отже, для створення локального HTTP-серверу використаємо Apache (з набору дистрибутивів Денвер 3), для трансляції потокового аудіо та відео - VLC сервер (від некомерційної організації VideoLAN), для відображення Web-сторінок використаємо інтернет браузер Google Chrome 19.0.1, а для відтворення відео – VLC media player [22].

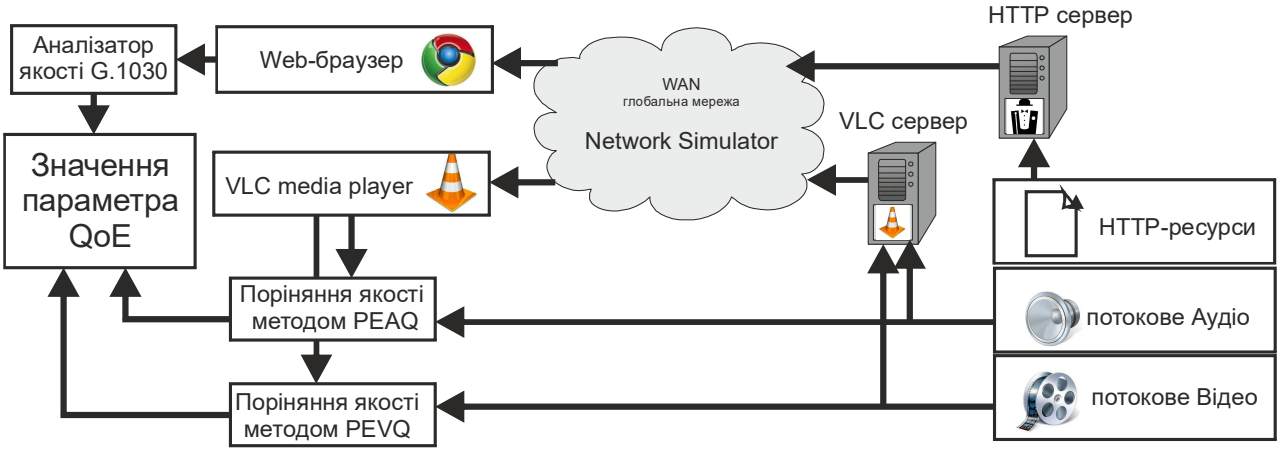


Рис.6.22 Схема визначення якості сприйняття послуги

Об’єктивне визначення поканика параметра якості сприйняття послуги QoE здійснюваось згідно відповідних ркомендацій ITU-T:

- для оцінки HTTP-трафіку викоритано рекоендацію G.1030
- для аудіо – активний метод порівняння PEAQ
- для відео – активний метод порівяння PEAQ

6.5.3 Практична реалізація системи управління пропускною здатністю каналу зв'язку шляхом визначення показника якості сприйняття послуги

На основі створеної імітційної моделі здійснено три різні типи експериментів:

1. завантаження Web-сторінки.
2. прослуховування потокового аудіо.
3. перегляд потокового відео.

Завантаження Web-сторінки.

В якості Web-сторінки для проведення експерименту використано самостійно створену сторінку, що містить, як і будь-яка стандартна Web-сторінка, наступні елементи – текстові дані, таблиці, зображення, скрипти та посилання на інші Web-сторінки. Дану сторінку розміщено на локальному Web-сервері, створеному за допомогою Apache. Експеримент проводиться у вигляді багаторазового скачування цієї сторінки браузером із сервера із визначенням середнього часу повного завантаження сторінки при наступних параметрах глобальної мережі:

- Імовірність втрати пакетів – 0..30%
- Затримка – 50 мс.
- Пропускна здатність мережі – 64 кбіт/с, 128 кбіт/с, 256 кбіт/с, 512 кбіт/с, 1024 кбіт/с.
- Кількість завантажувань сторінки – 20 раз.
- Розмір сторінки – 580 кбайт.

Параметри завантаженої сторінки аналізувався за рекомендацією G.1030 і визначалися за базисним співвідношенням між середнім часом, затраченим на завантаження і параметром якості сприйняття послуги QoE (переведеним у значення шкали MOS для легшого порівняння і аналізу) наступним виразом:

$$MOS = 4 \cdot \frac{\ln\left(\frac{t}{t_{min}}\right)}{\ln\left(\frac{t_{min}}{t_{max}}\right)} + 5, \qquad (6.1)$$

де t – середній час завантаження сторінки;

t_{max}=5 с. – максимальний очікуваний час завантаження сторінки;

t_{min}=0.1 с – мінімальний очікуваний час завантаження сторінки.

Таблиця 6.1

Параметр QoE при завантаженні Web-сторінки

Імовірність втрати пакетів, %	Пропускна здатність мережі, кбіт/с				
	64	128	256	512	1024
0	2.489	3.068	3.624	4.141	4.595
5	2.27	2.849	3.408	3.928	4.388
10	2.043	2.623	3.183	3.707	4.171
15	1.807	2.388	2.95	3.477	3.945
20	1.56	2.142	2.705	3.235	3.708
25	1.301	1.884	2.449	2.981	3.458
30	1.028	1.612	2.178	2.712	3.193

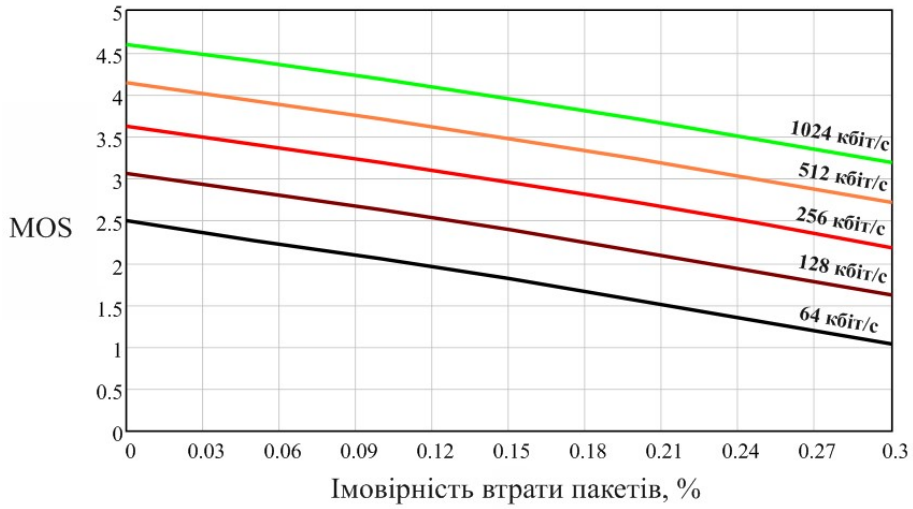


Рис.6.23 Залежність параметра QoE від імовірності втрати пакетів при фіксованих значеннях пропускної здатності мережі

Прослуховування потокового аудіо та перегляд потокового відео

В якості аудіо та відео файлів для трансляції вибрано медіа файли високої якості із наступними параметрами:

Аудіо файл – audio.mp3:

- Тривалість – 60с.
- Бітрейт – 320кбіт/с.
- Частота – 44.1 КГц.
- Розширення – 16 біт.
- Формат – MPEG Audio Layer3

Відео файл – video.mp4:

- Тривалість – 60с.
- Бітрейт – 3760 кбіт/с.
- Висота і ширина – 1280x720 пікселів.
- Розширення – 24 біт.
- Формат – MPEG-4 Version 2.

Дані медіа файли транслюємо за допомогою VLC сервера. Експеримент проводився у вигляді багаторазового прослуховування аудіо файлу чи перегляду відео файлу за допомогою програми VLC media player. Під час проведення експерименту визначено середній час затримки пакета в потоці при наступних параметрах глобальної мережі:

- Імовірність втрати пакетів – 0..30%
- Тип розподілу затримки пакету:
    - Нормальний
    - Рівномірний
    - Маркова
- Пропускна здатність мережі – 4 Мбіт/с.
- Кількість прослуховувань/переглядів файлу – 10 раз.

Параметри отриманого медіа файлу порівнювались із збереженим файлом за методами PEAQ і PEVQ. Після чого визначено параметр якості сприйняття послуги QoE наступним виразом:

$$MOS = \sqrt{\frac{\Sigma\left(\left(t_{max} - t_i\right)\cdot T\right)^2}{N}}, \qquad (6.2)$$

де t_i –час затримки і-ого елемента медіа;

t_{max}=0.1 с – максимально можливий час затримки і-ого елемента потокового медіа для коректного подальшого програвання;

T=60 мс – тривалість одного інтервалу потокового медіа;

N=1000 – кількість інтервалів потокового медіа.

Таблиця 6.2

Параметр QoE при прослуховуванні/перегляді медіа файлу

Імовірність втрати пакетів, %	Тип розподілу затримки					
	Нормальний		Рівномірний		Маркова	
	audio.mp3	video.mp4	audio.mp3	video.mp4	audio.mp3	video.mp4
0	4.501	4.492	4.21	4.189	3.903	3.89
5	3.858	3.482	3.601	3.25	3.344	3.018
10	3.281	2.657	3.062	2.48	2.843	2.303
15	2.764	1.997	2.579	1.864	2.395	1.73
20	2.304	1.475	2.15	1.376	1.997	1.27
25	1.898	1.068	1.772	0.997	1.645	0.925
30	1.543	0.756	1.441	0.706	1.338	0.655

а) Нормальний б) Рівномірний в) Маркова

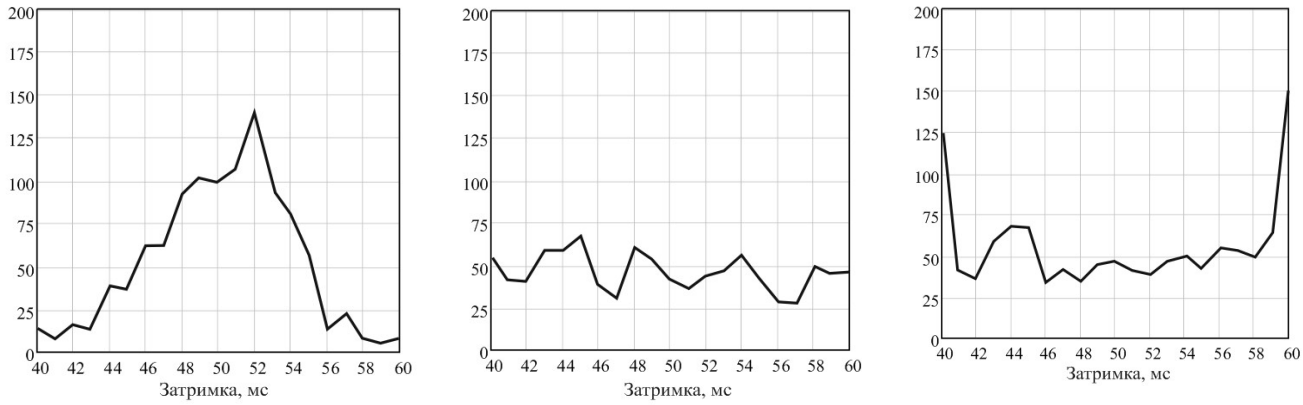


Рис.6.24 а, б, в. – вигляд різних типів розподілу затримки із значенням 50±10 мс при здійсненні першого експерименту

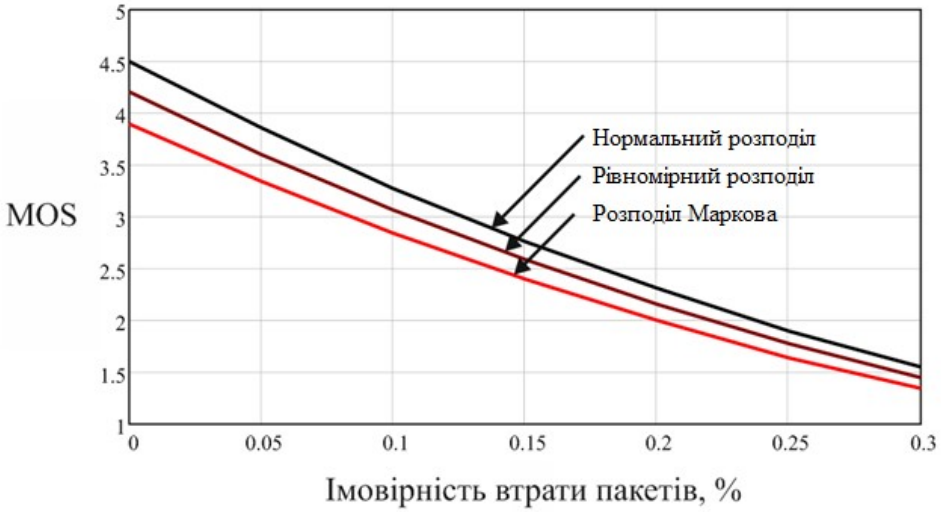


Рис.6.25 Залежність параметра QoE від імовірності втрати пакетів для різних типів розподілів затримки при прийомі потокового аудіо

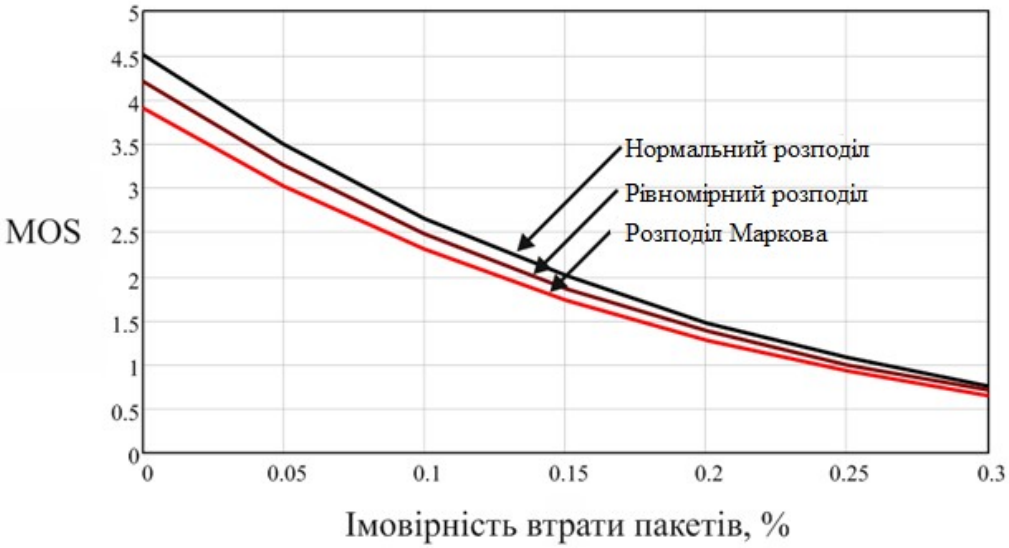


Рис.6.26 Залежність параметра QoE від імовірності втрати пакетів для різних типів розподілів затримки при прийомі потокового відео

Проаналізувавши суб’єктивні і об’єктивні методи та алгоритми оцінювання якості сприйняття послуг, визначено основні параметри та критерії, що повинні забезпечувати кінцевого користувача якістю отриманої послуги. Приведено методи PESQ, PEAQ, PEVQ, G.1030 і G.1040 як альтернатива оцінювання стандартним методом MOS.

У роботі запропонована імітаційна модель глобальної мережі на основі клієнт-серверної архітектури для здійснення передачі різнотипних потоків даних. Основним елементом моделі є утиліта Network Simulator – програма стимулятор глобальної мережі із можливістю гнучкої зміни її основних параметрів, а також програми для створення локального Web-серверу та медіа-трансляції.

Здійснено експериментальне визначення параметра QoE для трьох різнотипних видів трафіку: HTTP-трафік, потокове аудіо та відео в режимі реального часу, що проходив через імітаційну модель WAN-з'єднання із зміною ймовірності втрати пакету, пропускної здатності та типу розподілу затримки пакету. Значення QoE, при якому кінцевий користувач вважається якісно обслужений, вибрано таким, коли даний параметр приймає значення рівне 3 або вище. На основі отриманих результатів експериментів визначено:

- Для HTTP-трафіку основними параметрами впливу на якість сприйняття послуги є пропускна здатність і втрати пакетів. Для пропускної здатності вище 256 кбіт/с і втрат не більше 10%, при завантаженні стандартної Web-сторінки, QoE забезпечується.
- Для потокового аудіо та відео основними параметрами впливу визначено втрати пакетів та зміну затримки. Використавши три різні типи розподілу затримки пакету визначено, що найкращим є нормальний розподіл затримки, оскільки домінуючими значеннями затримки при такому розподілі є близькі до середнього значення, а найбільш подібний до реальних умов розподіл Маркова має найгірші можливості для забезпечення QoE, оскільки створює велике відхилення від середньої затримки. Втрати пакетів для аудіо не повинні перевищувати 10%, а для відео 5%. [17,114]

Розглянуті в роботі алгоритми можуть бути використані для управління довільним кінцевим числом логічних каналів - відповідних класів трафіків. З урахуванням цього, на основі запропонованого підходу визначення ефективності використання каналу зв'язку, що розглядаються відповідні

рішення можуть бути реалізовані в системі управління пропускною спроможністю каналу зв'язку на вузлі агрегації оператора (рис.3.12).

