

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КИРИК МАР'ЯН ІВАНОВИЧ

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

**Методи та моделі управління контентом
в розподілених інфокомунікаційних системах**

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

05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

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

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

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

Кирик М. І. Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах. - 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 управління передаванням інформації в розподілених інфокомунікаційних системах та мережах доставки контенту з метою ефективного використання мережевих ресурсів глобальної інформаційної інфраструктури загалом, та її національного сегменту зокрема, шляхом підвищення продуктивності процесів передавання даних в умовах збільшення їх обсягів. Враховуючи динаміку розвитку інфокомунікаційних технологій та збільшення різноманітності послуг, очевидно, що основою для побудови вискоєфективної інформаційної інфраструктури стають існуючі телекомунікаційні системи. Створення відповідного інфокомунікаційного середовища є важливою проблемою, стаючи основою широкого впровадження інфокомунікаційних технологій, технологій формування і використання інформації та знань у процесі побудови інформаційного суспільства в Україні, а отже, є національним пріоритетом.

В роботі продемонстровано передумови для виникнення протиріччя, оскільки традиційні моделі аналізу трафіку та оцінювання його статистичних характеристик, а також методи розподілу мережевих ресурсів не відповідають сучасному технічному прогресу у галузі інфокомунікаційних технологій, а існуючі методи керування потоками, також не враховують характеристик трафіку гетерогенних інфокомунікаційних мереж доставки контенту.

На сьогодні дане протиріччя можливо розв'язати шляхом побудови моделей вхідного трафіку, характеристики яких були б більш наближеними до характеристик реальних потоків даних, зокрема у CDN, розробленням нових

моделей та методів управління різнотипними мережевими ресурсами, удосконаленням математичного інструментарію аналізу та дослідження розподілених інфокомунікаційних систем для розроблення засобів підвищення ефективності передавання інформації.

У дисертаційній роботі представлено розв'язання проблеми розроблення методологічного забезпечення управління передаванням інформації в розподілених інфокомунікаційних системах та мережах доставки контенту з метою ефективного використання мережевої інфраструктури, підвищення системної продуктивності і якості надання послуг за рахунок динамічного балансування навантаження.

Перший розділ роботи містить огляд літературних джерел за темою дисертації в рамках проведення аналізу сучасного стану та тенденцій розвитку розподілених інфокомунікаційних систем. Проаналізовано процеси конвергенції телекомунікаційних та інформаційних мереж, розглянуто модель побудови інфокомунікаційної мережі та принципи передавання інформації, механізми забезпечення якості передавання, визначено потребу у розробці нових методів оцінки характеристик трафіку, проблеми розподілу мережесих ресурсів та вимоги до управління трафіком в інфокомунікаційних системах.

Другий розділ присвячено дослідженню методів та моделей підвищення ефективності управління передаванням інформації в розподілених системах. Визначено критерії класифікації типів трафіку сучасних мультисервісних мереж та методику ідентифікації трафіку в інфокомунікаційних мережах з використанням часо-частотного, статистичного і фрактального аналізів, яка дозволяє отримати динамічну модель трафіку, що в свою чергу дало змогу адекватно підбирати алгоритми керування передаванням контенту в інфокомунікаційних мережах. Представлено підходи, які використовуються для визначення ступеня самоподібності мережевого трафіку. Проведено математичне моделювання з використанням теорії масового обслуговування для визначення параметрів якості, яке підтвердило, що використання довільної методики обрахунку параметрів якості сервісу є недопустимим для

мультисервісного трафіку, що володіє властивістю самоподібності. Запропоновано використання системи класу G/G/1, як базової для розрахунку параметрів мультисервісного трафіку.

У третьому розділі роботи проведено класифікацію та порівняльний аналіз традиційних радіосистем, радіосистем з програмованими параметрами і систем з використанням технології когнітивного радіо, особливістю яких є наявність інтелектуального модуля, що забезпечує можливість гнучкої і швидкої реконфігурації та оптимального налаштування своїх внутрішніх параметрів відповідно до змін радіосередовища завдяки моніторингу спектру, аналізу та оцінки параметрів радіоканалу і прогнозування зміни каналу зв'язку. Розроблено імітаційну модель системи керування когнітивною радіомережею із можливістю широкого і гнучкого налаштування множини вхідних параметрів, вибору методів управління радіочастотним спектром. Використання технології передавання OFDM дозволяє гнучко використовувати смугу пропускання сигналу, що передається, покращити ефективність прийому даних в умовах багатопробеневого поширення в залежності від числа частот, що зайняті первинною мережею. Здійснено моделювання когнітивної радіомережі для визначення пропускну здатності при роботі системи в умовах наближених до реальних. Удосконалено імітаційну модель процесу оцінювання ефективності методів вибору спектру на основі введеного показника продуктивності – тривалості прийняття системою рішення про перерозподіл каналів для алгоритмів балансування вхідного навантаження. На основі імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею розроблений програмний комплекс для дослідження та оцінювання ефективності роботи алгоритмів сканування, спільного використання та забезпечення мобільності спектру.

В четвертому розділі проведено дослідження технології передавання мультимедійного контенту, представлено концепцію та архітектуру мережі доставки контенту CDN. Запропоновано механізми управління навантаженням в CDN мережах для вибору оптимального маршруту та забезпечення заданої якості сервісу на основі цільової функції. Основними критеріями цільової

функції були визначені час затримки, навантаження на сервер та ймовірність втрати пакетів. Розглянуто основні методи балансування навантаження, які дають змогу раціонально розподілити навантаження між серверами мережі і покращити якість обслуговування. Запропоновано метод балансування навантаження між серверами роздачі контенту, що дає змогу раціонально розподілити навантаження між серверами мережі і покращити якість обслуговування за рахунок зменшення затримки та джитера, що є особливо критичними для послуг реального часу. Досліджено вплив параметрів кодера на якість вихідного сигналу та підібрано параметри для проведення ефективного кодування, що впливають на якість цифрового відеоконтенту, для забезпечення надійного та якісного сервісу для кінцевих користувачів. Проведено експериментальні відтворення найбільш поширених проблем якості сприйняття послуг QoE (затримка, джитер, втрата пакетів, неправильна послідовність пакетів) та дослідження ефективності застосування механізму диференціювання відеотрафіку. Виконано експериментальне дослідження методів балансування навантаження в CDN мережах, яке підтвердило ефективність використання запропонованого методу для забезпечення заданої якості сервісу в мережах передавання контенту.