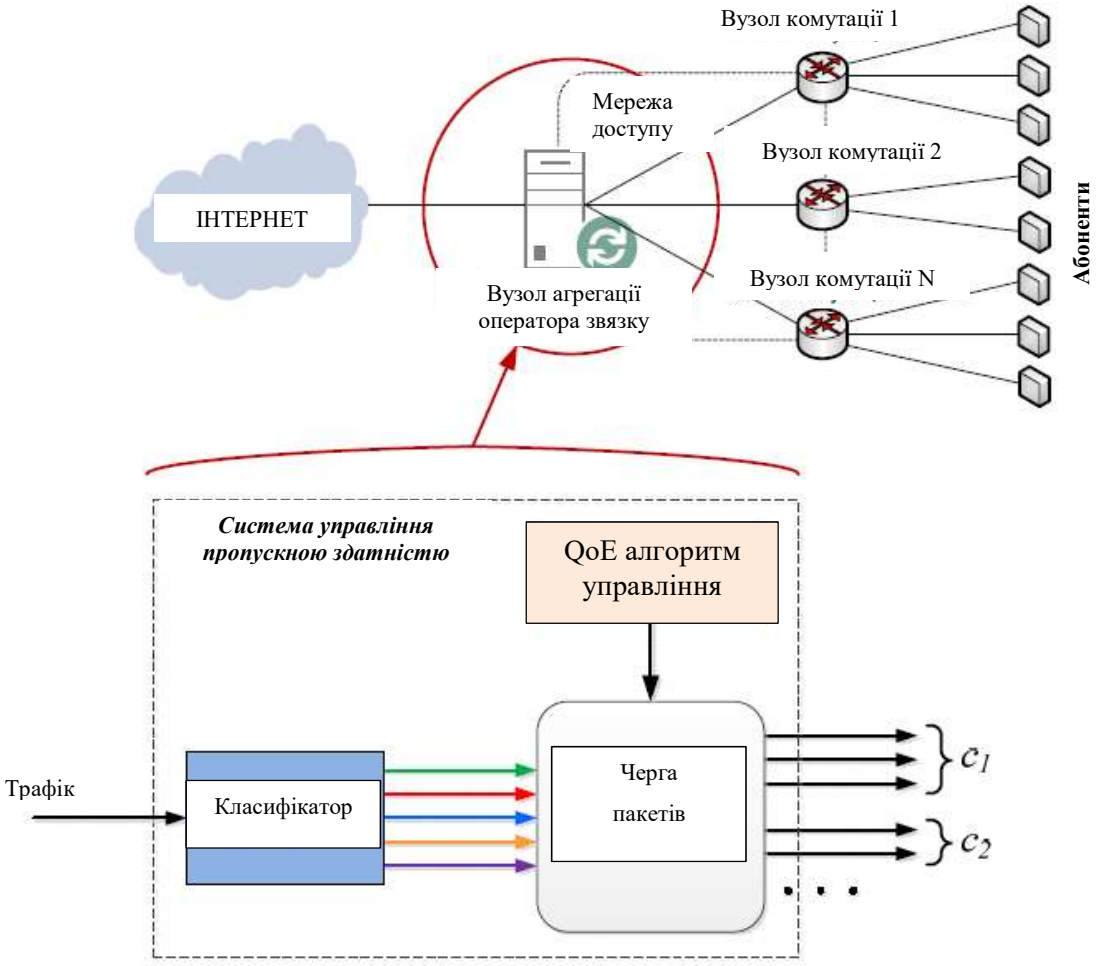


Рис.6.27. Практична реалізація системи управління пропускною здатністю каналу зв'язку

Даний метод визначення оптимального розподілу ресурсу пропускної здатності також може бути реалізований в рамках існуючих рішень управління трафіком, що передбачає класову структуру даних в мережі. Запропонована процедура дозволяє здійснювати управління пропускною спроможністю логічних каналів, адаптивне по відношенню до рівня завантаженості виділеного каналу зв'язку. При цьому збереження працездатності системи управління буде

забезпечено за рахунок першорядної передачі важливіших даних з урахуванням потреби в швидкості передачі. Запропонований метод визначення ефективного розподілу пропускної здатності каналу зв'язку може використовуватися в рамках окремого тарифу клієнта, коли різні типи трафіків будуть конкурувати між собою за передбачену договором максимальну швидкість передачі даних. Тоді, використання даного підходу, дозволяє виробляти динамічну адаптивну настройку системи управління пропускною здатністю в рамках окремого абонентського класу.

6.6 Суб'єктивна оцінка якості сприйняття послуг різних типів трафіку в функціонально-орієнтованій корпоративній мережі

З урахуванням величезного розмаїття всіляких сервісів і додатків в мережі зв'язку, уявлення абонентів про якість послуги в пікові моменти перевантаження загального каналу зв'язку можуть бути різні. Такими моментами можуть бути, наприклад, вечірні години, коли найбільше число користувачів активне і навантаження на канал зв'язку максимальне.

Це чітко видно на діаграмі, отриманій в результаті дослідження в реальній мережі зв'язку (рис. 6.28).

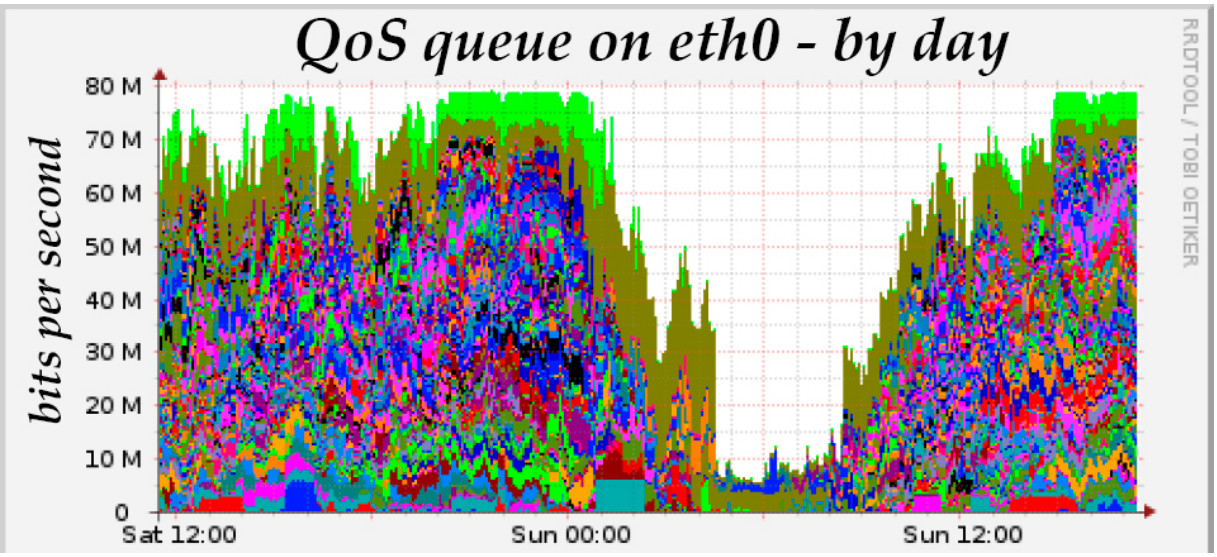


Рис.6.28 Статистика завантаження загального каналу зв'язку

Як видно з діаграми піковий момент перевантаження каналу зв'язку припадає на часовий інтервал з 21 до 24 годин. Пропускної здатності каналу зв'язку не вистачає для передачі абонентського трафіку з максимальною швидкістю тарифного плану.

Думка користувача про якість полуги, що надається є суб'єктивним поняттям і визначається загальним враженнм в період роботи в мережі Інтернет. Кінцеві споживачі, вимагаючи високої якості послуг, не можуть описати QoS, використовуючи технічні параметри. Досить час то, при надходженні скарг на якість роботи послуги, клієнт використовує інтуїтивні прості пояснення: «зображення рябить», «файл не завантажується» і т.д. В цьому випадку для оцінки якості послуг, що надаються операторами зв'язку використовується поняття «Якість сприйняття» (Quality of Experience, QoE), що характеризує сприйняття додатків кінцевим користувачем і визначає суб'єктивну оцінку сприйняття клієнтом телепатичних сервісів (рисунок 6.29) [24-26, 37].

Якість сприйняття (QoE) характеризує рівень послуг, що надаються з точки зору клієнта, незалежно від архітектури мережі і використовуваних в ній протоколів.

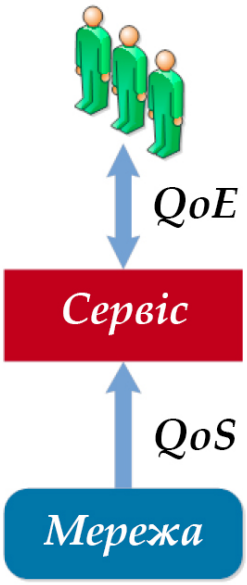


Рис.6.29 QoS – QoE співвідношення [24]

У разі, коли загальнй канал доступу в мережі оператора зв'язку вільний, і швидкість доступу кінцевого клієнта досягає максимальної, можна припустити, що якість обслуговування є прийнятною, і абонент повністю задоволений послугою. У разі перевантаження загального каналу доступу в мережу Інтернет, оператор зв'язку змушений зменшити швидкість кожного абонента, пропорційно заявленим тарифам. При цьому таке зниження швидкості може викликати різну реакцію абонентів мережі. В першу чергу на це буде впливати тип Інтернет додатку, який використовує (тип трафіку) клієнт. У разі якщо один клієнт відправляє електронний лист, а інший переглядає відеоролик, реакція від зниження швидкості доступу буде різною. Перший абонент, швидше за все, просто не помітить різницю, при цьому перегляд відео другого клієнта буде постійно перериватися, що безумовно негативно позначиться на загальному уявленні абонента про якість послуги, тобто на QoE.

Таким чином, можна зробити висновок, що різний тип трафіку по-різному впливає на уявлення абонента про якість наданої послуги доступу в мережу Інтернет, і тому завдання визначення та управління різних типів трафіку з позиції їх впливу на враження абонента є актуальним і пріоритетним завданням для оператора зв'язку.

У роботі пропонується новий алгоритм управління трафіком в мережі зв'язку на основі класифікації даних загального інформаційного потоку. Класифікація виконується з урахуванням ступеня впливу різних груп трафіків на загальне враження абонента про якість сервісу, що надається. Більш докладно розробка і реалізація даного методу розглядається в розділах 3 і 4. Варто відзначити, що характеристика QoE є суб'єктивним поняттям і не володіє очевидною кількісною оцінкою, що робить рішення задачі розробки системи управління нетривіальним. Виходячи з цього, завдання класифікації вирішене з використанням практичних даних, отриманих в результаті дослідження реальної мережі оператора зв'язку Львівської області протягом кількох років.

Виконувався наступний дослід : відправлялися одно адресні відео потоки для двох клієнтів по 10 Мбітній лінії. При недостатній пропускній здатності для двох одноадресних потоків, зображення, що передається, завмирає на секунду-дві, і коли продовжується показ, попереднє "заморожене" зображення залишається як свого роду “привид” зображення (рис 6.30).

Рис. 6.30. Зображення отримане без затримок

Рис. 6.31. Зображення отримане в результаті затримки

Якщо 10Мбіт/с недостатньо для 2 клієнтів, то 10 Гбіт/с недостатньо для 2000 клієнтів! З цього випливає, що використання багатоадресної передачі IP є єдиним розумним способом для провайдера IPTV компанії, яка обслуговує значну кількість активних клієнтів.

Дослідження QoE в залежності від QoS параметрів.

Тест, який був використаний для вимірювань мережі показано на рис.6.32. Було розглянуто ефект з наступних трьох параметрів QoS: втрати пакетів, джитер, затримки IGMP. Спостерігалася картина відеопотоку, яка приймається і декодується. Результати оцінювали суб'єктивно, оскільки QoE є суб'єктивною мірою.

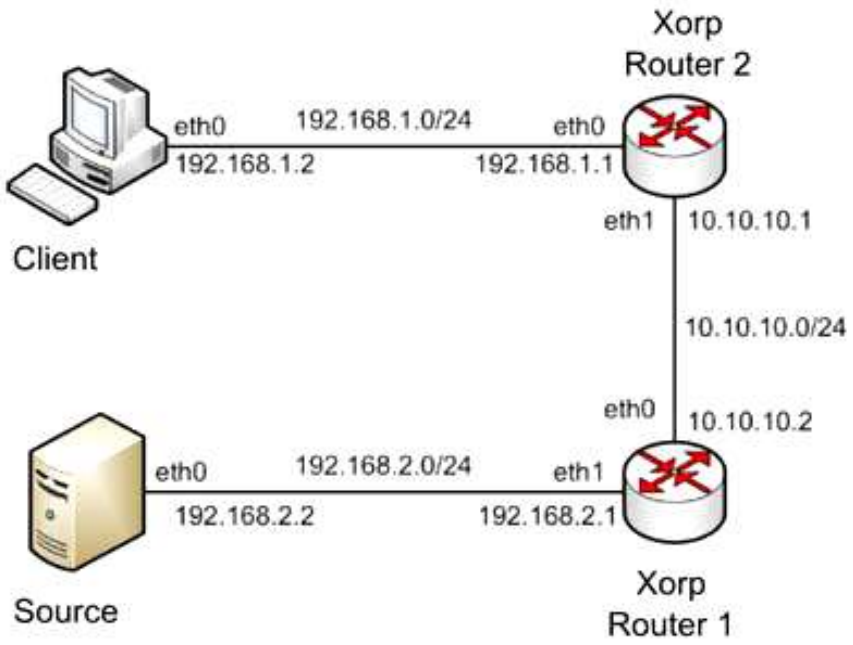


Рис. 6.32. Мережевий тест для багато адресної передачі IP пакетів.

Ефект втрачання пакетів

Втрачання пакетів було викликано наступним IPtables правилом використаним на Router 2:

```
iptables -A FORWARD -p udp -m statistic --mode random --probability [0<=x<=1] -j DROP
```

Це правило викликає те, що маршрутизатор 2 випадково викидає певну частину (x) відправлених пакетів UDP. Імовірність x була збільшена від 0,1% до 2% із кроком 0,1%, і від 2% до 10% з кроком 1%. Після установки ймовірності втрат пакетів, пакети відловлювалися протягом 30 секунд за допомогою

Wireshark. Кількість пакетів з неправильним порядковим номером була побудована в залежності від імовірності втрати пакета на рис. 6.33.

Рис. 6.33. Кількість пакетів із неправильним порядковим номером в залежності від ймовірності втрати пакетів

Квадратики іноді можна спостерігати у відео потоці навіть при 0,1% -ю вірогідністю втрати пакетів, але так відбувається рідко і відео відтворювалось безперервно (рис 6.34). Серйозні погіршення якості спостерігається при 1%: іноді картина розвалювалася або відео зупинялося . При 10% ймовірності втрат відео стало непридатне до перегляду, оскільки з’являлися регулярні квадратики на загальній картині і відео було не більше безперервно рухомого зображення (рис. 6.35). Через це, це не було жодних підстав для продовження спостереження більше 10%.

Рис. 6.34. Зображення при втратах 0,1%

Рис. 6.35. Зображення при втратах 1% (знизу)

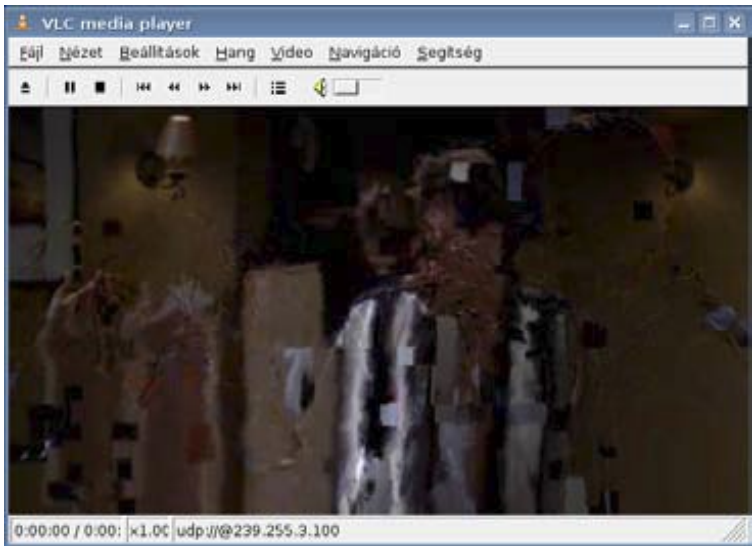


Рис. 6.36. Зображення при втратах 10%

Компонент ядра Linux Netem був використаний, щоб викликати джитер. Командний рядок TC використовується для управління netem. За замовчуванням, netem впливає на вихідний трафік, так що було призначено наступне на інтерфейс eth0 Роутера2:

```
tc qdisc add dev eth0 root netem delay 0ms <x>ms
```

На рис. 6.37 показаний ефект від величини джитера до якості зображення. Джитер значення менше 50 мс не викликає жодних видимих збоїв у зображенні. Квадратики виявляються після 50 мс, але це стається рідко що фактично не впливає на сприйняття відео файлу загалом. Понад 90 мс, картина була незадовільна для спийняття.

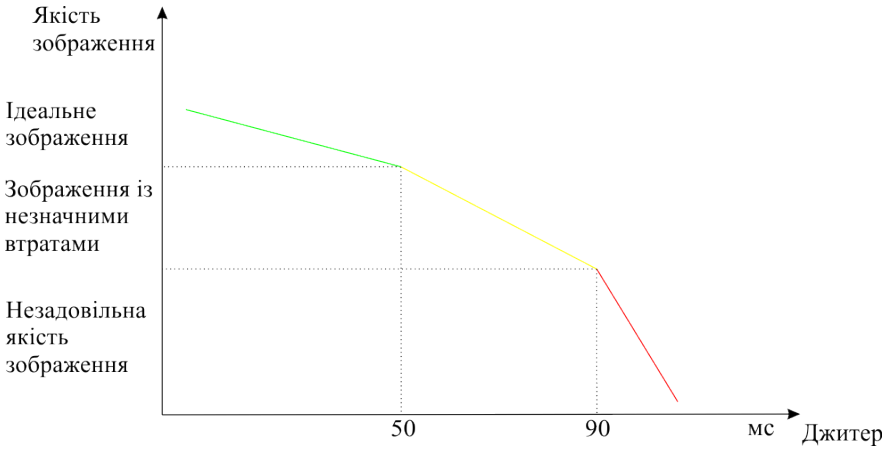


Рис 6. 37. Вплив джитеру на якість зображення

Отже, в результаті розроблення у докторській дисертаційній роботі запропонованих рішень щодо управління ресурсами корпоративної мережі проведено експеримент для оцінки їх ефективності та впливу на якість сприйняття клієнт-орієнтованої послуги (в даному випадку відео потік реального часу). Схема складається із двох програмних маршрутизаторів, клієнта та IPTV сервера [15]. Відповідно на рис. 6.38 продемонстровано вплив параметрів QoS (втрати, затримка, джитер) на QoE (якість сприйняття) користувачів мережі .