У п'ятому розділі досліджено механізми формування черг та пріоритетного їх обслуговування в провідних та безпроводних мережах. Визначено цільову функцію забезпечення задовільних параметрів якості обслуговування з урахуванням типів мультисервісного трафіку. Представлено системну модель процесу обслуговування черг в безпроводних мережах, яку доцільно використовувати для ефективного розподілу ресурсів в безпроводному середовищі. Розроблено імітаційну модель обслуговування черг мультисервісної мережі з використанням пріоритезації даних та проведено порівняльний аналіз роботи алгоритмів обслуговування черг в провідних та безпроводних мережах для різних типів потоків. Розроблено алгоритм оцінки якості обслуговування в мультисервісній телекомунікаційній мережі, який враховує роботу кількох механізмів формування черг та управління

перевантаженнями. Проведено імітаційне моделювання роботи запропонованого механізму та проаналізовано його результати. Запропоновано інтегральний критерій оцінювання якості роботи механізмів формування черг та механізмів управління перевантаженнями, який враховує значення ймовірності втрат, часу затримки та джитера і відображає покращення відповідних якісних показників обслуговування при використанні того чи іншого алгоритму. Проведено експериментальне визначення розміру буфера активного мережевого обладнання та дослідження впливу розміру буферів на параметри передачі трафіку.

Шостий розділ роботи присвячено особливостям реалізації CDN-мереж на основі сегменту глобальної мережевої інфраструктури. Запропоновано багаторівневу модель побудови мереж доставки контенту на основі сегменту глобальної мережевої інфраструктури, наведено структурно-функціональні схеми роботи її складових компонентів. Проведено імітаційне моделювання роботи кешуючих серверів мережі доставки контенту із врахуванням багатьох параметрів, а саме: розмір ресурсу, що передається в CDN-мережу, число звернень до конкретного ресурсу, інтервал часу між зверненнями, розмір кешуючої пам'яті та ін. Досліджено вплив самоподібності мультисервісного трафіку на продуктивність роботи мережі доставки контенту. Представлено метод покращення параметрів QoE та проаналізовано його вплив на стан мережі провайдера даної послуги та на якість послуги, яка надається кінцевому користувачу. На основі проведених досліджень і розроблених методів ефективного використання мережевих ресурсів, управління контентом та забезпечення якості послуг, балансування навантаження в інфокомунікаційних мережах було запропоновано методологію синтезу мереж доставки контенту. Досліджено ефективність застосування запропонованих методів управління контентом та методології синтезу мереж доставки в діючій мережі.

Ключові слова: контент, інфокомунікації, розподілені системи, мережі доставки контенту, глобальна інформаційна інфраструктура, трафік, якість обслуговування, QoE, черги.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографія:

1. Кирик М. І. Методи та моделі управління трафіком в розподілених інфокомунікаційних системах : моногр. / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, О. В. Тимченко. – Львів : Укр. акад. друкарства, 2017. – 264 с. ISBN 978-966-322-473-2.

Статті у наукових періодичних виданнях:

2. Кирик М. І. Аналіз роботи та дослідження ефективності використання мережі CDN / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, М.В. Плєсканка // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія "Радіоелектроніка та телекомунікації". – Львів, 2017. – №885. – С. 42-48 р. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

3. Maksymyuk T. Designing the new backhaul for 5G Heterogeneous Network Based / Taras Maksymyuk, Olena Krasko, Maryan Kyryk, Vasyl Romanchuk, Roman Kolodiy // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2017. – Vol. 17, No. 4. – P. 9–13. – DOI: 10.15546/aeei-2017-0028.

4. Климаш М.М. Модель оцінки ефективності алгоритмів переключення радіочастотних каналів для вибору спектру у когнітивних радіомережах / М.М. Климаш, М. І. Кирик, В. Б. Янишин // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Радіоелектроніка та телекомунікації». – Львів, 2017. – №874. – С. 87-95.

5. Fekade B. Probabilistic Recovery of Incomplete Sensed Data in IoT / Berihun Fekade, Taras Maksymyuk, Maryan Kyryk, Minho Jo.. IEEE Internet of Things Journal. – Issue 99. – Jul. 2017, pp. 1-11.

6. Maksymuk T. Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed spectrum for multi-operator 5G hetnet / Taras Maksymuk ; Maryan Kyryk; Mykhailo Klymash; Minho Jo; Ryszard Romaniuk; Andrzej Kotyra; Aizhan Zhanpeisova; Ainur Kozbekova; // Proceedings of SPIE: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, USA. – 2017. – Vol. 104455T. – doi: 10.1117/12.2280795.

7. Maksymyuk T. Comprehensive Spectrum Management for Heterogeneous Networks in LTE-U / T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo // IEEE Wireless Communications. – 2016. – vol.23 – DOI: 10.1109/MWC.2016.1600042WC, Issue: 6, pp. 8-15, Dec. 2016.

8. Кирик М. І. Оцінка ефективності методів спектральної мобільності у когнітивних радіомережах / М.І. Кирик, В.Б. Янишин, М.В. Піцик// Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – № 849. – С. 194–202.

9. Кирик М. І. Дослідження механізмів управління контентом у мережах CDN/ М.І. Кирик // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – № 849. – С. 229–236.

10. Кирик М. І. Оцінка спектральної густини потужності на основі методу періодограми Уелча для когнітивного радіо / М.І. Кирик, В.Б. Янишин, Р.С. Колодій // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – №818. – С. 86-93.

11. Климаш М.М. Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку / М.М. Климаш, М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка, І.О. Кагало // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2014. – №796. – С. 182-194.

12. Кирик М. І. Модель оцінки пропускнуої здатності когнітивної радіомережі на основі OFDM / М. І. Кирик, В. Б. Янишин, І. Б. Стрихалюк // Радіоелектроніка та телекомунікації . Вісник Національного Університету «Львівська політехніка». – Львів, 2014. – №796. – С. 104-112.

13. Klymash Mykhailo. Data Buffering Multilevel Model at a Multiservice Traffic Service Node / Mykhailo Klymash, Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka, Volodymyr Yanyshyn // Smart Computing Review. Korea, August 31, 2014. – Vol. 4. No. 4. – p. 294-306.

14. Кирик М. І. Алгоритм обслуговування черг у безпроводних мережах / М. І. Кирик, Н.М. Плєсканка // Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова. Збірник наукових праць. – К., 2014. – Вип. 70. – С. 159-162.