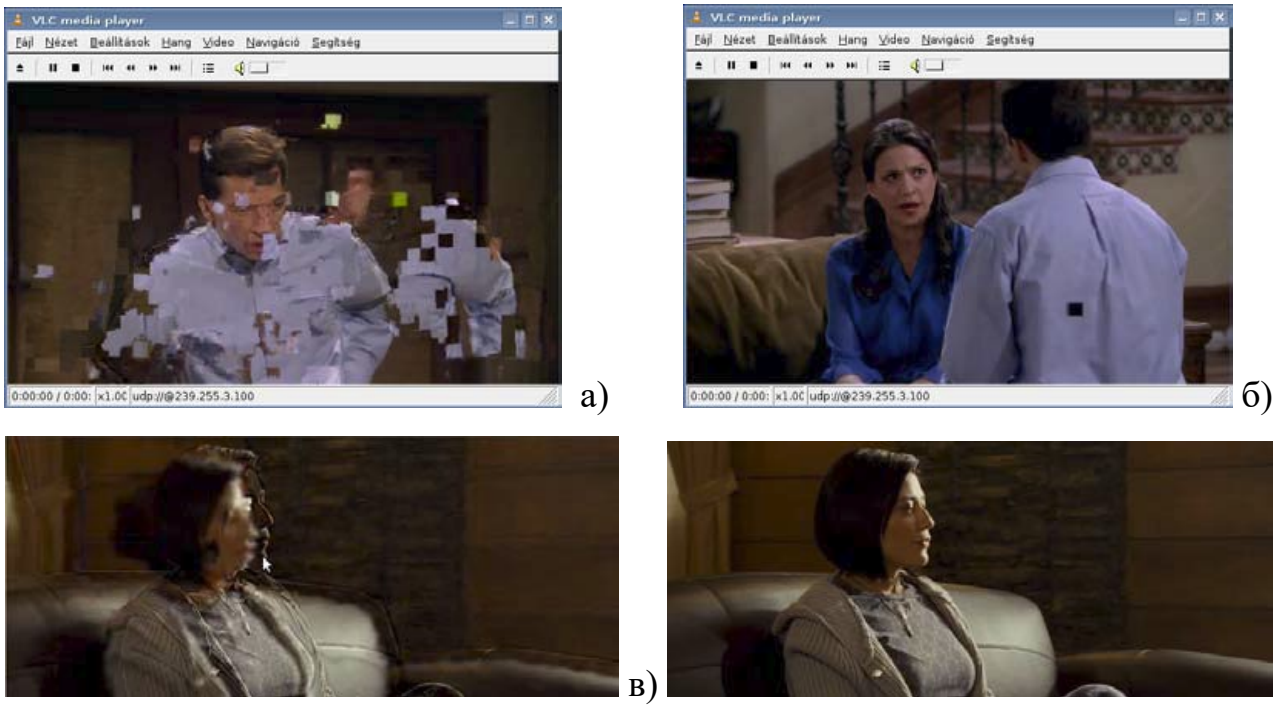


Рис. 6.38. Зображення при втратах 3% (а), затримкка 1 с (в) – існуючі рішення управління ресурсами корпоративної мережі (б) та при втратах 0,1% (г), затримка 100 мс – запропоновані рішення управління ресурсами корпоративної мережі

Висновки до 6-го розділу

1. Проведено обґрунтування доцільності використання віртуальних маршрутизаторів. При такому рішенні оператори дають змогу клієнтові без особливих витрат встановити контроль над приватною магістральною мережею

і забезпечити її безпеку, а також організовувати із мультисервісної мережі віртуальні моно-сервісні мережі з певним набором механізмів забезпечення якості обслуговування. При такій структурній організації мультисервісних мереж спрощується задача визначення моделі вхідного трафіку, оскільки вона дає змог розглядати будь-яку досліджувану систему як складну, що складається з окремих взаємопов'язаних віртуальних підсистем, які, в свою чергу, також можуть бути розділеними на частини. Програмне забезпечення, що управляє віртуальними маршрутизаторами, має модульну структуру; використовується кілька примірників ПЗ (по числу віртуальних маршрутизаторів), які виконуються в операційній системі, наприклад Unix, Linux, які забезпечують розподіл ресурсів для обробки по процесам. Процеси кожного віртуального маршрутизатора ізольовані і захищені від інших процесів.

2. Розроблено програмну модель маршрутизатора з можливістю розгортання віртуальних обслуговуючих пристроїв. В основі програмного маршрутизатора лежить технологія сокетів, які є програмними об’єктами операційної системи та складаються з IP адреси пристрою та TCP порту. Використовуючи API операційної системи, програмний маршрутизатор отримує сформований об’єкт сокету та використовує його для комунікації з іншими програмними маршрутизаторами, які встановлені на інших фізичних машинах у локальній мережі. Імітаційна модель маршрутизатора може бути максимально наближена до конкретної моделі виробника. Розподіл компонентів моделі мережі передавання даних можливо як на одному, так і на не декількох серверах з метою максимального наближення до реальних умов і моделювання мультисервісних мереж з необмеженим числом вузлів, не обмежуючись ресурсами одного фізичного пристрою.

3. На основі розробленої програмної моделі маршрутизатора проведено дослідження якості обслуговування потокового відео реального часу. Оскільки у багатьох сучасних маршрутизаторах алгоритм обслуговування черг FQ є одним з найефективніших для підтримки якості обслуговування, то в роботі

проведено порівняння часових параметрів QoS при використанні технології динамічної віртуалізації мережевого пристрою із алгоритму FQ. Аналізуючи отримані результати, доведено, що при розгортанні віртуальних маршрутизаторів класового призначення технологія динамічної віртуалізації мережевого пристрою забезпечує можливість вибору мінімального обсягу обчислювальних ресурсів маршрутизатора для гарантування заданого рівня якості обслуговування та дає змогу на 25-30% знизити тривалість затримки та джитер IPTV потоку.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв’язано наукову проблему забезпечення якості надання інфокомунікаційних послуг шляхом покращення оперативності обміну інформацією в мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мережах на основі створення методу адаптивного управління структурними параметрами мережевих пристроїв та розвитку математичних моделей і алгоритмів обслуговування черг.

За результатами розв’язання поставленої проблеми можна зробити такі висновки:

1. Проведено аналіз основних вимог, висунутих до функціонально-орієнтованих корпоративних мереж, який показав, що існуючі телекомунікаційні технології, на яких засновані методи управління розподілом трафіку в інформаційно-телекомунікаційних мережах, в умовах зростаючих об’ємів циркулюючої інформації, а також при динамічній зміні структури системи передавання даних не здатні задовільнити вимоги щодо оперативності обміну інформацією. Аналіз основних факторів, які впливають на управління розподілом трафіку, показав необхідність розроблення технології, яка орієнтована на адаптивне управління мережними ресурсами з метою підвищення оперативності передавання інформації в телекомунікаційних мережах корпоративного класу.

2. Формалізовано завдання адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі, шляхом урахування цільового призначення мережі, флуктуаційного характеру та пікових значень інтенсивностей потокового навантаження різних типів, що при динамічному програмному конфігуруванні ресурсів дало змогу забезпечити виконання вимог до продуктивності мережі, оперативності доставки даних і якості обслуговування абонентів за рахунок більш ефективного функціонування мережі без виділення надлишкових ресурсів. Для визначення ступеня

ефективності передавання даних в телекомунікаційній мережі визначено і обґрунтовано вибір відповідних показників і критерію.

3. Розроблено модифікований метод управління чергами в мультисервісних вузлах функціонально-орієнтованої корпоративної мережі. Одна з ключових відмінностей пропонованого рішення полягає в тому, що ведеться контроль за часом перебування в чергах пакетів і, в умовах перевищення допустимого часу очікування, пакет передається на чергу із нижчим пріоритетом та першочерговим обслуговуванням, що дає змогу підвищити ефективність розподілу мережних ресурсів за критерієм якості обслуговування.

4. Розроблено структурно-функціональну модель віртуального маршрутизатора зі статичною та динамічною конфігурацією ресурсів, яка дає змогу створювати віртуальні пристрої з оптимальними параметрами (за критеріями довжини черги, дисципліни керування переповненням черги, кількості обслуговуючих пристроїв, режиму роботи обслуговуючих пристроїв) для забезпечення необхідного рівня QoS в процесі надання послуг. Використання віртуальних мережевих пристроїв в існуючій мережевій інфраструктурі корпоративної мережі дало змогу ефективно розподіляти існуючі мережеві ресурси при великій завантаженості мережі з великою кількістю видів послуг, а також забезпечити необхідну якість сприйняття відповідних послуг кінцевими користувачами, зокрема послуг потокового мультимедіа, як найбільш поширеного та ресурсоємного трафіку.

5. Запропоновано математичну модель мережного пристрою з віртуальними маршрутизаторами. За допомогою такого математичного представлення можна визначити основні параметри системи віртуальних черг, що базуються на алгоритмі FIFO з метою проведення аналізу ефективності використання мережних ресурсів, а також визначення параметрів якості обслуговування потоків трафіку сервісів, що надаються, для заданої інтенсивності надходження пакетів на вхідний інтерфейс мережного елементу.

Запропоновано підхід щодо прогнозування тривалості затримки пакетів послуги в *i*-му віртуальному маршрутизаторі на основі якого можна отримати результати з вищою достовірністю, а також загального часу буферизації пакетів певного сервісу при проходженні через віртуальні вузли із різним коефіцієнтом завантаження на етапі проектування для різних за функціональною орієнтацією корпоративних мереж. Розраховано максимальну допустиму кількість транзитних вузлів, яка може бути задіяна для якісного надання мультисервісних послуг, а саме для голосових даних – відповідна прогнозована кількість вузлів збільшилась до 3.6 разів.

6. Запропоновано метод, який дає змогу з достатнім ступенем точності оцінити присутність в мережному трафіку аномальних властивостей та прийняти необхідні дії щодо блокування несанкціонованої мережної активності шляхом вивчення статистичних залежностей і ентропії трафіку. Разом із застосуванням концепції програмно-керованого віртуального мережного пристрою це підвищує стійкість корпоративних мереж до кібератак.

7. Досліджено вплив конфігурації мережних пристроїв на якість обслуговування засобом Packet tracer та OpNet modeler 14. Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що найкращим механізмом надання гарантованої якості обслуговування є Int-DiffServ. Проте, в умовах нестаціонарності потоків даних в мережі, інтенсивність яких в окремі періоди часу може суттєво перевищувати середньостатистичні значення, існуючі механізми не гарантують забезпечення якості обслуговування. Розроблено імітаційну модель обслуговування послуг в мережних вузлах. Для підтвердження адекватності запропонованої імітаційної моделі проведено аналіз агрегованого трафіку корпоративної мультисервісної мережі. Оцінка параметру Херста підтвердила високу ступінь самоподібності, характерну для мультисервісного трафіку. Це дослідження підтверджує адекватність обраних розподілів та методики формування трафіку на етапі його імітаційного

моделювання для подальшого оцінювання динаміки використання ресурсів мультисервісної мережі нового покоління.

8. Для оцінювання ефективності запропонованих у роботі рішень створено програмно-апаратну платформу функціонально-орієнтованої корпоративної мережі з використанням інструменту QtCreator (версія 5.2). На основі розробленої тестової платформи розроблено модель віртуалізованого програмно-керованого маршрутизатора, який володіє функцією адаптивного вибору алгоритму обслуговування черг в умовах явища випадкових сплесків трафіку характерних для мультисервісних мереж нового покоління. Адекватність розроблених моделей підтверджено на основі дослідження імовірнісних властивостей трафіку мультисервісної корпоративної мережі та порівняння із характеристиками роботи реальних маршрутизаторів. В результаті проведення імітаційного і практичного експериментів доведено, що застосування розроблених моделей та методів надання інфокомунікаційних послуг в мережах нового покоління приводить до покращення якості обслуговування потоків реального часу, а саме (в середньому) до 2 разів знижує затримку обслуговування та зменшує ймовірність втрат пакетів на 3%.

9. Розроблено програмну модель маршрутизатора з набором сучасних механізмів та алгоритмів обслуговування інформаційних потоків. На основі програмної моделі маршрутизатора розширено набір функціональних можливостей такого пристрою, зокрема режимом розгортання віртуальних вузлів з можливістю гнучкого управління структурними параметрами та можливістю автоматизованого відновлення працездатності. Одержано залежність між структурно-функціональними параметрами та параметрами якості обслуговування. Забезпечено узгоджене розв’язання завдань планування та управління обчислювальними ресурсами за рахунок застосування динамічної віртуалізації маршрутизаторів для гарантованого оброблення певних класів трафіку. Динаміка ресурсного управління забезпечується шляхом адаптивного перерозподілу мережного ресурсу при збільшенні або зменшенні обсягів

трафіку, що обслуговується. Концепція віртуалізації вузла забезпечує можливість призначення мінімального обсягу обчислювальних ресурсів маршрутизатора для гарантування заданого рівня якості обслуговування та дає змогу на 25-30% знизити показники затримки та джитера (для випадку обслуговування IPTV потоку реального часу).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Климаш М. М. Сучасні перетворення в архітектурах розподілених систем: монографія / М.М. Климаш, А.О. Лунтовський, В.І. Романчук. – Львів-Дрогобич: Коло, 2015. – 328 с.

2. Климаш М.М. Завади в транспортних DWDM мережах / М.М. Климаш, В.І. Романчук, Ю.Д. Добуш. – Львів, 2010. – 192 с.

3. Заявка u 2015 05649 Україна, МПК G06F 5/00. Спосіб поділу результатів моніторингу на дві групи / Климаш М.М., Пелішок В.О., Андрухів Т.В., Романчук В.І. Деклараційний патент на корисну модель, МПК (2016) G06F 5/00. (Україна). U201505649; Заявл. 08.06.2015; Опубл. 25.07.2016. Бюл. № 14, 2016.

4. Заявка u 2015 05662 Україна, МПК H04B 7/00. Спосіб оптичного передавання з кодовим розділенням каналів / Климаш М.М., Демидов І.В., Романчук В.І. Деклараційний патент на корисну модель, МПК (2009) H04J 13/02. (Україна). U200907598; Заявл. 20.07.2009; Опубл. 10.11.2009. Бюл. № 21, 2009.

5. Demydov I. Traffic Fluctuations Optimization for Telecommunication SDP Segment based on Forecasting using Ateb-functions: / I. Demydov, I. Dronyuk, O. Fedevych, V. Romanchuk // In: N. Kryvinska and M. Greguš, ed. Data-centric business and applications. Evolvements in business information processing and management. Series: Lecture notes on data engineering and communications technologies. Berlin: Springer International Publishing, 2018. – Vol. 20, pp. 71-88. DOI: 10.1007/978-3-319-94117-2_4, ISSN 2367-4512

6. Maksymyuk T. Designing the New Backhaul for 5G Heterogeneous Network Based on Converged Optical Infrastructure / T. Maksymyuk, O. Krasko, M. Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy// Acta Electrotechnica et Informatica, 2017. – Vol. 17, No. 4. – pp. 9–12, DOI: 10.15546/aeei-2017-0028.

7. Romanchuk V. Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT / Vasyl Romanchuk, Mykola Beshley, Andriy Prislupskiy, Halyna Beshley, Oleksiy Panchenko// Internet of Things (IoT) and Engineering Applications, Clausius Scientific Press, Canada. – 2018. –Vol.3. –pp. 22-23.

8. Romanchuk V. Development of software-based router model with adaptive selection of algorithms for queues servicing / V. Romanchuk, M. Klymash, M. Beshley, O. Panchenko, A. Polishchuk // Technology audit and production reserves. – 2018. - №3/2(41). - pp. 46-55. ISSN 2226-3780.

9. Климаш М.М. Розроблення програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів / М.М. Климаш, В.І. Романчук, О.М Панченко, М.І. Бешлей, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. Політехніка». – 2017. – № 766. –С. 76 – 85.

10. Бешлей М.І. Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритезації потоків у маршрутизаторах / М.І. Бешлей, В.В. Червенець, І.В. Демидов, В.І. Романчук, О.М. Панченко// Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал - Х: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. - 2016. –№5(142) - С. 114-123.

11. Романчук В. І. Аналіз структури мережевого трафіку та мережевих аномалій на прикладі сегмента локальної мережі кампусу Національного університету “Львівська політехніка”/ В. І. Романчук, С. В. Алексєєв, В. В. Червенець, Р. С. Колодій // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2014. - № 796. - С. 157–163.

12. Стрихалюк Б.М. Дослідження статистичних параметрів та характеристик інформаційних потоків в гетерогенних мережах / Б.М.Стрихалюк, І.В. Демидов, В.І Романчук, М.І. Бешлей // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. – №6(34). – С. 82-92.

13. Кільменінов О.А. Моделювання роботи маршрутизатора з віртуалізацією при заданих параметрах якості потокового трафіку / О.А. Кільменінов, В.І. Романчук// Наукові записки УНДІЗ. – 2017. – №4(48). – С. 12-17.

14. Романчук В.І. Аналіз імовірнісних характеристик трафіку інфокомунікаційної корпоративної мережі / В.І. Романчук, О.А. Лаврів, А.В. Поліщук, Р.І. Бак // Зб. наук. пр. УАД. – Львів, 2011. – Вип. 26, С. 145-151.

15. Климаш М. М. Матричний метод аналізу оптичних транспортних мереж зі спектральним ущільненням каналів / М. М. Климаш, В. І. Романчук // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2007. - № 595. - С. 92-98.

16. Андрухів Т. В. Моделювання повністю оптичних мереж зі спектральним ущільненням каналів / Т. В. Андрухів, В. І. Романчук, А. В. Поліщук // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2008. - № 618. - С. 145-152.