15. Кирик М. І. Дослідження і моделювання механізмів формування та обслуговування черг у мережевих пристроях / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, Д. В. Кожуров // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – №766. – С. 179-186.

16. Климаш М. М. Дослідження та моделювання якісних та часових параметрів вузла обслуговування трафіку мультисервісної мережі / М. М. Климаш, М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, В. Б. Янишин // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – Київ, 2012. – №4(24). – С.31-37.

17. Кирик М.І. Дослідження буферизації мультимедійного трафіку в мережах передачі даних / М. І. Кирик, Т. В. Андрухів, В. В. Червенець, Н. М. Плєсканка // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2012. – №738. – С. 100-106.

18. Кирик М. І. Дослідження впливу параметрів кодеку х264 на якість відеосигналу / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 705. – С. 161–166.

19. Кирик М. Алгоритм адаптивного забезпечення QoS шляхом регулювання довжини IP пакета / М. Кирик, Н. Плєсканка // Зб. наук. пр. – К.: ІПМЕ НАН України, 2011. – Вип.59. – С. 161-165.

20. Тимченко О.В. Аналіз проходження мультимедійного трафіку в мережі доставки контенту / О. Тимченко, М. Кирик, Н. Плєсканка // Комп'ютерні технології друкарства. Зб. наук. пр. – Львів: Українська Академія Друкарства, 2011. – Вип. 25. – С.109-115.

21. 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. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – №680 – С.132-135.

22. Тимченко О.В. Механізми забезпечення якості передачі відеотрафіку в мультисервісних мережах/ О.В. Тимченко, М.І. Кирик, В.В. Червенець //

Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр.– К.: ІПМЕ НАН України, 2009. – Вип.54. – с. 247-251.

23. Тимченко О.В. Співвідношення між якістю послуг мереж передачі даних і рівнями OSI/ О.В. Тимченко, М.І. Кирик, Б.М. Верхола, Аскар Самі. // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.49. – К.: 2008. – С. 150-157.

24. Тимченко О.В., Кирик М.І., Верхола Б.М., Самі Аскар. Дослідження якості багатоадресної передачі мультимедійного трафіку. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.48. – К.: 2008. – С. 161-169.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

25. Maksymyuk Taras. Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks / Taras Maksymyuk; Mykola Brych; Yulia Klymash; Maryan Kyryk; Mykhailo Klymash // Problems of Infocommunications. Science and Technology, (PIC S&T), 2017 4th International Scientific-Practical Conference, 10 - 13 October, Kharkiv, Ukraine. – P. 515-518.

26. Kyryk M. The efficiency and productivity of the CDNs. / Maryan Kyryk, Maryana Pleskanka, Nazar Pleskanka // 2nd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT 2017) : Conference Proceedings, 4-7 July 2017, Lviv, Ukraine. – P. 270-273.

27. Kyryk M. Content Delivery Network Usage Monitoring / M. Kyryk, N. Pleskanka, M. Pleskanka // Proceedings of 14th International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2017, 21-25 February 2017, Poljana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 306-308.

28. Kyryk M. Performance Evaluation Model for Spectrum Decision Methods in Cognitive Radio / M. Kyryk, V. Yanyshyn, N. Pleskanka // Proceedings of 14th International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2017, 21-25 February 2017, Poljana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 289-291.

29. Kyryk Maryan. Proactive spectrum handoff performance evaluation model for cognitive radio / Maryan Kyryk, Volodymyr Yanyshyn // Problems of

Infocommunications. Science and Technology, (PIC S&T), 2016 Third International Scientific-Practical Conference, 4 - 6 October, Kharkiv, Ukraine. – P. 18-20.

30. Maksymyuk T. Opportunistic Tri-Band Carrier Aggregation in Licensed and Unlicensed Spectrum for Multi-Operator 5G HetNet / Т. Maksymyuk, М. Курык, Minh Jo // Матеріали міжнародної конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016): Збірник тез. – К.: НТУУ «КПІ», 11–15 вересня 2016 р. – P.315-317.

31. Kyryk M. QOS mechanism in content delivery network / М. Курык, N. Pleskanka, М. Pitsyk // Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016, February 23 – 26, 2016 Lviv-Slavske, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic.- P. 658-660.

32. Kyryk M. Performance Comparison Of Cognitive Radio Networks Spectrum Sensing Methods / М. Курык, L. Matiishyn, V. Yanyshyn, V. Havronskyu // Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016. February 23 – 26, 2016 Lviv-Slavske, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic.- P. 597-600.

33. Kyryk M. The spectrum sensing techniques efficiency analysis in cognitive radio networks / М. Курык, V. Yanyshyn // 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015): Conference Proceedings, October 29 – November 1, 2015, Lviv, Ukraine. – P. 41-43.

34. Kyryk M. Data Buffering Multilevel Model with Adaptive Changes of Buffer Size Technology / М. Курык, N. Pleskanka, O. Urikova // Proceedings of XIIIth International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2015, 24-27 February 2015, Lviv-Poljana, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 448-451.

35. Kyryk M. OFDM-based Cognitive Radio System Capacity Evaluation Model / М. Курык, V. Yanyshyn // Proceedings of XIIIth International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2015, 24-27 February 2015, Lviv-Poljana, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 137-140.

36. Кирик М.І. Дослідження ефективності кооперативного сканування в когнітивних радіомережах / М.І. Кирик, В.Б. Янишин // Матеріали

Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – СПТЕЛ-2014», 30 жовтня-02 листопада 2014 р., Львів. – С.153-154.

37. Климаш М.М. Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку / М.М. Климаш, М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка, І.О. Кагало // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано та мікроелектроніки, IV міжнародна науково-практична конференція. – Чернівці, Україна, 23-25 жовтня 2014. – С.98-99.

38. Kyryk Maryan. The Buffering and Congestion Management in Multiservice Networks / Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25- March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 541-543.

39. Kyryk Maryan. The Cooperative Spectrum Sensing Performance Research in Cognitive Radio Networks / Maryan Kyryk, Volodymyr Yanyshyn, Dmitry Kozhurov // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25-March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 448-450.

40. Jo Minho. Advanced wireless access methods for 5G heterogeneous mobile networks / Minho Jo, Taras Maksymyuk, Maryan Kyryk, Mykhailo Klymash // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25- March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 30-32.