17. Романчук В.І. Покращення якості надання телекомунікаційних послуг в міських транспортних мережах з кодовим розділенням каналів / В.І. Романчук, Т.В. Андрухів, М.М Климаш // Зб. наук. пр. Комп'ютерні технології друкарства. – Львів, 2009. – №22. – С. 76 - 82.

18. Романчук В.І. Дослідження технології IP/MPLS при різних мережевих топологіях / В.І. Романчук, Ю.В. Антонюк, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2009. – № 645. – С. 95-103.

19. Романчук В.І. Моделювання міських мультисервісних мереж / В.І. Романчук, Ю.В Мітіхін, Р.С. Колодій, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2011. – № 705. – С. 152-158.

20. Чернихівський Є.М. Оцінка і управління якістю сприйняття послуги (QoE) в телекомунікаційних мережах / Є.М. Чернихівський, М.І. Кирик, В.І. Романчук, В.В. Червенець // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук.

пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2010. – № 680. – С. 132–135.

21. Климаш М.М. Дослідження та моделювання роботи Gigabit Ethernet комутатора транспортних оптичних мереж / М.М. Климаш, В.І. Романчук, Б.М. Стрихалюк // Вісник «Радіоелектроніка та телекомунікації». – 2004. - № 508. - С. 152-157.

22. Романчук В.І. Дослідження методів оцінювання якості сприйняття послуг для різних типів рафіку телекомунікаційних мереж / В.І. Романчук, М.М. Климаш, Б.В. Янишин // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2012. - № 738. - С. 165-172.

23. Романчук В.І. Метод узгодженого розв’язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами мережевих пристроїв / В.І Романчук, М.І. Бешлей, О.М. Панченко, А.В. Поліщук // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку. - 2018. - №2(50). - С. 48-57.

24. Бешлей Г.В. Метод декомпозиції структури мережного пристрою з віртуалізацією ресурсів / В. І. Романчук, М. І. Бешлей, А. М. Прислупський, Г.В. Бешлей // Наукові записки [Української академії друкарства]. – 2018. - №1(56). – С. 31-42.

25. Chervenets V. QoS/QoE Correlation Modified Model for QoE Evaluation on Video Service / V. Chervenets, V. Romanchuk, H. Beshley, A.Khudyy // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XIII th International Conference TCSET’2016 (Lviv – Slavske) 2016.– P. 664-666.

26. Romanchuk V. Research of Multimedia Streaming Transmission in Multiservice Networks / V. Romanchuk, V. Chervenets, A. Polishuk // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET’2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 39.

27. Romanchuk V. Development the Methods of Conversion to Photonic Transport Networks / V. Romanchuk, O. Krasko, O. Koretsky // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 258.

28. Romanchuk V. The Main Causes of Failures SQL Server / V. Romanchuk, T. Andrukhiv, I. Kahalo // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 258. (Scopus)

29. Beshley M. Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization / M. Beshley, V. Romanchuk, V. Chervenets and A. Masiuk // 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016, pp. 1-3.

30. V. Romanchuk. Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes / V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and A. Polishchuk / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 295-298.

31. Chervenets V. Quality increasing of traffic flow transferring in multiservice networks / V. Chervenets, V. Romanchuk, O. Puha and O. Bilyk / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 274-277.

32. Chervenets V. Investigation and Simulation of System for Data Flow Processing in Multiservice Nodes Using Virtualization Mechanisms / M . Klymash, V. Romanchuk, M. Beshley and and A. Polishchuk // 2017 IEEE First Ukraine Conference on electrical and computer engineering (UKRCON). - pp. 989-992.

33. Romanchuk V. Telemedicine system model using Internet-technology / V. Romanchuk, T M. Klymash, V. Krasko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2010 (Lviv – Slavske, February 23–27), 2010. - P. 259.

34. Polishchuk A. Research Methods to Provide Services in NGN / A. Polishchuk, E. Chernykhivsky, V. Chervenets, V. Romanchuk// Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the X th International Conference TCSET'2010. Lviv – 2010, P. 238.

35. Beshley M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network testbed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko, A. Masiuk // Proceedings of XIIIth international conference"The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics" CADSM'2015 (24-27 February, Lviv-Poljana, Ukraine), 2015. - P. 1-4.

36. Romanchuk V. Method for processing multiservice traffic in network node based on adaptive management of buffer resource / V. Romanchu M. Beshley, A. Polishuk and M. Seliuchenko // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018), Lviv-Slavske, 2018, pp. 1118-1122.

37. Романчук В.І. Аналіз методів оцінювання та контролю у Віртуальному навчальному середовищі Львівської політехніки / В.І. Романчук // Інноваційні комп'ютерні технології у вищій школі : матеріали науково-практичної конференції, 18–19 лютого 2010 року, Львів / Національний університет "Львівська політехніка". – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – С. 36–40.

38. Червенець В. В. Модель віртуального маршрутизатора з статичною та динамічною реконфігурацією ресурсів / М. І Бешлей, В. В. Червенець, В. І. Романчук, А. В. Поліщук // X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції (19-22 квітня 2016р., м. Київ, Україна), 2016 - К.: НТТУ «КПІ». – С. 140-142.

39. Романчук В. Дослідження імовірнісних властивостей трафіку корпоративної мультисервісної мережі / В. Романчук, В. Червенець // Комп'ютерні науки та інженерія, матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2011 – Львів. – 2011. – С. 220–221.

40. Романчук В. Реалізація QoS для мультимедійного трафіку в корпоративній мережі / В.І. Романчук, В.В. Червенець. // Матеріали НМК “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011”. – Львів – 2011. – С. 17 – 20.

41. В.І. Романчук. Дослідження динамічних методів маршрутизації на транспортний мережі / В.І. Романчук // Матеріали конференції “Інноваційні комп’ютерні технології у вищій школі”. – Львів, 2010. – С. 30-33.

42. В.І. Романчук. Перехід до фотонних мереж / В.І. Романчук, Красько О.В. // Наукова практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікації -2011”. – Львів 2011. – С. 17-21.

43. В.І. Романчук. Аналіз методів передачі трафіку реального часу в телекомунікаційних мережах / В.І. Романчук, О.А. Лаврів, А. В. Поліщук // Міжнародна конференція “Телекомунікаційні системи і технології” (МКТСТ’2011), 18-21 жовтня 2011р. - Харків, Україна. - С. 121 – 124.

44. В.І. Романчук. Дослідження передавання інформаційного навантаження потокового мультимедіа / В.І. Романчук, В.В. Червенець, А.В. Поліщук // Наукова-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій -2012”.– Львів, 2012. – С. 71-72.

45. В.І. Романчук. Моделювання перехресних завад в DWDM системах / В.І. Романчук, О.В. Корецький // Наукова-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2012”.– Львів, 2012. – С. 68-70.

46. Beshley M. Method of Resource Distribution for Mobile Cloud Computing Systems. / M. Beshley, B. Buhyl, V. Romanchuk, M. Klymash // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XII th International Conference TCSET’2014 (Lviv – Slavske), 2014. - P. 581-584.

47. В.І. Романчук. Програмовані SDN мережі. Сучасні виклики та інтеграція нових концепцій: Internet of Everything, SDN, ACI / В.І. Романчук,

С.В. Алексєєв // Наукова практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікації -2014”, 30 жовтня – 2 листопада, – Львів 2014. – С. 51-57.

48. М.М. Климаш. Розроблення макету мультисервісної мережі на базі програмно – апаратної платформи для забезпечення навчально – наукового процесу кафедри телекомунікацій / М.М. Климаш., В.І. Романчук., М.І. Бешлей // 1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT’2015). Conference proceedings. (29 October – 01 November, Lviv, Ukraine), 2015.– P. 175-178.

49. Лунтовський А.О. Дослідження ефективності використання ресурсів навчально-наукового центру паралельних обчислень / М.М. Климаш., В.І. Романчук, М.І. Бешлей, А.О. Лунтовський // Міжнародна науково-технічна конференція (Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології) Матеріали науково-технічної конференції 17–20 листопада 2015 м. Київ. - С.61-63.

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

51. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения.- 2-е изд., перераб. и доп. – Красноярск: Издательство ООО «Поликом», 2011. – 491 с.

52. Цыбаков Б.С. Модель телетрафика на основе случайного процесса //Радиотехника. 1999. № 5.- С. 24-31.

53. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях / Под ред. О.И. Шелухина. - М.: Радиотехника, 2003, 480с.

54. Буранова М.А., Сапрыкин А.В. Исследование статистических свойств мультимедийного трафика при обработке в сети MPLS // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: Материалы XIV Международной научной конференции. –Самара, 2016. – С.139-140.

55. Причины самоподобности в сетевом трафике / Л.А. Фомин, Г.И. Линец, Д.В. Шлаев и др. // Электросвязь. 2008. №2.- С.20-23.

56. W. Willinger, M. S. Taqqu, W. E. Leland, and V. Wilson, ~'Selfsimilarity in high-speed packet traffic: analysis and modeling of Ethemet traffic measurements," Statistical Sci., vol. 10, pp. 67-85, 1995.

57. Walter Willinger , Murad S. Taqqu , Robert Sherman , Daniel V. Wilson, Self-similarity through high-variability: statistical analysis of ethernet LAN traffic at the source level, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, v.25, n.4, p.100-113, Oct. 1995 [doi>10.1145/217391.217418]

58. W. Willinger, M. S. Taqqu, and A. Erramilti, "A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modem high-speed networks," in Stochastic Networks: Theory and Applications, F. P. Kelly, S. Zachary and !. Ziedins, Eds, Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 1996.

59. Tsybakov, B.S. Self-Similar Processes in Communications Networks [Text] / B.S. Tsybakov, N.D. Georganas // Information Theory, 1998. – vol.44. – no.5. – pp.1713-1725.

60. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. Монография: Под ред. О.И. Шелухина. М.: Радиотехника, 2003. 480 с.

61. Дробот О.А. Комплексная модель обеспечения гарантированного качества обслуживания с реализацией динамических стратегий распределения сетевых ресурсов / Дробот О.А. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2007. № 148. С.43-54.

62. Ложковский А.Г. Исследование системы обслуживания с ожиданием и рекуррентным потоком вызовов / Ложковский А.Г. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2004. – № 2. – С. 56–59.

63. Ложковский А.Г. Сравнительный анализ методов расчета характеристик качества обслуживания при самоподобных потоках в сети /

А.Г. Ложковский // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип. 47. – К.: 2008. – С. 187–193.

64. Ch. Semeria, Supporting differentiated service clases: Queue schdeuling principles, Juniper Networks, http://www.juniper.net. Part number: 200020-001 12/01.

65. Вероятностные методы в инженерных задачах : справочник / А.Н. Лебедев, М. С. Куприянов, Д. Д. Недосекин, Е. А. Чернявский. – СПб. : Энергоатомиздат, 2000. – 333 с.

66. . Кузьмин, В.В. Организация системы управления трафиком и расчета телекоммуникационных услуг в распределенной сети оператора связи [Текст] / В.В. Кузьмин, А.В. Семашко, Ю.В. Белова // Электросвязь. – 2013. - № 9. – С. 47-51

67. Кузьмин, В.В. Система учета телематических услуг в сети оператора связи [Текст] / В.В. Кузьмин, А.В. Семашко, Ю.В. Белова // Вопросы защиты информации. – 2013. - № 4. – С. 34-38.

68. S. Akhtar, E. Ahmed, A. kumar Saha, K. S. Arefin, “Performance Analysis of Integrated Service over Differentiated Dervice for Next Generation Internet”, Journal of Computer and Information Technology, vol. 1, pp. 95-101, 2010.

69. T. Ahmed, R. Boutaba and A. Mehaoua, ”A Measurement-Based Approach for Dynamic QoS Adaptation in DiffServ Networks”, Science Direct, Computer Communications, Volume 28, Issue 18, November 2005, pp. 2020-2033.

70. Герцій О. А., Гребінь Р. О. Методи забеспечення якості зв’язку мультисервісних мереж. // Збірник наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 20. – К.: ДЕТУТ, 2012. – с.191-196

71. S. Shioda, K. Mase, “Performance Comparison between IntServ-Based and DiffServ-Based Networks”, In Global Telecommunications Conference, IEEE, vol.1, pp 1-6, 2005.

72. Бешлей М.І. Модель системи динамічного управління пропускною здатністю каналу інтегрованої WI-FI/GSM мережі / М. І.Бешлей, В.П.Ткачук,

Б.А. Бугиль, О.А. Лаврів // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2014.- № 796. - С. 83-96.

73. ETSI, “Human Factors (HF); Quality of Experience (QoE) requirements for real-time communication services,” European Telecommunications Standards Institute, TR 102 643, Jan. 2010.

74. Ning Wang An overview of routing optimization for internet traffic engineering / Ning Wang, Kin Hon Yo, George Pavlou, Michael Howarth // IEEE Communications Surveys & Tutorials 1st Quarter 2008. – P. 36-56.

75. A. Takahashi, D. Hands, and V. Barriac, “Standardization activities in the ITU for a QoE assessment of IPTV,” Communications Magazine, IEEE, vol. 46, no. 2, pp. 78 –84, february 2008.

76. Mykhailo Klymash System for Increasing Quality of Servise of Multimedia Data in Convergent Netvorks / Mykhailo Klymash, Mykola Beshey , Bohdan Stryhaluk, Marian Seliuchenko // Problems of Infocommunications. Science and Technology. – IEEE First International Conference. Kharkiv, October 14-17, 2014. – 2014. P .63-66.

77. H. Tian, X. Zhou and J. Liu, "A Hybrid Network Traffic Prediction Model Based on Optimized Neural Network," 2017 18th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT), Taipei, 2017, pp. 284-287.

78. U. Martinez-Corral and K. Basterretxea, "A fully configurable and scalable neural coprocessor IP for SoC implementations of machine learning applications," 2017 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS), Pasadena, CA, 2017, pp. 125-132.

79. Алі С. Алі. Потокова модель динамічного балансування завантаженості черг на вузлах MPLS-мережі / Алі С. Алі, О.В. Симоненко // Сучасні проблеми телекомунікацій – 2010: наук.-практ. конф., 28-30 жовтня 2010 р.: матеріали конф. - Львів: НУ "Львівська політехніка", 2010. - С. 40-43.

80. Женжера С.В. Математическая модель с динамическим управлением сетевыми ресурсами на узлах телекоммуникационной сети / С.В. Женжера, А.В. Симоненко // Новітні технології – для захисту повітряного простору: шоста наук. конф. Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 14-15 квітня 2010 р.: тези доповідей – Х.: ХУ ПС, 2010. – С.116-117.

81. Симоненко А.В. Потоковая модель динамической балансировки загруженности очередей на узлах IP-сети / А.В. Симоненко, Али С. Али, А.С. Билык, // Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях - КМНТ-2010: науч.-техн. конф. с междунар. участием, 18-21 мая 2010 г.: сб. науч. трудов – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2010. – Ч. 2. – С.231-234.

82. Лемешко А.В. Математическая модель динамической балансировки загруженности очередей на узлах телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко, А.В. Симоненко // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: V міжнар. наук.-техн. конф., 22-24 вересня 2010 р. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. – С.111-112.

83. Симоненко А.В. Динамическая балансировка загруженности очередей на узлах телекоммуникационной сети / А.В. Симоненко, А.Г. Беленков // Сучасні телекомунікаційні та інформаційні технології: наук.-практ. семінар молодих науковців, травень-червень 2010 р.: наук.-виробн. збірник – Київ.: Український науково-дослідний інститут зв’язку, 2010. –№1 – С.16-18.

84. 8. Лемешко А.В. Управление очередями на узлах активной сети / А.В.Лемешко, М. Ватти, А.В. Симоненко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. 2007. – Вып. 151. – С. 92-97.

85. Beshley M.M. Increasing the efficiency of real-time content delivery by improving the technology of priority assignment and processing of IP traffic / M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Lavriv, V. Chervenets, H. Kholiavka, M. Klymash // Smart Computing Review, - 2015.- Vol.5,- No.2. – P.76-88

86. Beshley M. SOA quality management subsystem on the basis of load balancing method using fuzzy sets / M. Beshley, M. Klymash, B.Strykhalyuk,

O. Shpur, B. Bugil, I. Kagalo // International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE). – 2015 - Volume 4 - Issue 1 – P.10-21.

87. Климаш М. М. Модель надання сервісів на основі методу адаптації логічної структури cloud-системи / М. М. Климаш, Б. М. Стрихалюк, О.М. Шпур, М. І. Бешлей // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. –№5(33) – С. 27-36

88. K. Seshadrinathan, R. Soundararajan, A. Bovik, and L. Cormack, “Study of Subjective and Objective Quality Assessment of Video,” Image Processing, IEEE Transactions on, vol. 19, no. 6, pp.1427 –1441, june 2010.

89. P. Romaniak, “Hybrid Solution for Quality of Experience Assessment of Video Streams Integrating Network Provider and User Approaches — Introduction to Research,” Ph.D. dissertation, AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland, 2009.

90. T. A. Okamoto J., Watanabe K., “Media-layer Objective Video Quality Assessment Technology for Video Communication Services,” International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector, Technical Review J.144 (04/2009), April 2009.

91. Стрихалюк Б.М. Дослідження статистичних параметрів та характеристик інформаційних потоків в гетерогенних мережах / Б.М.Стрихалюк, І.В.Демидов, В.І. Романчук, М.І. Бещлей // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. – №6(34) – С. 82-92 .

92. Mykhailo Klymash System for Increasing Quality of Servise of Multimedia Data in Convergent Netvorks / Mykhailo Klymash, Mykola Beshey , Bohdan Stryhaluk, Marian Seliuchenko // Problems of Infocommunications. Science and Technology. – IEEE First International Conference. Kharkiv, October 14-17, 2014. – 2014. P .63-66.