41. Кирик М.І. Системна модель обслуговування черг в безпроводних мережах / М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка // Матеріали конференції, XXXIII науково-технічна конференція «Моделювання». ІПМЕ НАН України. 15-16 січня 2014 р., Київ. – С.42

42. Jo Minhо. Cognitive Radio Approach for LTE Deployment / Minhо Jo, Maryan Kyryk, Taras Maksymyuk, Longzhe Han // Proceedings of the IX International Conference on The Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2013). April 16-20, 2013 Polyana, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. - P. 63-64. // Перспективні технології і методи проектування МЕМС: матеріали дев'ятої міжнар. конф. MEMSTECH 2013, 16-20 квітня 2013, Поляна, Україна Нац.ун-т «Львів. політехніка». – Л.: Вежа і Ко, 2013. – С.151-152.

43. Kyryk Maryan. The model of evaluation quality and timing parameters service device in multiservice network / Maryan Kyryk, Volodymyr Yanyshyn // Proc. of the XII Intern. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013). February 19-23, 2013 Lviv – Polyana, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. - P. 198-199.

44. Кирик М. І. Статистична модель самоподібного трафіку мультисервісної мережі / М.І. Кирик, Н. М. Плєсканка // VI Международный научно-технический симпозиум «Новые технологии в телекоммуникациях» ГУИКТ-КАРПАТЫ '2013. 21 - 25 января 2013 г., с. Вышков Долинского района Ивано-Франковской области. – С.89-90.

45. Климаш М. М. Визначення параметрів мультимедійного трафіку в мультисервісній мережі / М. М. Климаш, М.І. Кирик, Н. М. Плєсканка // Матеріали конференції, науково-методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2012», 01-04 листопада 2012 р., Львів. – С.34-37.

46. Kyryk Maryan. Reducing Channel Zapping Time Based on Predictive Tuning Method / Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka, Maryan Sylyuchenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the Xth International Conference TCSET'2012, Lviv-Slavske, Ukraine, February 21-24, 2012. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2012. – P. 244-245.

47. Кирик М.І. Визначення залежності якості відеосигналу від параметрів кодека H264 / М.І. Кирик, Н. М. Плєсканка // Матеріали конференції, науково-

методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій 2011», 27-30 жовтня 2011 р., Львів, с.9-11.

48. Кирик М.І. Вивчення властивостей мультимедійного трафіку, що передається по мережі CDN / М.І. Кирик, Н. М. Плесканка // XXX Науково-технічна конференція «Моделювання». ІПМЕ НАН України. Тези конференції. 12-13 січня 2011 року. – К.: 2011. – С. 56-57.

49. Климаш М. М. Контроль параметрів QoS мережі IP/MPLS на основі розподілу запасу ресурсів / М. М. Климаш, М.І. Кирик, Б.А. Бугиль // Збірник тез. Науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (04-08 жовтня 2010 р. Cominfo'2010-Livadia). – К.:ДУІКТ. - 2010 р.- С.22-23.

50. Курык М. Quality of Experience for IPTV / М. Курык, О. Kostiv // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the Xth International Conference TCSET'2010, February 23-27, 2010 Lviv-Slavske, Ukraine / Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv Polytechnic National Univeristy. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2010. – P. 214.

51. Тимченко О.В. Аналіз методів передачі трафіку реального часу в телекомунікаційних мережах / О.В. Тимченко, М.І. Кирик, В.В. Червенець // Матеріали конференції, науково-методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій 2009», 28-30 жовтня 2009 р., Львів, с.51-53.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

52. Пат. 111284 Україна, МПК51H04L 12/861. Спосіб буферизації мультисервісного трафіку у вузлах обслуговування/Климаш М.М., Кирик М.І.,Плесканка Н.Б., Стрихалюк Б.М., власник Нац. ун-т «Львів. політехніка». – № 201413995 ; заявл. 26.12.2014 ; опублік. 11.04.2016, Бюл. № 7.2016 – 5 с.

ABSTRACT

Kyryk M.I. Methods and models for content management in distributed infocommunication systems. - 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 information transfer management in distributed infocommunication systems and in content delivery networks in order to efficiently use network resources of entire global information infrastructure, and its national segment in particular. It is reached by increasing the productivity of information transmission in conditions of its volumes growth. Today network technologies is one of the most advanced branches of science and technology. Meanwhile management of multiservice streams requires the use of system models and algorithms of traffic management to optimize the performance of networks.

The preconditions for the emergence of contradiction are demonstrated. Methods of distribution of network resources, traditional models of traffic analysis and evaluation of its statistical characteristics do not correspond to the current technological progress in the field of information and communication technologies. Existing methods for flows management do not take into account the characteristics of heterogeneous infocommunication networks traffic.

Today, this contradiction can be solved by: constructing incoming traffic models, the characteristics of which would be closest to the one's of real data flows, particularly in CDN; the development of new models and management methods for diverse network resources; the improvement of mathematical tools for analysis and research of distributed infocommunication systems for development tools of increasing the efficiency of the information transmission.

The dissertation presents the solution of the actual scientific problem of developing the methodological provision of information transmission control in

distributed infocommunication systems and content delivery networks in order to effectively use the network infrastructure, increase the systemic productivity and quality of service delivery due to dynamic load balancing.

The first section of the paper contains an overview of literary sources on the topic of the dissertation in the analysis framework and development trends of distributed infocommunication systems. The convergence processes of telecommunication and information networks are analyzed. The construction model of the infocommunication network, information transmission principles and mechanisms for providing the transmission quality is examined. The requirements for network resources redistributing and traffic management in the infocommunication networks are considered.

The second section of the paper is devoted to the study of methods and models for improving the efficiency of information transfer management in distributed systems. The criteria of traffic types classification in modern multiservice networks and traffic identification methods are determined. It allows to obtain a dynamic traffic model, which assists to adequately select the algorithms of transmission control in the infocommunication networks. The approaches for determination the degree of network traffic self-similarity are presented. The mathematical modeling was carried out to determine the quality of service parameters, which proved that the use of arbitrary methodology for calculating the QoS parameters is inadmissible for traffic which has the character of self-similarity. The use of the G/G/1 class system as the optimal one for calculating multiservice traffic parameters is proposed.

In the third section, the classification and comparative analysis of traditional radio systems with programmable parameters and systems that use cognitive radio technology is carried out. The feature of those systems is the availability of the intelligent module, which provides the possibility of flexible and quick reconfiguration and optimal adjustment of its internal parameters in accordance with changes in the radio environment through monitoring spectrum, analysis and evaluation of radio channel parameters and forecasting the change of the communication channel. A simulation model of the cognitive network management

system which has the possibility of wide and flexible adjustment of input parameters and choice of radio frequency spectrum management methods is developed.

It is proposed to use OFDM transmission technology to improve the speed of data transmission and use efficiently the selected frequency bands. The simulation of the cognitive radio network for the estimation of bandwidth during system operation in the conditions close to the real is carried out. The model for assessing the efficiency of spectrum selection methods was improved. The model is based on the introduced new performance indicator (duration of a system solution adoption for the input load balancing algorithms). By using the simulation model of the cognitive radio network management system, a software complex was developed. That complex is used for investigation the efficiency of scanning algorithms, sharing and spectrum mobility.

In the fourth section, multimedia content transfer technology, the concept and architecture of the content delivery network (CDN) were reviewed. The mechanisms of load management in CDN networks are proposed. They are used to choose the optimal route and provide the defined quality of service on the basis of the target function. The main criteria of the target function were the delay time, load on the server and the probability of packets loss. The major methods of load balancing are considered, which allow to rationally distribute the load between the network servers and improve the QoS.

The method of load balancing between content distribution servers is proposed, which allows to rationally distribute the load between servers of the network and improve the quality of service by reducing the delay and jitter, which are especially critical for real-time services. The influence of the encoder parameters on the quality of the output signal was examined. The parameters for effective encoding that affect the quality of digital video content are selected for ensuring reliable and high quality service for end users. Experimental reproductions of the most common QoE quality problems (delay, jitter, packet loss, incorrect packet sequence) and research on the effectiveness of the video traffic differentiation mechanism use were conducted. An experimental study of load balancing methods in CDN networks was performed. It

confirmed the effectiveness of using the proposed load balancing method to provide a defined quality of service in the content distribution networks.

In the fifth section the mechanisms of priority queuing in wired and wireless networks were investigated. The target function of providing satisfactory quality service parameters with the types of multiservice traffic is determined. The system model of queuing process in wireless networks is presented, which is expedient to use for efficient allocation of resources in the wireless environment. The simulation model of multiservice network queues service by using data prioritization was developed. A comparative analysis of the queuing algorithms operation in wired and wireless networks for different types of data streams was conducted. An algorithm for assessing the service quality in the multiservice telecommunication network was developed. It takes into account the work of several mechanisms for the formation of queues and for managing overloads. The simulation modeling of the mechanism work was carried out. The results of that simulation were analyzed. An integral criterion for assessing the work quality of forming queues and overload control mechanisms was considered. This criterion takes into account the probability of losses, delay time and jitter. It reflects the improvement of the corresponding qualitative indicators of service by using one of the algorithms. An experimental determination of the active network equipment buffer size and an investigation of buffer sizes influence on the parameters of the traffic transmission were carried out.

The sixth part of the work is devoted to the peculiarities of CDN-networks implementation based on the segment of the global infrastructure network. A multi-level model of content delivery networks construction based on the segment of global network infrastructure is proposed. The structural-functional schemes of its components work were presented. The simulation modeling of the content delivery network caching servers was carried out. It takes into account many parameters: the size of the resource transferred to the CDN network, the number of hits to a particular resource, the time interval between hits, the size of the cache memory, etc. The influence of multiservice traffic self-similarity on the performance of the network content delivery network was investigated. A method for improving QoE parameters

was presented. Its impact on the network of the service provider and on the quality of services, which is provided to the end user, was analyzed. Basing on researches, developed methods of network resources effective use, content management, quality assurance of services and load balancing in infocommunication networks, the methodology of content delivery networks synthesis was proposed. Efficiency of offered content management appliance methods and methodology of delivery networks synthesis in the operating network was investigated.

Keywords: content, infocommunication, distributed systems, content delivery networks, global information infrastructure, traffic, QoS, QoE, queues.

The list of author's publications:

Monograph:

1. Kyryk M. I. Methods and models of traffic management in distributed infocommunication systems: monograph / M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka, O. V. Tymchenko. – Lviv : Ukrainian academy of printing, 2017. – 264 p. ISBN 978-966-322-473-2.

Proceedings where basic scientific results of thesis were published:

2. Kyryk M. I. Analysis of work and research on the effectiveness of using the CDN network / M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka, M. V. Pleskanka // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – Lviv. – 2017. – №885. – P. 42-48.

3. Maksymyuk T. Designing the new backbone for 5G Heterogeneous Network Based / Taras Maksymyuk, Olena Krasko, Maryan Kyryk, Vasyl Romanchuk, Roman Kolodiy // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2017. – Vol. 17, No. 4. – P. 9–13. – DOI: 10.15546/aei-2017-0028.

4. Klymash M.M. Model for evaluating the efficiency of radio frequency channel switching algorithms for spectrum selection in cognitive radio networks / M. M. Klymash, M.I. Kyryk, V. B.Yanyshyn // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – Lviv. – 2017. – №874. – C. 87-95.

5. Fekade B. Probabilistic Recovery of Incomplete Sensed Data in IoT / Berihun Fekade, Taras Maksymyuk, Maryan Kyryk, Minho Jo.. IEEE Internet of Things Journal. – Issue 99, pp. 1-11, Jul. 2017.

6. Maksymuk T. Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed spectrum for multi-operator 5G hetnet / Taras Maksymuk ; Maryan Kyryk; Mykhailo Klymash; Minho Jo; Ryszard Romaniuk; Andrzej Kotyra; Aizhan Zhanpeisova; Ainur Kozbekova; // Proceedings of SPIE: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, USA. – 2017. – Vol. 104455T. – doi: 10.1117/12.2280795.

7. Maksymyuk T. Comprehensive Spectrum Management for Heterogeneous Networks in LTE-U / T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo // IEEE Wireless Communications. – 2016. – vol.23 – DOI: 10.1109/MWC.2016.1600042WC, Issue: 6, pp. 8-15, Dec. 2016.

8. Kyryk M. I. Estimation of efficiency of methods of spectral mobility in cognitive radio networks / M. I. Kyryk , V. B. Yanyshyn, M. V. Pitsyk // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – 2016. –Vol. 849. – P. 194–202.

9. Kyryk M. I. Research of content management mechanisms in CDN networks / M. I. Kyryk // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – 2016. – Vol. 849. – P. 229–236.

10. Kyryk M.I. Estimation of spectral density of power based on the Uelch periodogram method for a cognitive radio / M. I. Kyryk, V. B. Yanyshyn, R. S. Kolodiy // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2015. – Vol. 818. – P. 86-93.