93. Klymash M. The model of prioritization of service for efficient usage of resource multiservice network. / M. Klymash, M. Beshley, V. Koval // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science

Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 320-321

94. Klymash M. The researching and modeling of structures of mobile networks for providing of multiservice radio access. / M. Klymash, R. Savchuk, P. Pozdnyakov M. Beshley // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 281-282

95. M. Beshley. Research and Development the Methods of Quality of Service Provision in Mobile Cloud Systems. / M. Beshley , T. Maksymyuk , B. Stryhaluk, M. Klymash. // The 2014 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (IEEE BlackSeaCom 2014), Odessa, Ukraine – Chisinau, Moldova, May 27-30, 2014. – Chisinau:TUM, 2014. - pp. 163-169.

96. Климаш М.М. Дослідження побудови технологічних ресурсів у конвергентній мережі на базі мобільного оператора для надання послуги Triple Play / М.М. Климаш, О.В. Корецький, М.І. Бешлей, В.Б Янишин.// Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А.Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2011. - № 705. - С. 176-183

97. Климаш М.М. Модель системи управління ресурсами мультисервісних мереж в умовах самоподібності трафіку /.О.А. Лаврів, М.І.Бешлей, Гнатчук М.М. , Поліщук А.В. // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А.Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2012. - № 738. - С. 168-175.

98. Мельник А.О. Порівняльний аналіз типів пам'яті комп'ютера / А.О.Мельник, Д.Х. АльРавашдех // Вісник Національного університету"Львівська політехніка: комп'ютерні системи та мережі. - Львів : Львівська політехніка, 2007. -No 603.-с.81-86.

99. Верхола Б. Дисципліни обслуговування черг на мережевому рівні OSI / Б. Верхола. //Комп'ютерні технології друкарства. Львів. -2010. №24.-с. 134-140

100. A.G. P. Rahbar, and O. Yang, “LGRR: a new packet scheduling algorithm for differentiated services packet-switched networks,” Sarhan M. Musa et al Int. Journal of Engineering Research and Applications www.ijera.com ISSN : 2248-9622, Vol. 3, Issue 6, Nov-Dec 2013, pp.1587-1591 www.ijera.com 1591 | P a g e Computer Communications, Vol. 32, Issue 2, pp. 357-367, 2009.

101. T. Velmurugan, H. Chandra, and S. Balaji, “Comparison of queuing disciplines for differentiated services using OPNET, ” International conference on Advance in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom), Kottayam, Kerala India, pp. 744–746, Nov. 2009.

102. Y. Miaji and S. Hassan, “Comparative Simulation of Scheduling Mechanism in Packet switching Network,” in Proc. Network Applications Protocols and Services (NETAPPS), 2010 Second International Conference, pp. 141-147, 2010.

103. Ch. Semeria, Supporting differentiated service clases: Queue schdeuling principles, Juniper Networks, http://www.juniper.net. Part number: 200020-001 12/01

104. S. Floyd. Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance / S. Floyd and V. Jacobson // ACM/IEEE Transactions on Networking, 1(4):397-413, August 1993.

105. Cisco SCE 2000 Series Service Control Engine [Electronic resource] / Cisco Systems. – 2013. –Mode of access: http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/ps7045/ps6129/ps6133/ps6151/product_data_sheet0900ae cd801d8574.html.

106. Симоненко, А. В. Потоковые модели и методы управления очередями на интерфейсах маршрутизаторов транспортных телекоммуникационных сетей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.12.02 "Телекоммуникационные системы и сети" / А. В. Симоненко ; М-во образования и науки Украины, Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники. – Харьков, 2015. – 155 с.

107. Кузьмин, В.В. Методы управления трафиком в кампусных сетях оператора связи [Текст] / В.В. Кузьмин, А.В. Семашко // Электросвязь. – 2012. – № 5. – С. 37-40.

108. Д.В. Агеев. Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом эффекта самоподобия / Д.В. Агеев,А.А. Игнатенко А.Н. Копылев // Проблемы телекоммуникаций.-2011.-№3(5).-С.18-37.

109. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller," 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 282-286.

110. H. Beshley, M. Beshley, T. Maksymyuk and I. Strykhalyuk, "Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay," 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 1147-1151.

111. Косенко В.В., Бугас Д.Н. Анализ эффективности использования ресурсов мультисервисной информационно-телекоммуникационной сети // Технологический аудит и резервы производства — № 5/2(25), 2015. Ст. 17-22.

112. Киреева Н. В . Частный случай исследования параметров трафика сети для определения законов распределения времени передачи пакетов / Киреева Н.В., Чупахина Л. Р. //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований Выпуск № 5-3 / 2015.-с. 395-398

113. Seliuchenko M. Development of monitoring system for end-to-end packet delay measurement in Software-Defined Networks / M.Seliuchenko, M.Beshley, O.Panchenko, M.Klymash // Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science. Proceedings of the International

Conference TCSET’2016 (Lviv-Slavske, Ukraine, February 23–26, 2016). – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2016. – P.667-670.

114. M. N. Zapater and G. Bressan, “A Proposed Approach for Quality of Experience Assurance of IPTV,” in First International Conference on the Digital Society. ICDS ’07., 2007.

115. O. Panchenko, A. Polishuk, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Method for adaptive client oriented management of quality of service in integrated SDN/CLOUD networks," 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology, Kharkov, 2017, pp. 452-455.

116. M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Algorithm for clusterization, aggregation and prioritization of M2M devices in heterogeneous 4G/5G network," 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkov, 2017, pp. 182-186.

117. Будылдина Н.В. Оптимизация сетей с многопротокольной коммутацией по меткам / Н.В. Будылдина, Д.С. Трибунский, В.П. Шувалов – М.: Горячая линияТелеком, 2010. – 144 с.

118. T. A. Okamoto J., Watanabe K., “Media-layer Objective Video Quality Assessment Technology for Video Communication Services,” International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector, Technical Review J.144 (04/2009), April 2009.

119. M. Klymash, H. Beshley, O. Panchenko and M. Beshley, "Method for optimal use of 4G/5G heterogeneous network resourses under M2M/IoT traffic growth conditions," 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, 2017, pp. 1-5.

120. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko and A. Polishuk, "Adaptive flow routing model in SDN," 2017 14th International Conference The Experience of

Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, 2017, pp. 298-302.

121. M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley, "State of the art and further development of information and communication systems," 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016, pp. 1-6.

122. B. Wang, X. Wen, S. Yong, and Z. Wei, “A New Approach Measuring Users’ QoE in the IPTV,” in Circuits, Communications and Systems, 2009. PACCS ’09. Pacific-Asia Conference on, 2009, pp. 453–456.

123. A. Bhat, I. Richardson, and S. Kannangara, “A new perceptual quality metric for compressed video,” in Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009. ICASSP 2009. IEEE International Conference on, 2009, pp. 933–936.

124. Скулиш М. А. Удосконалення алгоритму керування інформаційними потоками у вузлах телекомунікаційних мереж / М. А. Скулиш //Вісник Харківського національного університету №863, 2009. –с. 237-245.

125. Мельник А.О. Порівняльний аналіз типів пам’яті комп’ютера / А.О.Мельник, Д.Х. Аль Равашдех // Вісник Національного університету"Львівська політехніка: комп'ютерні системи та мережі. - Львів : Львівська політехніка, 2007. -No 603.-с.81-86.

126. M. Klymash, M. Seliuchenko, M. Beshley and S. Redchuk, "Increasing wavelengths utilization efficiency in OTNoDWDM network based on local resource distribution method," 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2015, pp. 157-160.

127. Бугиль Б.А. Методи оптимізації фізичної та логічної структур телекомунікаційних мереж / О.А. Лаврів, Б.А. Бугиль, В.В. Червенець, М.І.Бешлей // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2013. - № 766. - С. 76-81.

128. Стрихалюк Б.М. Моделювання та тестування системи управління гетерогенної мережі доступу / Б.М. Стрихалюк, М.І. Бешлей, Г.В. Холявка, М.В. Брич // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: - 2015. – №1 - С. 22-31.

129. A.G. P. Rahbar, and O. Yang, “LGRR: a new packet scheduling algorithm for differentiated services packet-switched networks,” Sarhan M. Musa et al Int. Journal of Engineering Research and Applications www.ijera.com ISSN : 2248-9622, Vol. 3, Issue 6, Nov-Dec 2013, pp.1587-1591 www.ijera.com 1591 | P a g e Computer Communications, Vol. 32, Issue 2, pp. 357-367, 2009.

130. W. Mardini, and M. M. Abu-Alfoul, “Modified WRR scheduling algorithm for WiMAX networks,”Network Protocols and Algorithms, vol. 3, n0. 2, pp. 24-53, 2011.

131. A. Erramilli, O. Narayan, and W.Willinger, “Experimental queuing analysis with long-range dependent packet traffic,” IEEE/ACM Transactionson Networking, vol. 4, no. 2, pp. 209–223, Apr. 1996.

132. On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similar network traffic / [Park K., Kim G., Crovella M.] // Proceedings of the Fourth International Conference on Network Protocols (ICNP’96) . .1996. . P.171-180.

133. Strykhalyuk B., Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems / B.Strykhalyuk, I.Kahalo, M.Brych, M.Beshley, M.Seliuchenko // Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал - Х: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. - 2014. – №4(40) - С. 125-132

134. Климаш М. М. Оптимізація багатошарової структури транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM за допомогою методу діакоптики / М. М. Климаш, М. В. Кайдан, М. І. Бешлей, А. В. Редька // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. - 2015. - № 3. - С. 32-42.

135. Бешлей М.І. Оцінка адекватності функціонування програмного маршрутизатора у процесі обслуговування мультимедійного трафіку //

М.І. Бешлей, О.М. Селюченко, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк, Г.В. Холявка// Вісник Національного університету «Львівська політехніка» №818. Радіоелектроніка та телекомунікації.

136. Socrates C. Congestion Control for Packet Switched Networks: A Survey / C. Socrates, P.M. Beulah Devamalar, R. Kannamma Sridharan // International Journal of Scientific and Research Publications. – 2014. – Vol.4. – P. 1-6;

137. Jianyong Chen. Self-Tuning Random Early Detection Algorithm to Improve Performance of Network Transmission / Jianyong Chen, Cunying Hu, and Zhen Ji // Mathematical Problems in Engineering. – 2012. – P. 1-17.

138. Jui-Pin Yang. Pushout with Differentiated Dropping Queue Management for High- Speed Networks / Jui-Pin Yang // Applied Mathematics & Information Sciences. – 2015. - №4. – P. 1961-1969.

139. Soumen Sarkar. Investigation on the Influence of Packet Sizes on WRR Queue Management in Ethernet switch / Soumen Sarkar, Nikolay Kakanakov, Shyam Sundar Prasad // Mobile Communication and Power Engineering. – 2013. – P. 50-55.

140. Faritha Banu J. Multipath virtual queue management system for effective packet scheduling in MPLS networks / J. Faritha Banu, V. Ramachandran // Indian Journal of Computer Science and Engineering. – 2012. - №4. – P. 588-594.

141. Климаш М. Розробка методу балансування навантаження в SDN мережах на основі модифікованого протоколу STP / М. Климаш, М. Бешлей, О. Панченко // Комп'ютерні технології друкарства. - 2015. - № 2. - С. 146-155.

142. Demydov I. Features of the cloud services implementation in the national network segment of Ukraine / I. Demydov, M. Klymash, M. Beshley, O. Shpur // Information and telecommunication science. K.: NTUU «KPI», 2016. - No.1. - P. 31-38.

143. Fang Y. Buffer Management Algorithm Design and Implementation Based on Network Processors / Yechang Fang, Kang Yen, Deng Pan, Zhuo Sun // International Journal of Computer Science and Information Security.- 2010.– Vol.8, №1. – P. 1-8;

144. Sumalatha S. Multicast Node Communication Using Virtual Queue with Process Scheduling / S. Sumalatha, G. Sreenivasulu, G. Uday Kiran Bhargava // Journal of Computer Science. – 2015. - №11 (2) – P.337-343.

145. Jiao Zhenzhen Jiao. A virtual queue-based back-pressure scheduling algorithm for wireless sensor networks / Jiao Zhenzhen Jiao, Baoxian Zhang1, Wei Gong, Hussein Mouftah // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2015. - P. 2-9;

146. Ramtin Pedarsani. Stability of multiclass queueing networks under longest-queue and longest-dominating-queue scheduling / Ramtin Pedarsani, Jean Walrand // Applied Probability Trust. – 2015. – P. 1-18;

147. Sonagara Payal T. Round Robin CPU Scheduling Using Dynamic Time Quantum with Multiple Queue / Sonagara Payal T. // International Journal of Science and Research. – 2015. – Vol.4 – P.997-999.

148. Annadurai C. Review of Packet Scheduling Algorithms in Mobile Ad Hoc Networks / Annadurai // International Journal of Computer Applications. – 2011. – Vol. 15, No. 1. – P. 7- 10.

149. Alnowibet K.A. Nonstationary Erlang Loss Queues and Networks // PhD Thesis, North Carolina State University, 2004. – 140 p.

150. Wei-Ping Wang, David Tipper, Sujata Banerjee. A Simple Approximation for modeling Nonstationary Queues // Proceedings of the Fifteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer Societies (INFOCOM '96). – 1996. – V.1. – P. 255–262.

151. Еременко А.С., Лебеденко Т.Н., Старкова Е.В. Анализ влияния состояния интерфейса на динамику загруженности очереди на маршрутизаторе телекоммуникационной сети // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2015. – №3.– С. 45-51.

152. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 425 с.

153. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения. – СПб.: BHV. – 2005. – 288 с.

154. Ch. Semeria, Supporting differentiated service clases: Queue schdeuling principles, Juniper Networks, http://www.juniper.net. Part number: 200020-001 12/01

155. Чернихівський Є.М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж. Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 272 с.

156. Cisco Systems. Cisco IOS 12.0 Quality of Service. Indianapolis: Cisco Press, 1999.

157. Vegesna, Srinivas. IP Quality of Service for the Internet and the Intranets. Indianapolis: Cisco Press, 2000.

158. Бешлей Г. В. Алгоритм кластеризації, агрегації та класифікації M2M пристроїв в гетерогенній мережі 4G/5G / Г. В. Бешлей, М. О. Селюченко, І.А. Берневек, С. І. Пущак, М. І. Бешлей. // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2017. –№874. –ст. 95 -102. (Index Copernicus, Google scholar)

159. Климаш М.М. Підвищення якості обслуговування в конвергентних мобільних системах на основі платформи UMA-A [Електронний ресурс] /М.М. Климаш, М.І. Бешлей, О.А. Лаврів, Б.М. Стрихалюк, Г.В.Проблеми телекомунікацій. – 2014. – № 1 (13). – С. 3 - 19.

160. Ferguson, Paul, and Huston, Geoff. Quality of Service: Delivering QoS on the Internet and in Corporate Networks. New York: John Wiley & Sons, 1998.

161. Вегешна, Шринивас. Качество обслуживания в сетях IP. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 368 с.: ил.

162. Климаш М.М., Бурачок Р.А., Андрухів Т.А. Методи визначення показника якості послуг в телекомунікаційних мережах. - Львів: В-во НВЕД УАД – 2009.– 285 С.

163. Шнепс М. А. Системы распределения информации. Методы расчета: Справ. пособие / А. М. Шнепс. М.: Связь. – 1979. – 344 с.

164. А.Г. Ложковський Розвиток теорії телетрафіка : 64-ї наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, науков. та аспірантів . – Одеса,12.02.2009.

165. Васильев, К. К. Математическое моделирование систем связи : учебное пособие / К. К. Васильев, М. Н. Служивый. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 170 с.

166. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7.0+SIMULINK 5/6. Основы применения / В. П. ДЬЯКОНОВ. – М.: Солон-пресс, 2005. – 800 с.

167. Вероятностные методы в инженерных задачах : справочник / А.Н. Лебедев, М. С. Куприянов, Д. Д. Недосекин, Е. А. Чернявский. – СПб. : Энергоатомиздат, 2000. – 333 с.

168. Ермаков, С. М. Статистическое моделирование : учебное пособие / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов // – М. : Наука, 1982. – 296 с.

169. Томашевський В.М. Моделювання систем. – К.: Видавнича група BHV, 2007. – 352 с.: іл.

170. K. Park, W. Willinger. Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation, John Wiley & Sons, 2000.

171. Яновский Г.Г. Качество обслуживания в сетях IP// Вестник связи – 2008. – №1.

172. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.: Наука и Техника, 2004. – 336: ил.

173. МСЭ-Т Recommendation Y.1541. Network Performance Objectives for IP-Based Services//May 2002.

174. МСЭ-Т Recommendation Y.1540. IP Packet Transfer and Availability Performance Parameters//December 2002.

175. S. Shenker and J. Wroclawski. General Characterization Parameters for Integrated Service Network Elements (IETF RFC 2215). Internet Engineering Task Force, September 1997.

176. R. Braden, D. Clark, and S. Shenker. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview (IETF RFC 1633). Internet Engineering Task Force, June 1994.

177. R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin, ”Resource ReSer-Vation Protocol (RSVP)-Version 1”, Functional Specification, Request for Comments: 2205, September 1997.

178. Guo Hai, Jia Bo, “Soho Network Modelling and Simulation using Opnet,” Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 48, No. 3(Feb. 2013), pp. 1855-1860

179. S. Black, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang and W. Weiss, ”Architecture for Differentiated Services”, RFC2475, December 1998.

180. K. Nichols, V. Jacobson and L. Zhang, “A two-bit differentiated services architecture for the Internet”, Network Working Group, RFC 2638, July 1999.

181. Definition of the (DS Field)in the IPv4 and IPv6 Headers; RFC-2474, December 1998 [Электронный ресурс]/K. Nichols./ - Режим доступу до статті: http://www.ietf.org/rfc/rfc2474.txt

182. T. A. Okamoto J., Watanabe K., “Media-layer Objective Video Quality Assessment Technology for Video Communication Services,” International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector, Technical Review J.144 (04/2009), April 2009.

183. Recommendation ITU-T G.1050. Network model for evaluating multimedia transmission performance over Internet Protocol: - 11/2007.