11. Klymash M. M. Multi-level model of data buffering in nodes of service of a multi-service traffic / M. M. Klymash, M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka, I. O. Kagalo // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2014. – Vol. 796. – P. 182-194.

12. Kyryk M. I. Model of bandwidth estimation of cognitive radio network based on OFDM / M. I. Kyryk, V. B. Yanyshyn, I. B. Strykhalyuk // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2014. – Vol. 796. – P. 104-112.

13. Klymash Mykhailo. Data Buffering Multilevel Model at a Multiservice Traffic Service Node / Mykhailo Klymash, Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka, Volodymyr Yanyshyn // Smart Computing Review. Korea, August 31, 2014. – Vol. 4. No. 4. – P. 294-306.

14. Kyryk M. I. Algorithm for queues service in wireless networks / M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka // Institute of Modeling Problems in Power Engineering: scientific proceedings. – Kyiv, 2014. – Vol. 70. – P. 159-162.

15. Kyryk M. I. Research and modeling of mechanisms of queues formation and maintenance in network devices /M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka, D. V. Kozhurov // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2013. – Vol. 766. – P. 179-186.

16. Klymash M. M. Research and modeling of the quality and time parameters of the traffic servicing node of multiservice network / M. M. Klymash, M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka, V.B. Yanyshyn // Scientific proceedings of Ukrainian Research Institute of Communications. – Kyiv, 2012. – Vol. 4(24). – P.31-37.

17. Kyryk M. I. Research of multimedia traffic buffering in data networks / M. I. Kyryk, T. V. Andrukhiv, V. V. Chervenets, N. M. Pleskanka // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2012. – Vol. 738. – P. 100-106.

18. Kyryk M. I. Investigation of the influence of x264 codec parameters on video signal quality / M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – 2011. – Vol. 705. – P. 161–166.

19. Kyryk M. I. An algorithm for adaptive QoS providing by adjusting the length of an IP packet / M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka // Institute of Modeling Problems in Power Engineering: scientific proceedings. – Kyiv, 2011. – Vol.59. – P. 161-165.

20. Tymchenko O. V. Analysis of the passage of multimedia traffic in the content delivery network / O. V. Tymchenko, M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka // Computer technologies of printing: scientific proceedings. – Lviv, 2011. – Vol. 25. – P.109-115.

21. Chernikhivsky Y. M. Assessment and management of quality of perception of the service (QoE) in telecommunication networks / Y. M. Chernikhivsky, M. I. Kyryk, V. I. Romanchuk, V. V. Chervenets // Radioelectronics and telecommunications. The Herald of Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2010. – Vol. 680 – P.132-135.

22. Tymchenko O. V. Mechanisms for ensuring the quality of transmission of video traffic in multiservice networks / O. V. Tymchenko, M. I. Kyryk, V. V. Chervenets // Simulation and informational technologies: scientific proceedings. – Kyiv, 2009. – Vol.54. – P. 247-251.

23. Tymchenko O. V. The correlation between the quality of data network services and OSI levels / O. V. Tymchenko, M. I. Kyryk, B. M. Verkhola, Askar Sami. // Institute of Modeling Problems in Power Engineering: scientific proceedings. – Kyiv, 2008. – Vol.49. – P. 150-157.

24. Tymchenko O. V. Quality research of multicast transmission of multimedia traffic / O. V. Tymchenko, M. I. Kyryk, B. M. Verkhola, Askar Sami // Institute of Modeling Problems in Power Engineering: scientific proceedings. – Kyiv, 2008. – Vol. 48. – P. 161-169.

Proceedings that certify an approvement of thesis materials:

25. Maksymyuk Taras. Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks / Taras Maksymyuk; Mykola Brych; Yulia Klymash; Maryan Kyryk; Mykhailo Klymash // Problems of Infocommunications. Science and Technology, (PIC S&T), 2017 4th International Scientific-Practical Conference, 10 - 13 October, Kharkiv, Ukraine. – P. 515-518.

26. Kyryk M. The efficiency and productivity of the CDNs. / Maryan Kyryk, Maryana Pleskanka, Nazar Pleskanka // 2nd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT 2017) : Conference Proceedings, 4-7 July 2017, Lviv, Ukraine. – P. 270-273.

27. Kyryk M. Content Delivery Network Usage Monitoring / M. Kyryk, N. Pleskanka, M. Pleskanka // Proceedings of 14th International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics»,

CADSM'2017, 21-25 February 2017, Poljana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 306-308.

28. Kyryk M. Performance Evaluation Model for Spectrum Decision Methods in Cognitive Radio / M. Kyryk, V. Yanyshyn, N. Pleskanka // Proceedings of 14th International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2017, 21-25 February 2017, Poljana-Svalyava, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 289-291.

29. Kyryk Maryan. Proactive spectrum handoff performance evaluation model for cognitive radio / Maryan Kyryk, Volodymyr Yanyshyn // Problems of Infocommunications. Science and Technology, (PIC S&T), 2016 Third International Scientific-Practical Conference, 4 - 6 October, Kharkiv, Ukraine. – P. 18-20.

30. Maksymyuk T. Opportunistic Tri-Band Carrier Aggregation in Licensed and Unlicensed Spectrum for Multi-Operator 5G HetNet / T. Maksymyuk, M. Kyryk, Minh Jo // 2016 IEEE International conference of information-telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2016): Materials of scientific and technical conference. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 11-15 September, 2016. – P.315-317.

31. Kyryk M. QOS mechanism in content delivery network / M. Kyryk, N. Pleskanka, M. Pitsyk // Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016, February 23 – 26, 2016 Lviv-Slavske, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic.- P. 658-660.

32. Kyryk M. Performance Comparison Of Cognitive Radio Networks Spectrum Sensing Methods / M. Kyryk, L. Matiishyn, V. Yanyshyn, V. Havronskyy // Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016. February 23 – 26, 2016 Lviv-Slavske, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic.- P. 597-600.

33. Kyryk M. The spectrum sensing techniques efficiency analysis in cognitive radio networks / M. Kyryk, V. Yanyshyn // 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015): Conference Proceedings, October 29 – November 1, 2015, Lviv, Ukraine. – P. 41-43.

34. Kyryk M. Data Buffering Multilevel Model with Adaptive Changes of Buffer Size Technology / M. Kyryk, N. Pleskanka, O. Urikova // Proceedings of XIIIth International IEEE conference «The experience of designing and application

of CAD systems in microelectronics», CADSM'2015, 24-27 February 2015, Lviv-Poljana, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 448-451.

35. Kyryk M. OFDM-based Cognitive Radio System Capacity Evaluation Model / M. Kyryk, V. Yanyshyn // Proceedings of XIIIth International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2015, 24-27 February 2015, Lviv-Poljana, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 137-140.

36. Kyryk M. I. Investigation of the effectiveness of cooperative scanning in cognitive radio networks / M. I. Kyryk, V. B. Yanyshyn // Ukrainian Scientific and Practical Conference «Modern problems of telecommunications and professionals tuition in the field of telecommunications – 2014». Conference Proceedings, 30 October - 02 November 2014 y., Lviv. – P.153-154.

37. Klymash M. M. Multi-level model of data buffering in service nodes of multi-service traffic / M. M. Klymash, M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka, I. O. Kagalo // Physical and technological problems of radio engineering devices, telecommunication, nano and microelectronics, IV International Scientific Practical Conference, 23-25 October 2014, Chernivtsi, Ukraine. – P. 98-99.

38. Kyryk Maryan. The Buffering and Congestion Management in Multiservice Networks / Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25- March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 541-543.

39. Kyryk Maryan. The Cooperative Spectrum Sensing Performance Research in Cognitive Radio Networks / Maryan Kyryk, Volodymyr Yanyshyn, Dmitry Kozhurov // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25-March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 448-450.

40. Jo Minh. Advanced wireless access methods for 5G heterogeneous mobile networks / Minh Jo, Taras Maksymyuk, Maryan Kyryk, Mykhailo Klymash //

Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25- March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 30-32.

41. Kyryk M. I. System model for queues service in wireless networks / M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka // Proceedings of XXXIII scientific and technical conference «Modeling», 15-16 January, 2014, Kyiv. – P. 42

42. Jo Minh. Cognitive Radio Approach for LTE Deployment / Minh Jo, Maryan Kyryk, Taras Maksymyuk, Longzhe Han // Proceedings of the IX International Conference on The Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2013). April 16-20, 2013 Polyana, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. - P. 63-64.

43. Kyryk Maryan. The model of evaluation quality and timing parameters service device in multiservice network / Maryan Kyryk, Volodymyr Yanyshyn // Proc. of the XII Intern. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013). February 19-23, 2013 Lviv – Polyana, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. - P. 198-199.

44. Kyryk M. I. The statistical model of self-similar traffic of the multiservice network / M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka // VI International Scientific and Technical Symposium «New Technologies in Telecommunications» SUICT-CARPATHIANS '2013. 21 - 25 January, 2013 Vyshkiv, Ukraine. – P.89-90.

45. Klymash M. M. Defining of multimedia traffic settings in a multiservice network / M. M. Klymash, M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka // Ukrainian Scientific and Practical Conference «Modern problems of telecommunications and professionals tuition in the field of telecommunications – 2012». Conference Proceedings, 01-04 November, 2012. – Lviv, 2012. – P.34-37.

46. Kyryk Maryan. Reducing Channel Zapping Time Based on Predictive Tuning Method / Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka, Maryan Sylyuchenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the Xth International Conference TCSET'2012, Lviv-Slavske, Ukraine, February 21-24, 2012. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2012. – P. 244-245.

47. Kyryk M. I. Determining dependence of the video signal quality on the parameters of the codec H264 / M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka // Ukrainian Scientific and Practical Conference «Modern problems of telecommunications and professionals tuition in the field of telecommunications - 2011». Conference Proceedings, 27-30 October, 2011. – Lviv, 2012. – P.9-11.

48. Kyryk M. I. Studying the properties of multimedia traffic transmitted over the CDN network / M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka // Theses of XXX Scientific and technical conference «Modeling». 12-13 January, 2011. – Kyiv, 2011. – P. 56-57.

49. Klymash M. M. Control IP/MPLS network's QoS parameters based on resource allocation / M. M. Klymash, M. I. Kyryk, B. A. Buhyl // Conference Proceedings of the VIIth International scientific and technical Conference «Modern Informational and Communication Technologies» (04-08 October, 2010, COMINFO'2010-Livadia): Conference Proceedings. – Kyiv: SUIKT, 2010. – p.-C.22-23.

50. Kyryk M. Quality of Experience for IPTV / M. Kyryk, O. Kostiv // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the Xth International Conference TCSET'2010, February 23-27, 2010 Lviv-Slavske, Ukraine / Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv Polytechnic National Univeristy. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2010. – P. 214.

51. Tymchenko O. V. Analysis of methods of transmission of real-time traffic in telecommunication networks / O. V. Tymchenko, M. I. Kyryk, V. V. Chervenets // Ukrainian Scientific and Practical Conference «Modern problems of telecommunications and professionals tuition in the field of telecommunications - 2009», 28-30 October, 2009. – Lviv, 2009. – P.51-53.

Proceedings, which additionally reflect the scientific results:

52. Patent 111284 Ukraine, MPK51H04L 12/861. Method of buffering multiservice traffic in service nodes / Klymash M. M., Kyryk M. I., Pleskanka N.M., Strykhalyuk B. M., owner Lviv Politechnic National University. – № 201413995 ; stated 26.12.2014 ; published. 11.04.2016, Bull. № 7.2016 – 5 p.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	34
РОЗДІЛ 1	48
Аналіз стану та тенденцій розвитку розподілених інфокомунікаційних систем	48
1.1. Аналіз процесів конвергенції телекомунікаційних та інформаційних мереж	48
1.1.1. Глобальна інформаційна інфраструктура.....	48
1.1.2. Особливості створення Національної інформаційної інфраструктури	50
1.2. Принципи передавання інформації в розподілених інфокомунікаційних мережах	54
1.2.1. Еталонна мережева модель інфокомунікаційних мереж	54
1.2.2. Особливості моделювання розподілених інфокомунікаційних мереж	57
1.3. Властивості та класифікація інфокомунікаційних послуг	58
1.4. Визначення вимог до управління трафіком в сучасних інформаційно-телекомунікаційних мережах та системах.	64
1.4.1. Механізми забезпечення якості передавання відеотрафіку в мультисервісних мережах.	64
1.4.2. Критерії оцінки якості сприйняття послуг.	70
1.5. Проблеми розподілу ресурсів та завдання досліджень в розподілених інфокомунікаційних системах.	74
1.6. Висновки до 1-го розділу.....	77
РОЗДІЛ 2	79
Методи та моделі підвищення ефективності передавання інформації в розподілених інфокомунікаційних системах	79
2.1. Визначення основних характеристик ефективності та методів оцінки трафіку.....	79
2.2. Дослідження властивостей трафіку та визначення його ймовірнісно-часових характеристик.	84
2.2.1. Критерії класифікації мультисервісного трафіку	84