184. Рекомендация ITU-R BT.1683. Методы измерения объективного воспринятого качества изображений в вещательном телевидении стандартной четкости в присутствии изображения эталонного качества. - 2004.

185. C. J. Branden Lambrecht Perceptual Quality Measure using a Spatio-Temporal Model of the Human Visual System / C. J. Branden Lambrecht and O. Verscheure // Proc. SPIE. - March, 1996. - Vol. 2668. - PP. 450-461. [cited by 96].

186. Рекомендация ITU-R BT.500-13. Методика субъективной оценки качества телевизионных изображений. - 01/2012.

187. Understanding PQR, DMOS, and PSNR Measurements [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www.tektronix.com.

188. Mykhailo Klymash, Ivan Demydov, Mykola Beshley, Olga Shpur. Features of the cloud services implementation in the national network segment of ukraine // Information and Telecommunication Sciences, 2016.-PP. 31-38

189. Дробот О.А., Беленков А.Г., Чепелюк С.А. Управление сетевыми ресурсами в мультисервисных телекоммуникационных сетях//Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: Материалы X Международного молодежного форума (10-12 апреля 2006 р.).–Харьков: Харьковский национальный университет радиоэлектроники,2006.С.18.

190. Лемешко А.В., Симоненко Д.В., Дробот О.А. Анализ многопутевых решений задач QoS маршрутизации // Информационные технологии: наука, техника, технологии, образование, здоровье: Материалы XIV Международной научно-практической конференции (18-19 мая 2006 г.). – Харьков: Харьковский политехнический институт, 2006. – С. 64.

191. Дробот О.А., Чепелюк С.А., Тугай А.В. Модель управління мережними ресурсами з врахуванням QoS-вимог // Світ інформації та телекомунікацій-2006: Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції студентства та молоді (26-27 травня 2006 р.). - Київ: Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, 2006. – С. 78.

192. Iacovazzi A. Network Communication Privacy: Traffic Masking against Traffic Analysis /Alfonso Iacovazzi // Ph.D. Thesis. – 2013. – Rome, Italy: Sapienza University of Rome. 119 p.

193. Markowsky G. Who's Knocking at Your Cybercastle's Gate? / G. Markowsky, L. Markowsky // In Proceedings of International Conference on Security and Management. – 2012. – Las Vegas Nevada, USA : DCSREA Press. – P. 206-212.

194. Bouten N. QoE Optimization Through In-Network Quality Adaptation for HTTP Adaptive Streaming / N. Bouten, J. Famaey, S. Latre, R. Huysegems, B.D. Vleeschauwer, W. Van Leekwijck, F. D. Turck // Proceedings of the 8th International Conference on Network and Service Management. – 2012. – Las Vegas, USA :

195. Bujlow T. Volunteer-Based System for classification of traffic in computer networks / T. Bujlow, K. Balachandran, M.T. Riaz, J.M. Pedersen // In Proceedings of 19th Telecommunications Forum TELFOR 2011'. 2011. Sydney : IEEE Press. - P. 210-213.

196. Vladusic D. Using the black-box approach with machine learning methods in order to improve job scheduling in GRID environments / D. Vladusic // WSEAS Transactions on Systems and Control. – . – 2009. – i.6,v.4. – P. 259-270.

197. Garcıa J.L.B. Improved Self-management of DataCenter Systems Applying Machine Learning // J.L.B. Garcıa / Ph.D.Thesis. – Barcelona, Catalunya (Spain) : Polytechnic University of Catalonia. – 2013. – 155 p.

198. Zander S. Automated Traffic Classification and Application Identification using Machine Learning / S. Zander, T. Nguyen, G. Armitage // Proceedings of the IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary. 2005. Sydney : IEEE Press. – P. 250- 257.

199. Chakravarty S. Traffic Analysis Attacks and Defenses in Low Latency Anonymous Communication / S. Chakravarty // PhD thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Graduate School of Arts and Sciences. – Manhattan, New York, USA : Columbia University, 2014. – 138 p.

200. Alreshoodi M. Survey on QoE/QoS correlation models for multimedia services [Text] / M. Alreshoodi, J. Woods // International journal of distributed and parallel systems. – Bristol, PA, Taylor & Francis Inc.– 2013. – Vol. 4, №. 3. – P. 53–72.

201. Skorin-Kapov L. A Multi-Dimensional View of QoE: the ARCU Mode L. Skorin-Kapov, M. Varela // Proceedings of the 35th International Convention MIPRO. – 2012. – Optija, Crotia : IEEE Press. – P. 662 – 666.

202. Mateo P. A Context-aware Model for the Analysis of User Interaction and QoE in Mobile Environments / P. Mateo, D. S. Ruiz, G. M. Perez // International Journal of Human-Computer Interaction. – 2014. – Vol. 30I. 12. – Norwood, N.J, USA : Ablex Pub. – P. 946-964.

203. Теленик С. Ф. Зведення метрик оцінювання рівня обслуговування користувачів на основі експертних оцінок [Текст] / С. Ф. Теленик, О. І. Ролік, О. М. Моргаль, О. С. Квітко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 1. – С. 112–123.

204. Nanduri R. Job Aware Scheduling Algorithm for MapReduce Framework / R. Nanduri, N. Maheshwari, R. Raja, V. Varma // 3rd IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science.– Athens, Greece : IEEE Press, 2011. – P. 724–729.

205. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой / А. П. Карпенко. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446 с.

206. SLA Management Handbook / TM Forum Publication. – Morristown, NJ, USA : TeleManagement Forum, 2001. – 141 p.

207. Varela M. From Service Level Agreements (SLA) to Experience Level Agreements (ELA): The challenges of selling QoE to the user [Text] / M. Varela, P. Zwickl, M. Xie, H. Schulzrinne [et al.] // Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on 8–12 June 2015. – London, UK : IEEE Press, 2015. – P. 1741–1746.

208. Москаленко В.В. Інтелектуальна система керування розподілом ресурсів телекомунікаційної мережі /В.В. Москаленко, С.В. Пимоненко // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Обчислювальний інтелект». – Черкаси : ЧДТУ. – 2015. – С. 249.

209. N. Shah, "Understanding network processors," Tech. Rep. Version 1.0, EECS, University of California, Berkeley, September 2001.

210. Ладиженський Ю.В. Грищенко В.И. Моделирование сетевых процессоров пакетной обработки данных. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції „Інтернет – Освіта – Наука - 2006”, м. Вінниця, 10 – 14 жовтня 2006 р., т. 2, стр. 417-422.

211. Samarjit Chakraborty, Simon Kunzli, Lothar Thiele et. al. Performance evaluation of network processor architectures: combining simulation with analytical estimation. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking. Vol. 41, Iss. 5 (Apr. 2003). 2003. pp. 641 – 665.

212. M. Gries, C. Kulkarni, C. Sauer, K. Keutzer. Comparing Analytical Modeling with Simulation for Network Processors: A Case Study. Design Automation and Test in Europe (DATE), Munich, Germany, March 2003.

213. Tilman Wolf, Mark A. Franklin, "Performance Models for Network Processor Design," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 17, no. 6, pp. 548-561, Jun., 2006.

214. M. Ahmadi, S. Wong, A Performance Model for Network Processor Architectures in Packet Processing Systems, Proceedings of the 19th International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS 2007), pp. 176-181, Cambridge, Massachusetts, USA, November 2007

215. F. Baker et al. RFC1812 - Requirements for IP Version 4 Routers. Cisco Systems. June 1995.

216. В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы.3-е изд.-2006, СПб, Изд. дом "Питер", 958 стр.

217. P. Ferguson and G. Houston, Quality of Service: Delivering QoS on the Internet and in Corporate Networks, John Wiley & Sons, 1998.

218. Canfora, G., Di Penta, M., Esposito, R., Villani, M.L.: An Approach for QoS-aware Service Composition based on Genetic Algorithms. In: GECCO 2005, ACM Press, New York (2005)

219. Canfora, G., Di Penta, M., Esposito, R., Perfetto, F., Villani, M.L.: Service Composition (re)Binding Driven by Application-Specific QoS. In: Dan, A., Lamersdorf, W. (eds.) ICSOC 2006. LNCS, vol. 4294, Springer, Heidelberg (2006)

220. Nguyen, X.T., Kowalczyk, R., Han, J.: Using Dynamic asynchronous aggregate search for quality guarantees of multiple Web services compositions. In: Dan, A., Lamersdorf, W. (eds.) ICSOC 2006. LNCS, vol. 4294, Springer, Heidelberg (2006)

221. Trang, D. D. Fractal Analysis and Modeling of VoIP Traffic // D. D. Trang, B. Sonkoly, S. Molnar// Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium. 2004. - Issue №1. - P. 123-130.

222. Crovella, M. E. Self-similarity in world wide web traffic: Evidence and possible causes / M. E. Crovella, A. Bestavros// IEEE/ACM Trans. Networking - 1997. Vol. 5, № 6. - P. 835-846.

223. Samorodnitsky, G. Stable Non Gaussian Random Processes: Stochastic Model swith Infinite Variance Электронный документ. / G. Samorodnitsky , M. Taqqu. Режим доступу: http://math.bu.edu/people/murad/stable-expanded.html - 08.12.2008

224. 11. R.I. ITU-T,910, "Subjective video quality assessment methods for multimedia applications, 1999

225. Book: Antoine Cornuéjols-Laurent Miclet. "Apprentissage artificiel: concepts et algorithms" EYROLLES, 2010.

226. D.K.Krishnappa, S.Khemmarat, M.Zink, "Planet Youtube: Global, measurement-based performance analysis of viewer;'s experience watching user generated videos," Local Computer Networks, Annual IEEE Conference on, pp. 948-956, 2011 IEEE 36th Conference on Local Computer Networks, 2011.

227. 1G.Zhang, W. Jin, L. Hu, "Radar emitter signal recognition based on support vector machines," Control, Automation, Robotics and Vision Conference, (ICARCV), vol.2, no., pp. 826-831 Vol. 2, 6-9 Dec. 2004.

228. M.J. Islam, Q.M.J. Wu, M. Ahmadi, M.A. Sid-Ahmed, "Investigating the Performance of Naive- Bayes Classifiers and K- Nearest Neighbor Classifiers," Convergence Information Technology, International Conference, pp.1541-1546, 21-23 Nov. 2007.

229. M. Pal, P.M. Mather, "A comparison of decision tree and backpropagation neural network classifiers for land use classification," IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), vol.1, no., pp. 503-505 vol.1, 2002.

230. W.T. Aung, K..H.M Saw Hla, "Random forest classifier for multi-category classification of web pages," IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference (APSCC), pp.372-376, 7-11 Dec. 2009.

231. J. C. S. Andrade, R. B. C. Ribeiro, R. S. Villaça, M. Martinello and C. A. S. Santos, "SANGN: A New Service Oriented Architecture for Provisioning of NGN Scalable Multimedia Services," 2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), Krakow, 2018, pp. 504-511.

232. M. A. Barry, J. K. Tamgno, C. Lishou and M. B. Cissé, "QoS impact on multimedia traffic load (IPTV, RoIP, VoIP) in best effort mode," 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Chuncheon-si Gangwon-do, Korea (South), 2018, pp. 694-700.

233. Филиппов А.К. Теоретические основы проектирования динамически реконфигурируемых систем обработки информации: учебн. пособ. / Филиппов А.К. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. − 119 с.

234. Иванов А.И. О создании и применении проблемно-ориентированных комплексов, предназначенных для решения задач, обладающих высокой емкостной и временной сложностью / А.И. Иванов // Штучний інтелект. − 2004. − № 4. − С. 15 – 26.

235. Гузик В.Ф. Проблемно-ориентированные высокопроизводительные вычислительные системы: учебн. пособ. / В.Ф. Гузик, В.Е. Золотовский. − Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 236 с.

236. Опанасенко В.Н. Высокопроизводительные реконфигурируемые компьютеры на базе FPGA / В.Н. Опанасенко // Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. праць НАУ. – 2009. – Вип. 3 (27). – С. 114 – 118.

237. Палагин А.В. Проблемная ориентация в развитии компьютерных архитектур / А.В. Палагин, А.Ф. Кургаев // Кибернетика и системный анализ. − 2003. − № 4. − С. 167 − 180.

238. Палагин А.В. Об ЭВМ с виртуальной архитектурой / А.В. Палагин // Управляющие системы и машины. − 1999. − № 3. − С. 33 – 43.

239. Task Scheduling Onto Dynamic Large-Scale Parallel Cluster (DLPC) / Hu Kai, Jianwei Niu, Jianping Hu // Proc. of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, PDPTA 2000, (Las Vegas, Nevada, USA, June 24–29, 2000). – Las Vegas: CSREA Press, – 8 p.

240. Sharifi M. Power-efficient distributed scheduling of virtual machines using workload-aware consolidation techniques / M. Sharifi, H. Salimi, M. Najafzadeh // The Journal of Supercomputing. –Netherlands: Springer, 2011. – P. 1 – 21.

241. Білоконь І. Побудова динамічно реконфігурованої обчислювальної архітектури з використанням технологій віртуалізації / І. Білоконь, Д. Грязнов, С. Погорілий // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – (Серія «Радіофізика та електроніка»). – 2010. – Вип. 14. – С. 4 – 6.

242. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS.3-е изд.-СПб.:Питер;Киев:Издательская группа BHV, 2004.-847 с., ил.

243. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MatLab. Учебный курс.-СПб.:Питер; Киев: Издательская группа БХВ,2005.-512 с.:ил.

244. Морозов В.К., Рогачев Г.Н. Моделирование информационных и динамических систем М.: Издательский центр “Академия”, 2011. – 384 с.

245. Семеняка М.В. Исследование концепции иерархических очередей для

246. решения задач управления перегрузками в телекоммуникационной сети / М.В. Семеняка, А.В. Симоненко // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO’2012 – Livadia): VIII міжнар. наук.-техн. конф., 1-5 жовтня 2012 р.: зб. тез – К: ДУІКТ, 2012. – С. 68-70.

247. Lemeshko O. Researching and designing of the dynamic adaptive queue balancing method on telecommunication network routers / O. Lemeshko, M. Semenyaka, O. Simonenko // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013): XII international conference, 19-23 Febr. 2013. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – P. 204-207.

248. Лемешко А.В. Модель активного управления очередями на маршрутизаторах телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко, М.В. Семеняка, А.В. Симоненко // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону: ПЦ "Университет" СКФ МТУСИ'2015. – Ч.1 – С. 244-248.

249. Симоненко А.В. Математическая модель управления очередями на маршрутизаторах телекоммуникационной сети на основе оптимального агрегирования потоков и распределения пакетов по очередям [Електронний ресурс] / А.В. Симоненко, Д.В. Андрушко // Проблеми телекомунікацій. – 2015. – № 1 (16). – С. 94 - 102. – Режим доступу до журн.: http://pt.journal.kh.ua/ 2015/1/1/151_simonenko_queue.pdf.

250. Lemeshko O. Researching and designing of the dynamic adaptive queue balancing method on telecommunication network routers / O. Lemeshko, M. Semenyaka, O. Simonenko // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013): XII international conference, 19-23 Febr. 2013. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – P. 204-207.

251. Червенець В. В. Підвищення якості передачі потокового трафіку в мультисервісних мережах : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі / Володимир Володимирович Червенець ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів, 2016. – 173 с. – Бібліографія: с. 151–166 (121 назва).

252. Бешлей М.І. Підвищення якості обслуговування пріоритетного трафіку реального часу у вузлах мультисервісної мережі: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі / Микола Іванович Бешлей ; Міністерство

освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів, 2015. – 24 с. – Бібліографія: с. 15–19 (40 назв).

Додаток А. Акти впровадження

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Директор
ТзОВ ВТФ "Контех"
_____ Смольницький Є.С.
"20" 05 2018 р.

АКТ
про використання результатів докторської дисертаційної роботи
Романчука Василя Івановича
на тему:
" Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж "

Даний акт складений про те, що у ТзОВ ВТФ "Контех" використані результати кандидатської дисертаційної роботи Романчука В.І. "Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж". А саме:

- технологія динамічної віртуалізації мережевого пристрою забезпечує можливість вибору мінімального обсягу мережевих ресурсів для гарантування заданого рівня якості обслуговування та покращує часові показники якості обслуговування потокового трафіку в режимі реального часу на 25-30%;
- метод балансування різнопріоритетного навантаження між чергами у відповідних мережних інтерфейсах телекомунікаційних вузлів і встановлення пріоритетності його оброблення за принципами диференціації сервісів, що дав змогу першочергово передавати пакети, які спізнюються, наслідком чого стає адаптація процесу обслуговування навантаження до зміни стану мережного вузла для забезпечення якості сервісу.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ ВТФ "Контех" відповідають результатам теоретичних досліджень, що представлені у дисертаційній роботі.

Директор Є.С. Смольницький

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Директор
ТзОВ "Телекомунікаційна компанія"
_____ Пентак І.М.
"20" 05 2018 р.

АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи
Романчука Василя Івановича
на тему:

" Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж "

Даний акт складений про те, що у ТзОВ "Телекомунікаційна компанія" використані результати кандидатської дисертаційної роботи Романчука В.І. "Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж". А саме:

- алгоритм зваженого кругового обслуговування черг в мережевих вузлах мультисервісної мережі, який дає змогу зменшити затримку обслуговування інформаційних послуг реального часу з кінця в кінець до 2 разів та забезпечитъякість сприйняття відео потоку при втратах до 3%;
- структурно-функціональна модель мережевого вузла зі статичною та динамічною віртуалізацією обчислювальних ресурсів, яка дає змогу описати процес адаптивної віртуалізації маршрутизаторів оптимізацією заданого рівня параметрів якості для визначених типів сервісу з набором властивих їм вимог до забезпечення якості обслуговування та підвищити загальну стійкість системи до кібератак шляхом ізолювання атакованої віртуальної машини.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ "Телекомунікаційна компанія", відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 5%.

Головний інженер І.М. Рубаха

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор

ПП "Цифрові технології"

_____ Танчак З.В.

"04" квітня 2018 р.

АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи

Романчука Василя Івановича

на тему:

" Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж "

Даний акт складений про те, що у ПП "Цифрові технології" для підвищення якості обслуговування абонентів безпровідного зв'язку у процесі надання інформаційних потоків використані результати дисертаційної роботи Романчука В.І. "Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- метод виявлення аномалій мережевого трафіку, який базується на вивченні статистичних поведінкових залежностей і ентропії інтенсивності трафіку, що дало змогу забезпечити блокування або фільтрацію небажаних інформаційних потоків в програмно-контрольованих корпоративних мережах;
- метод декомпозиції структури мережного маршрутизатора, який базується на структурно-функціональній моделі віртуалізації його ресурсів та дає змогу зменшити флуктуації часових параметрів обслуговування різних видів трафіку, які виникають через коливання їх інтенсивності, підтримувати задані параметри якості обслуговування та оцінювати ефективність масштабованих мережних рішень корпоративного класу.

Внаслідок перевірки використаних моделей та методів на мережному обладнанні у ПП "Цифрові технології" встановлено, що результати знаходяться в межах п'ятивідсоткового середньоквадратичного відхилення від поданих у дисертаційній роботі.

Провідний інженер Дрофяк А.М.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Проректор з науково-педагогічної роботи
НУ "Львівська політехніка"

_____ доц. Давидчак О.Р.
"14" 05 2018 р.

АКТ
про використання результатів докторської дисертаційної роботи
Романчука Василя Івановича
на тему:
" Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж "

Даний акт складений комісією у складі:
- д.т.н., проф. Климаш М.М., завідувача кафедри телекомунікацій;
- к.т.н., доц. Колодій Р.С., заступника декана базової вищої освіти Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н. Стрихалюк Б.М., заступника директора Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;

про те, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати кандидатської дисертаційної роботи Романчука В.І. "Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж", а саме:

- модель програмного маршрутизатора, яка, володіє здатністю до самоорганізації віртуальних аналогів апаратних маршрутизаторів різної продуктивності в залежності від функціонально-орієнтованого призначення корпоративних мереж та можливістю автоматизованого відновлення працездатності і гарантування заданого рівня якості обслуговування з мінімальними затратами мережних ресурсів використана в навчальному процесі, в лекційних курсах і лабораторній роботі "Динамічний розподілу та резервування пропускної здатності каналу між декількома логічними в гетерогенній мережі, з дисципліни «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку» для студентів спеціальності 8.17000200 «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізація «Інформаційні мережі зв'язку»
- технологія динамічної віртуалізації мережевого пристрою, яка забезпечує можливість вибору мінімального обсягу мережевих ресурсів для гарантування заданого рівня якості обслуговування та покращує часові показники якості обслуговування потокового трафіку в режимі реального часу використана в навчальному процесі, в лекційних курсах і лабораторних роботах, з дисципліни «Розподілені сервісні системи та Cloud-технології»

Члени комісії:

_____ Климаш М.М.
_____ Колодій Р.С.
_____ Стрихалюк Б.М

Додаток Б. Лістинг програми роботи мережевого пристрою з віртуалізацією ресурсів

```
    #include "fifoservicethread.h"
    using namespace std ;

    virtualRouterFIFOServiceThread::
virtualRouterFIFOServiceThread (QObject *parent) :
        QThread(parent)
    {

qRegisterMetaType<MyDelaysArray>("MyDelaysArray");
        packet_processing_speed = 10;
        current_queue        =packets_processed        =
packets_dropped = bits_processed = 0;
        packets_extracted_from_buffer = 0;
        active = false;
    }


    void virtualRouterFIFOServiceThread::run()
    {
        output_interfaces_manager          =          new
OutputPortManager();

connect(output_interfaces_manager,SIGNAL(outputInterfaceS
tateNotification(int,bool)),out_interfaces_GUImanager,SLO
T(outputInterfaceStateNotification(int,bool)));

connect(out_interfaces_GUImanager,SIGNAL(connectInterface
```

```
(int,QString,int)),output_interfaces_manager,SLOT(addVirt
ualPort(int,QString,int)));

connect(this,SIGNAL(updatePacketProcessingSpeed(int)),gui
_plots_manager,SLOT(updatePacketProcessingSpeed(int)));

connect(this,SIGNAL(updatePacketProcessingDelay(MyDelaysA
rray)),gui_plots_manager,SLOT(updatePacketProcessingDelay
(MyDelaysArray)));

connect(this,SIGNAL(updateCriticalPacketProcessingDelay(M
yDelaysArray)),gui_plots_manager,SLOT(updateCriticalPacke
tProcessingDelay(MyDelaysArray)));

connect(this,SIGNAL(updateRouterUtilization(int)),gui_plo
ts_manager,SLOT(updateRouterUtilization(int)));

connect(this,SIGNAL(updateBuffersPlots(MyDelaysArray)),gu
i_buffers_manager,SLOT(updateBufferPlot(MyDelaysArray)));

        initializeArraysAndTimers();
        int delay = 0;
        while(active)
        {

            //qDebug() << "FIFO Thread started!";
           /* for(int i=0; i<7; i++)
            {
               if(boost_Ibuffer->queues_length[i]<0)
```

```
                boost_Ibuffer->queues_length[i] = 0;
            }*/
                while(boost_Ibuffer->get(TOS_CRITICAL)>0)
                {
                    IP_Packet ip;
                    if(boost_Ibuffer-
>pullPacket(TOS_CRITICAL,ip))
                    {
                        delay = 0;

//aggregated_delay_on_interval.append(delay);
                        packets_extracted_from_buffer++;
                        ip.header_crc=0xABCD;
                        ip.ver_ihl=70;
                        ip.options+=delay;
                        qDebug() << "Forwarding packet!";
                        if(output_interfaces_manager-
>forwardIPPacket(ip))
                            packets_processed++;
                         else
                            packets_dropped++;
                        qDebug()                        <<
"==============DONE!";
                        //qDebug() << "FIFO-elapsed: " <<
ip.timer->nsecsElapsed();
                        //delete ip.timer;
                        ip.freeMemory();
                        qDebug() << "MEMPRY FREED!";
                    }
```

```
                    if(boost_Ibuffer-
>get(TOS_VOIP)>BUFFER_VOIP_SIZE){current_queue=0; break;}
                    if(boost_Ibuffer-
>get(TOS_VIDEOCONF)>BUFFER_VIDEOCONF_SIZE){current_queue=
1; break;}
                    if(boost_Ibuffer-
>get(TOS_IPTV)>BUFFER_IPTV_SIZE){current_queue=2; break;}
                    if(boost_Ibuffer-
>get(TOS_HTTP)>BUFFER_HTTP_SIZE){current_queue=3; break;}
                    if(boost_Ibuffer-
>get(TOS_INTERACTIVE)>BUFFER_INTERACTIVE_SIZE){current_qu
eue=4; break;}
                    if(boost_Ibuffer-
>get(TOS_VOD)>BUFFER_VOD_SIZE){current_queue=5; break;}
                    if(boost_Ibuffer-
>get(TOS_CLOUD)>BUFFER_CLOUD_SIZE){current_queue=6;
break;}
                }
                qDebug() << "Strting to read packet!";
                IP_Packet ip;
                qDebug() << "Finished to read packet!";
                if(boost_Ibuffer-
>pullPacket(current_queue,ip))
                {
                    qDebug() << "Analyzing packet!";
                    //delay       =       (int)ip.timer-
>nsecsElapsed()/1000;
                            //delay   =   (int)ip.timer-
>nsecsElapsed()/1000;
```

```
                    delay = 0;

//aggregated_delay_on_interval.append(delay);
                    packets_extracted_from_buffer++;
                    ip.header_crc=0xABCD;
                    ip.ver_ihl=70;
                    ip.options+=delay;
                    qDebug() << "Forwarding packet!";
                    if(output_interfaces_manager-
>forwardIPPacket(ip))
                        packets_processed++;
                     else
                        packets_dropped++;
                    qDebug() << "==============DONE!";
                    //qDebug()  <<  "FIFO-elapsed:  "  <<
ip.timer->nsecsElapsed();
                    //delete ip.timer;
                    ip.freeMemory();
                    qDebug() << "MEMPRY FREED!";
                    //qDebug()  <<  "===============Delay:
" << delay;
                    // qDebug() << "TOS: " << ip.ToS;
                    //if(PROCESSING_DELAY!=0)
                    //msleep(PROCESSING_DELAY);
                    //usleep(1);
                    //qDebug()  <<  "packet  passed:  "  <<
tim.nsecsElapsed();
                    //for(int i=0; i<10000; i++)
                   //{}*/
```

```
                    //msleep(1000);
                    for(double  i=0;  i<processing_delay;
i++)
                    for(double j=0; j<1; j++){}
                }

                //else
                //if(PROCESSING_DELAY!=0)
                //msleep(PROCESSING_DELAY);
                //msleep(0);
                    //qDebug() << "Impossible to add to
buffer: " << boost_Ibuffer->queues_length[current_queue];
                checkTimer();
                //qDebug() << "FIFO Thread started!" <<
current_queue;
                current_queue++;
                if (current_queue>6) current_queue=0;
                //qDebug()   <<   "   passed:   "   <<
tim.nsecsElapsed();

        }

        //=========================   connecting   output
socket==============
    }
    void virtualRouterFIFOServiceThread::interfaceDown()
    {
        active = false;
    }
```

```
    void
virtualRouterFIFOServiceThread::updateMonitoringInterface
()
    {
      /*                                                emit
updatePacketProcessingDelay(aggregated_delay_on_interval)
;
        emit
updateRouterUtilization(packets_processed_per_second_arra
y);
        for(int i=0; i<7; i++)
            emit
updateBuffersPlots(i,buffers_lenght_array[i]);
        emit
updateBuffersPlots(7,buffers_lenght_array[7]);
       */
    }



    void virtualRouterFIFOServiceThread::checkTimer()
    {
        if(et_update_gui.hasExpired(1000))
        {
            QCoreApplication::processEvents();
            //=========ACTIVE MONITORING ==============
         /*                                             emit
updatePacketProcessingSpeed(packets_processed);
```

```
            packets_processed = 0;
            emit
updatePacketProcessingDelay(aggregated_delay_on_interval)
;
            aggregated_delay_on_interval.clear();
            MyDelaysArray buffers_lenght;
            for(int i=0; i<7; i++)
                buffers_lenght.append(boost_Ibuffer-
>queues_length[i]);
            buffers_lenght.append(boost_Ibuffer-
>special_queue_lenght);
            emit updateGUIBuffer(buffers_lenght); */

            //=========PASSIVE MONITORING ==============

//packets_processed_per_second_array.append(packets_extra
cted_from_buffer);
            //packets_extracted_from_buffer = 0;



            buffers_lenght_array.clear();
            for(int i=0; i<8; i++)
            {

buffers_lenght_array.append(boost_Ibuffer->get(i));
            }
```

```
//=========================================================
==

            emit
updatePacketProcessingDelay(aggregated_delay_on_interval)
;
            aggregated_delay_on_interval.clear();
            emit
updateCriticalPacketProcessingDelay(critical_packets_dela
y);
            critical_packets_delay.clear();
            if(packets_extracted_from_buffer!=0)
            {
            emit
updateRouterUtilization(packets_extracted_from_buffer);
            packets_extracted_from_buffer = 0;
            }
            emit
updateBuffersPlots(buffers_lenght_array);

            et_update_gui.restart();
        }
    }

    void
virtualRouterFIFOServiceThread::initializeArraysAndTimers
()
    {
```

```
    et_update_gui.start();
    aggregated_delay_on_interval.clear();
    critical_packets_delay.clear();
    packets_processed_per_second_array.clear();
    buffers_lenght_array.clear();

}
```

Додаток В. Конфігурування QoS у маршрутизаторах Cisco 2800

Перегляд інформації про QoS

Показати налаштовані класові карти:

Show class-map

Показати глобальну конфігурацію QoS:

Show mls qos

Показати налаштовані агреговані політики:

Show mls qos aggregate-policer

Показати налаштування вхідних черг:

Show mls qos input-queue

Показати налаштування QoS для порту:

Show mls qos interface [<ім'я>]

Показати налаштування вихідних черг:

Show mls qos queue-set [<номер_набора>]

Показати налаштовані PMAP:

Show policy-map

Базові налаштування QoS

Включити процедури QoS на пристрої:

(config) # mls qos

Дозволити використання QoS для VLAN (за замовчуванням заборонено для всіх інтерфейсів):

(config) # interface <ім'я>

(config-if) # mls qos vlan-based

Налаштувати стан довіри (trust state) портів (за замовчуванням всі порти є недовіреними):

(config) # interface <ім'я>

Якщо параметр довіри не зазначений, за замовчуванням вибирається dscp.

Параметр визначає, відповідно з яким полем відбуватиметься класифікація вхідного пакета.

Для нетегованого пакету використовується значення CoS за замовчуванням (встановлено на 0).

(config-if) # mls qos trust [cos | dscp | ip-precedence]

Налаштувати CoS за замовчуванням:

Встановлений ключ override скидає попередній стан довіри пакету і перезаписує (або встановлює, якщо пакет нетегований) значення CoS встановленюємо значенням за замовчуванням. За замовчуванням така поведінка відключена.

(config) # interface <ім'я>

(config) # mls qos cos (<cos_за_замовчуванням> | override)

Відключити зміну поля DSCP пакета (функція «прозорий режим DSCP»):

(config) # mls qos

(config) # no mls qos rewrite ip dscp

За замовчуванням прозорий режим DSCP відключений (тобто поле DSCP може змінюватися).

Класові карти class-map

Створити класову карту:

(config) # class-map [match-all | match-any] <ім’я_класової_карти>

(config-cmap) # match (access-group <номер_ACL> | ip dscp <список_значень> | ip precedence <список_значень>)

Ключ match-all задає логічну операцію «І» для всіх правил класової карти (включений за замовчуванням). Ключ match-any задає логічну операцію «АБО» для всіх правил класової карти. Команда match створює чергове правило класової карти. Команд match для кожної класової карти може бути декілька. У списках значень роздільником є пробіл.

Приклад №1 класової карти, побудованої на основі списку доступу:

Розширений список доступу, що виділяє пакети зі значенням DSCP = 10

(config) # access-list 103 permit ip any any dscp 10

(config) # class-map class1

(config-cmap) # match access-group 103

(config-cmap) # end

Приклади №2,3 класові карти, що не використовують списки доступу:

Класова карта, що виділяє пакети зі значенням DSCP 10, 11 або 12

(config) # class-map class2

(config-cmap) # match ip dscp 10 11 12

(config-cmap) # exit

Класова карта, що виділяє пакети зі значенням IP Precedence 5, 6 або 7

(config) # class-map class3

(config-cmap) # match ip precedence 5 6 7

(config-cmap) # exit

Карти політик policy map (PMAP)

Для класифікації, застосування політик і позначки пакетів застосовуються карти політик policy map (PMAP). До вхідних напрямів порту може бути застосовано тільки один PMAP. PMAP і стан довіри можуть працювати одночасно, в цьому випадку спочатку застосовується PMAP. Некласифікований трафік, проходячи через PMAP, розглядається як класифікований за замовчуванням (настроюється в PMAP). В одному PMAP може налаштовуватися декілька класів.

Створити та налаштувати policy map:

Створення PMAP

(config) # policy-map <імя_PMAP>

Вказівка класу трафіку і перехід в режим настройки цього класу

Якщо після class нічого не вказано, вважається, що налаштовується клас за замовчуванням

(config-pmap) # class [<ім’я_класової_карти> | class-default]

Вибір «режиму довіри» - параметра, за яким генерується мітка QoS

За замовчуванням порт знаходиться в недовірливому режимі

Якщо після trust нічого не вказано, вибирається dscp

(config-pmap-c) # trust [cos | dscp | ip-precedence]

Класифікація трафіку шляхом установки нового значення dscp або ip precedence

Несумісна з trust

(config-pmap-c) # set (dscp <новое_dscp> | ip precedence <новое_ip_precedence>)

Визначення об'єкта-обмежувача

(config-pmap-c) # police <швидкість_в_бітах / с> <допустиме переміщення_в_бітах / с>

[exceed-action (drop | policed-dscp-transmit)]

Швидкість варіюється в межах від 8000 до 10000 млн (10 Гбіт / с)

Допустиме перевищення варіюється від 8000 до 1000000 (1 Мбіт / с)

exceed-action задає дію при перевищенні смуги

exceed-action drop - відкинути пакет! exceed-action policed-dscp-transmit - знизити значення dscp

Вихід в режим настройки PMAP (config-pmap-c) # exit

Вихід в режим глобального налаштування

(config-pmap) # exit

Перехід в режим налаштування інтерфейсу

(config) # interface <ім'я>

Зв'язування PMAP із вхідною чергою інтерфейсу

(config-if) # service-policy input <імя_PMAP>

Приклад №4 PMAP, що обмежує швидкість передачі трафіку в мережу 10.1.0.0/16 до 1.01 Мбіт / с (1 Мбіт / с + 10 Кбіт / с):

(config) # access-list 1 permit 10.1.0.0 0.0.255.255

(config) # class-map ipclass1

(config-cmap) # match access-group 1

(config-cmap) # exit

(config) # policy-map flow1t

(config-pmap) # class ipclass1

(config-pmap-c) # trust dscp

(config-pmap-c) # police 1000000 10000 exceed-action policed-dscp-transmit

(config-pmap-c) # exit

(config-pmap) # exit

(config) # interface gigabitethernet0 / 1

(config-if) # service-policy input flow1t

Налаштування агрегованої політики

Створення агрегованої політики

(config) # mls qos aggregate-policer <імя_політики> <швидкість в бітах / с> <допустиме перевищення_в_бітах / с> exceed-action (drop | policed-dscp-transmit)

Далі йде звичайний процес налаштування обмежувальної PMAP:

створення та заповнення класової карти

(config) # class-map [match-all | match-any] <ім’я_класової_карти>

(config-cmap) # match ...

створення PMAP

(config) # policy-map <ім’я_PMAP>

(config-pmap) # class [<ім’я_класової_карти> | class-default]

Завдання використання агрегованої політики

(config-pmap-c) # police aggregate <ім’я агрегованої політики>

Вихід в режим настройки PMAP

(config-pmap-c) # exit

Вихід в режим глобального налаштування

(config-pmap) # exit

Перехід в режим налаштування інтерфейсу

(config) # interface <ім'я>

Зв'язування PMAP із вхідною чергою інтерфейсу

(config-if) # service-policy input <імя_PMAP>

Розподіл класів по вхідним чергам завдання порогів WTD:

! Не забувайте, що вхідних черг тільки 2 і порогів теж 2

! Розподіл класів за критерієм DSCP

(config) # mls qos srr-queue input dscp-map queue <номер_черги> threshold <номер_порога> <значення_dscp№1> ... <значення_dscp№8>

Розподіл класів за критерієм CoS

(config) # mls qos srr-queue input cos-map queue <номер_черги> threshold <номер_порога> <значення_cos№1> ... <значення_cos№8>

Завдання порогів WTD для черги

(config) # mls qos srr-queue input threshold <номер_черги> <поріг1> <поріг2>

Приклад №5 розподілу класів:

Класи зі значенням DSCP 0-6 потрапляють в чергу 1 на поріг 1

(config) # mls qos srr-queue input dscp-map queue 1 threshold 1 0 1 2 3 4 5 6

Класи зі значенням DSCP 20-26 потрапляють в чергу 1 на поріг 2

(config) # mls qos srr-queue input dscp-map queue 1 threshold 2 20 21 22 23 24 25 26

Поріг 1 - 50%, поріг 2 - 70%

(config) # mls qos srr-queue input threshold 1 50 70

Розподілити буфер між вхідними чергами:

(config) # mls qos srr-queue input buffers <буфер1_в_процентах> <буфер2_в_процентах>

Розподілити смугу пропускання між вхідними чергами:

Смуга задається зваженим значенням, тобто в частках в межах від 1 до 100

(config) # mls qos srr-queue input bandwidth <смуга_черги1> <смуга_черги2>

Задати смугу пропускання для пріоритетної черги і призначити одну з черг в якості пріоритетної:

(config) # mls qos srr-queue input priority-queue <номер черги> bandwidth <смуга_в_долях>

Важливо

Налаштування вихідних буферів вважаються компанією Cisco оптимальними і не рекомендуються до зміни. Однак якщо потрібно, їх можна змінити.

Розподілити буфер між вихідними чергами і задати пороги WTD:

Існує два набори по 4 черги

Кожен інтерфейс входить в один з цих наборів і успадковує налаштування черг цього набору.

Розміри буферів для черг 1, 3 і 4 змінюються від 0 до 99

Розмір буфера для черги 2 змінюється від 1 до 100

(config) # mls qos queue-set output <номер_набору> buffers <розмір_буфера1_в_долях> ... <розмір_буфера2_в_долях>

Пороги змінюються в межах від 1% до 3200%

Резервне перевищення змінюється в межах від 1% до 100%

Максимальне перевищення змінюється в межах від 1% до 3200%

(config) # mls qos queue-set output <номер_набору> threshold <номер_черги> <поріг1 в процентах> <поріг1 в процентах> <резервне перевищення > <максимальне перевищення>

Перехід в режим налаштування інтерфейсу

(config) # interface <ім'я>

Прив'язка інтерфейсу до набору черг

(config) # queue-set <номер_набору>

Розподіл класів по вихідних чергах:

Розподіл класів за критерієм DSCP

(config) # mls qos srr-queue output dscp-map queue <номер_черги> threshold <номер_порога> <значення_dscp№1> ... <значення_dscp№8>

Розподіл класів за критерієм CoS

(config) # mls qos srr-queue output cos-map queue <номер_черги> threshold <номер_порога> <значення_cos№1> ... <значення_cos№8>

Визначення правил урізання (shaping) смуги пропускання на інтерфейсі:

(config) # interface <ім'я>

Налаштування ваг черг в режимі обмеження смуги

Одиниця ділиться на введене значення ваги

Отримане число є призначеною часткою смуги пропускання

Вага змінюється в межах від 0 до 65535

Вага, рівна 0, означає, що черга знаходиться в режимі поділу смуги

(sharing) (config-if) # srr-queue bandwidth shape <вага_черги1> <вага_черги2> <вага_черги3> <вага_черги4>

Налаштування частки смуги для черг в режимі поділу смуги:

(config) # interface <ім'я>

Налаштування ваг черг в режимі поділу смуги

Вага змінюється в межах від 1 до 255

(config-if) # srr-queue bandwidth share <вага_черги1> <вага_черги2> <вага_черги3> <вага_черги4>

Обмеження смуги для вихідної черги:

(config) # interface <ім'я>

! Завдання відсотка швидкості порту, до якого потрібно обмежити швидкість

! Вага варіюється в межах від 10% до 90%

(config-if) # srr-queue bandwidth limit <вага>

Додаток Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Климаш Михайло Миколайович. Сучасні перетворення в архітектурах розподілених систем: монографія / М.М. Климаш, А.О. Лунтовський, В.І. Романчук. – Львів-Дрогобич: Коло, 2015. – 328 с.
2. Климаш М.М. Завади в транспортних DWDM мережах / М.М. Климаш, В.І. Романчук, Ю.Д. Добуш. – Львів, 2010. – 192 с.
3. Demydov I. Traffic Fluctuations Optimization for Telecommunication SDP Segment based on Forecasting using Ateb-functions: / I. Demydov, I. Dronyuk, O. Fedevych, V. Romanchuk // In: N. Kryvinska and M. Greguš, ed. Data-centric business and applications. Evolvements in business information processing and management. Series: Lecture notes on data engineering and communications technologies. Berlin: Springer International Publishing, 2018. – Vol. 20, pp. 71-88. DOI: 10.1007/978-3-319-94117-2_4, ISSN 2367-4512 (Scopus)
4. Maksymyuk T. Designing the New Backhaul for 5G Heterogeneous Network Based on Converged Optical Infrastructure / T. Maksymyuk, O. Krasko, M. Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy// Acta Electrotechnica et Informatica, 2017. – Vol. 17, No. 4. – pp. 9–12, DOI: 10.15546/aeei-2017-0028. (Index Copernicus)
5. Romanchuk V. Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT / Vasyl Romanchuk, Mykola Beshley, Andriy Prislupskiy, Halyna Beshley, Oleksiy Panchenko// Internet of Things (IoT) and Engineering Applications, Clausius Scientific Press, Canada. – 2018. –Vol.3. – pp. 22-23. (CrossRef)
6. Romanchuk V. Development of software-based router model with adaptive selection of algorithms for queues servicing / V. Romanchuk, M. Klymash, M. Beshley, O. Panchenko, A. Polishchuk // Technology audit and production reserves. – 2018. - №3/2(41). - pp. 46-55. ISSN 2226-3780. (Index Copernicus, EBSCO)
7. Климаш М.М. Розроблення програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів / М.М. Климаш, В.І. Романчук,

О.М Панченко, М.І. Бешлей, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. Політехніка». – 2017. – № 766. –С. 76 – 85. (Index Copernicus, Google scholar)

8. Бешлей М.І. Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритезації потоків у маршрутизаторах / М.І. Бешлей, В.В. Червенець, І.В. Демидов, В.І. Романчук, О.М. Панченко// Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал - Х: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. - 2016. –№5(142) - С. 114-123. (Index Copernicus, Google scholar)

9. Романчук В. І. Аналіз структури мережевого трафіку та мережевих аномалій на прикладі сегмента локальної мережі кампусу Національного університету “Львівська політехніка”/ В. І. Романчук, С. В. Алексєєв, В.В. Червенець, Р. С. Колодій // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2014. - № 796. - С. 157–163. (Index Copernicus, Google scholar)

10. Стрихалюк Б.М. Дослідження статистичних параметрів та характеристик інформаційних потоків в гетерогенних мережах / Б.М.Стрихалюк, І.В. Демидов, В.І Романчук, М.І. Бешлей // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. – №6(34). – С. 82-92.

11. Кільменінов О.А. Моделювання роботи маршрутизатора з віртуалізацією при заданих параметрах якості потокового трафіку / О.А. Кільменінов, В.І. Романчук// Наукові записки УНДІЗ. – 2017. – №4(48). – С. 12-17.

12. Романчук В.І. Аналіз імовірнісних характеристик трафіку інфокомунікаційної корпоративної мережі / В.І. Романчук, О.А. Лаврів, А.В. Поліщук, Р.І. Бак // Зб. наук. пр. УАД. – Львів, 2011. – Вип. 26, С. 145-151.

13. Климаш М. М. Матричний метод аналізу оптичних транспортних мереж зі спектральним ущільненням каналів / М. М. Климаш, В. І. Романчук // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2007. - № 595. - С. 92-98.

14. Андрухів Т. В. Моделювання повністю оптичних мереж зі спектральним ущільненням каналів / Т. В. Андрухів, В. І. Романчук, А.В. Поліщук // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2008. - № 618. - С. 145-152.

15. Романчук В.І. Покращення якості надання телекомунікаційних послуг в міських транспортних мережах з кодовим розділенням каналів / В.І. Романчук, Т.В. Андрухів, М.М Климаш // Зб. наук. пр. Комп'ютерні технології друкарства. – Львів, 2009. – №22. – С. 76 - 82.

16. Романчук В.І. Дослідження технології IP/MPLS при різних мережевих топологіях / В.І. Романчук, Ю.В. Антонюк, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2009. – № 645. – С. 95-103.

17. Романчук В.І. Моделювання міських мультисервісних мереж / В.І. Романчук, Ю.В Мітіхін, Р.С. Колодій, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2011. – № 705. – С. 152-158.

18. Черниховський Є.М. Оцінка і управління якістю сприйняття послуги (QoE) в телекомунікаційних мережах / Є.М. Черниховський, М.І. Кирик, В.І. Романчук, В.В. Червенець // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2010. – № 680. – С. 132–135.

19. Климаш М.М. Дослідження та моделювання роботи Gigabit Ethernet комутатора транспортних оптичних мереж / М.М. Климаш, В.І. Романчук, Б.М. Стрихалюк // Вісник «Радіоелектроніка та телекомунікації». – 2004. - № 508. С. 152-157.

20. Романчук В.І. Дослідження методів оцінювання якості сприйняття послуг для різних типів рафіку телекомунікаційних мереж / В.І. Романчук, М.М. Климаш, Б.В. Янишин // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2012. - № 738. - С. 165-172.

21. Романчук В.І. Метод узгодженого розв'язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами мережевих пристроїв / В.І. Романчук, М.І. Бешлей, О.М. Панченко, А.В. Поліщук // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. - 2018. - №2(50). - С. 48-57.

22. Бешлей Г.В. Метод декомпозиції структури мережного пристрою з віртуалізацією ресурсів / В. І. Романчук, М. І. Бешлей, А. М. Прислупський, Г.В. Бешлей // Наукові записки [Української академії друкарства]. – 2018. - №1(56). – С. 31-42.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

23. Chervenets V. QoS/QoE Correlation Modified Model for QoE Evaluation on Video Service / V. Chervenets, V. Romanchuk, H. Beshley, A.Khudyy // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XIII th International Conference TCSET'2016 (Lviv – Slavske) 2016.– P. 664-666. (Scopus)

24. Romanchuk V. Research of Multimedia Streaming Transmission in Multiservice Networks / V. Romanchuk, V. Chervenets, A. Polishuk // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 39. (Scopus)

25. Romanchuk V. Development the Methods of Conversion to Photonic Transport Networks / V. Romanchuk, O. Krasko, O. Koretsky // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 258. (Scopus)

26. Romanchuk V. The Main Causes of Failures SQL Server / V. Romanchuk, T. Andrukhiv, I. Kahalo // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 258. (Scopus)

27. Beshley M. Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization / M. Beshley, V. Romanchuk,

V. Chervenets and A. Masiuk // 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016, pp. 1-3. (Scopus)

28. V. Romanchuk. Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes / V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and A. Polishchuk / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 295-298. (Scopus)

29. Chervenets V. Quality increasing of traffic flow transferring in multiservice networks / V. Chervenets, V. Romanchuk, O. Puha and O. Bilyk / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 274-277. (Scopus)

30. Chervenets V. Investigation and Simulation of System for Data Flow Processing in Multiservice Nodes Using Virtualization Mechanisms / M . Klymash, V. Romanchuk, M. Beshley and and A. Polishchuk // 2017 IEEE First Ukraine Conference on electrical and computer engineering (UKRCON). - pp. 989-992. (Scopus)

31. Romanchuk V. Telemedicine system model using Internet-technology / V. Romanchuk, T M. Klymash, V. Krasko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2010 (Lviv – Slavske, February 23–27), 2010. - P. 259. (Scopus)

32. Polishchuk A. Research Methods to Provide Services in NGN / A. Polishchuk, E. Chernykhivsky, V. Chervenets, V. Romanchuk// Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the X th International Conference TCSET'2010. Lviv – 2010, P. 238. (Scopus)

33. Beshley M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network testbed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko, A. Masiuk // Proceedings of XIIIth international conference"The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics" CADSM'2015 (24-27 February, Lviv-Poljana, Ukraine), 2015. - P. 1-4. (Scopus)

34. Romanchuk V. Method for processing multiservice traffic in network node based on adaptive management of buffer resource / V. Romanchu M. Beshley, A. Polishuk and M. Seliuchenko // 2018 14th International Conference on Advanced

Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018), Lviv-Slavske, 2018, pp. 1118-1122. (Scopus)

35. Романчук В.І. Аналіз методів оцінювання та контролю у Віртуальному навчальному середовищі Львівської політехніки / В.І. Романчук // Інноваційні комп’ютерні технології у вищій школі : матеріали науково-практичної конференції, 18–19 лютого 2010 року, Львів / Національний університет "Львівська політехніка". – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – С. 36–40.

36. Червенець В. В. Модель віртуального маршрутизатора з статичною та динамічною реконфігурацією ресурсів / М. І Бешлей, В. В. Червенець, В.І. Романчук, А. В. Поліщук // X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції (19-22 квітня 2016р., м. Київ, Україна), 2016 - К.: НТТУ «КПІ». – С. 140-142.

37. Романчук В. Дослідження імовірнісних властивостей трафіку корпоративної мультисервісної мережі / В. Романчук, В. Червенець // Комп'ютерні науки та інженерія, матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2011 – Львів. – 2011. – С. 220–221.

38. Романчук В. Реалізація QoS для мультимедійного трафіку в корпоративній мережі / В.І. Романчук, В.В. Червенець. // Матеріали НМК “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011”. – Львів – 2011. – С. 17 – 20.

39. В.І. Романчук. Дослідження динамічних методів маршрутизації на транспортний мережі / В.І. Романчук // Матеріали конференції “Інноваційні комп’ютерні технології у вищій школі”. – Львів, 2010. – С. 30-33.

40. В.І. Романчук. Перехід до фотонних мереж / В.І. Романчук, О.В. Красько // Наукова практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікації -2011”. – Львів 2011. – С. 17-21.

41. В.І. Романчук. Аналіз методів передачі трафіку реального часу в телекомунікаційних мережах / В.І. Романчук, О.А. Лаврів, А. В. Поліщук // Міжнародна конференція “Телекомунікаційні системи і технології” (МКТСТ’2011), 18-21 жовтня 2011р. - Харків, Україна. - С. 121 – 124.

42. В.І. Романчук. Дослідження передавання інформаційного навантаження потокового мультимедіа / В.І. Романчук, В.В. Червенець, А.В. Поліщук // Наукова-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій -2012”.– Львів, 2012. – С. 71-72.

43. В.І. Романчук. Моделювання перехресних завад в DWDM системах / В.І. Романчук, О.В. Корецький // Наукова-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2012”.– Львів, 2012. – С. 68-70.

44. Beshley M. Method of Resource Distribution for Mobile Cloud Computing Systems. / M. Beshley, B. Buhyl, V. Romanchuk, M. Klymash // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XII th International Conference TCSET’2014 (Lviv – Slavske), 2014. - P. 581-584.

45. В.І. Романчук. Програмовані SDN мережі. Сучасні виклики та інтеграція нових концепцій: Internet of Everything, SDN, ACI / В.І. Романчук, С.В. Алексєєв // Наукова практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікації -2014”, 30 жовтня – 2 листопада, – Львів 2014. – С. 51-57.

46. М.М. Климаш. Розроблення макету мультисервісної мережі на базі програмно – апаратної платформи для забезпечення навчально – наукового процесу кафедри телекомунікацій / М.М. Климаш., В.І. Романчук., М.І. Бешлей // 1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT’2015). Conference proceedings. (29 October – 01 November, Lviv, Ukraine), 2015.– P. 175-178.

47. Лунтовський А.О. Дослідження ефективності використання ресурсів навчально-наукового центру паралельних обчислень / М.М. Климаш., В.І. Романчук, М.І. Бешлей, А.О. Лунтовський // Міжнародна науково-технічна конференція (Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології) Матеріали науково-технічної конференції 17–20 листопада 2015 м. Київ. - С.61-63.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

48. Заявка u 2015 05649 Україна, МПК G06F 5/00. Спосіб поділу результатів моніторингу на дві групи / Климаш М.М., Пелішок В.О.,

Андрухів Т.В., Романчук В.І. Деклараційний патент на корисну модель, МПК (2016) G06F 5/00. (Україна). U201505649; Заявл. 08.06.2015; Опубл. 25.07.2016. Бюл. № 14, 2016.

49. Заявка u 2015 05662 Україна, МПК H04B 7/00. Спосіб оптичного передавання з кодовим розділенням каналів / Климаш М.М., Демидов І.В., Романчук В.І. Деклараційний патент на корисну модель, МПК (2009) H04J 13/02. (Україна). U200907598; Заявл. 20.07.2009; Опубл. 10.11.2009. Бюл. № 21, 2009.