2.2.2. Визначення параметрів мережевих потоків у мультисервісних мережах.....	90
2.3. Дослідження методів моделювання та аналізу самоподібного мережевого трафіку.....	96
2.3.1. Підходи до моделювання систем з самоподібним трафіком.....	96
2.3.2. Математичний опис самоподібного (фрактального) процесу.....	100
2.3.3. Математичний опис дискретного самоподібного процесу.....	101
2.3.4. Опис моделі самоподібного трафіку.....	102
2.4. Моделювання якісних та часових параметрів мультисервісного трафіку.....	109
2.4.1. Визначення ступеня самоподібності мультисервісного трафіку. ...	110
2.4.2. Дослідження способів аналітичного моделювання самоподібного трафіку.....	112
2.4.3. Результати комп'ютерного моделювання.....	120
2.5. Висновки до 2-го розділу.....	123
РОЗДІЛ 3.....	125
Моделювання та дослідження методів передавання контенту в безпроводних мережах доступу.....	125
3.1. Безпроводні телекомунікаційні радіомережі з використанням технології когнітивного радіо.....	125
3.1.1. Технологія когнітивного радіо.....	126
3.1.2. Принципи побудови когнітивної радіомережі на основі OFDM ...	133
3.2. Імітаційна модель когнітивної радіосистеми для оцінки пропускної здатності радіоканалів.....	136
3.3. Вибір спектру та імітаційна модель оцінювання ефективності методів вибору спектру.....	145
3.3.1. Методи вибору ділянок спектру.....	145
3.3.2. Управління радіочастотним спектром та імітаційна модель процесу оцінювання ефективності методів вибору спектру.....	148
3.3.3. Оцінка ефективності алгоритмів вибору радіочастотних каналів ..	154
3.3.4. Математична модель OFDM сигналу.....	156

3.4. Дослідження ефективності роботи алгоритмів вибору та спільного використання радіочастотного спектру за допомогою програмного комплексу	160
3.5. Комплексне управління використанням спектральних ресурсів для гетерогенних мереж LTE.....	165
3.6. Висновки до 3-го розділу.	169
РОЗДІЛ 4	172
Розроблення методів управління навантаженням в мережах розповсюдження контенту.....	172
4.1. Дослідження архітектури та механізмів управління навантаженням в CDN мережах.....	172
4.1.1. Аналіз технологій і методів доставки інформації.....	172
4.1.2. Архітектура та переваги використання CDN мереж	174
4.1.2.1. Базова архітектура CDN мережі	174
4.1.2.2. Переваги використання CDN мереж	176
4.1.3. Надання послуг IPTV/OTT	178
4.2. Метод передавання та балансування навантаження в CDN мережах для забезпечення заданої якості сервісу.....	180
4.2.1. Метод передавання мультисервісного контенту через мережу CDN	180
4.2.2. Визначення цільової функції та механізми балансування навантаження в CDN мережах.....	184
4.3. Дослідження механізмів забезпечення якості передачі інформації в мережах доставки контенту.	189
4.3.1. Експертна оцінка якості послуг	189
4.3.2. Дослідження впливу параметрів кодеку H264 на якість відеосигналу	192
4.4. Експериментальні дослідження втрат відеотрафіку без пріоритезації та ефективність застосування механізму диференціювання трафіку.	198
4.4.1. Дослідження найпоширеніших проблем QoS та QoE	198
4.4.2. Дослідження ефективності використання механізму диференціювання відеотрафіку	199

4.4.3.	Аналіз особливостей трафіку в мережі доставки контенту CDN....	203
4.4.4.	Експериментальне дослідження методів балансування навантаження в CDN мережах для забезпечення заданої якості сервісу.....	205
4.5.	Висновки до 4-го розділу.....	206
РОЗДІЛ 5		209
Дослідження процесів обслуговування та управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах		209
5.1.	Розробка моделі та алгоритму обслуговування черг при передачі контенту в безпроводних мережах.....	209
5.1.1.	Алгоритми обслуговування черг в провідних мережах	209
5.1.1.1.	Черги з абсолютним пріоритетом.....	211
5.1.1.2.	Зважені черги, що налаштовуються	212
5.1.2.	Модель процесу обслуговування в безпроводних мережах	214
5.1.3.	Засоби для моніторингу і прогнозування стану каналу.	216
5.1.4.	Алгоритми справедливого обслуговування в безпроводних мережах	217
5.2.	Реалізація та дослідження алгоритму оцінки обслуговування черг у мультисервісній мережі на основі інтегрального критерію	220
5.2.1.	Результати моделювання для алгоритму FIFO	223
5.2.2.	Результати моделювання для алгоритму PQ.....	223
5.2.3.	Результати моделювання для алгоритму CQ.....	224
5.2.3.1.	Результати моделювання для алгоритму FQ.....	225
5.2.4.	Результати моделювання для алгоритму WFQ	226
5.2.5.	Результати моделювання для алгоритму IWFQ.....	226
5.2.6.	Аналіз та оцінка результатів моделювання.....	227
5.3.	Експериментальне визначення розміру буфера та дослідження впливу розміру буферів на параметри передачі трафіку	231
5.4.	Висновки до 5-го розділу.....	238
РОЗДІЛ 6		240
Реалізація CDN-мереж на основі глобальної мережевої інфраструктури.....		240

6.1. Розроблення методів пріоритетного управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах.	240
6.1.1. Структурно функціональна схема організації роботи CDN	240
6.1.2. Моніторинг і контроль мережі доставки контенту.....	247
6.2. Дослідження ефективності використання мережі CDN	250
6.3. Особливості передавання мультисервісного трафіку в мережі CDN. ..	257
6.4. Метод підвищення QoE для послуг IPTV/OTT.	260
6.1.1. Методика оцінювання QoE за параметром «Час перемикання»	260
6.1.2. Метод швидкого перемикання та процес моделювання	264
6.1.3. Аналіз результатів моделювання процесу вибору контенту	267
6.5. Узагальнена методологія синтезу мереж доставки контенту	270
6.5.1. Синтез мереж доставки контенту на основі сегментів ГП.....	270
6.5.2. Результати дослідження ефективності застосування методології синтезу мереж доставки контенту.....	273
6.6. Висновки до 6-го розділу.....	280
ВИСНОВКИ.....	283
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	286
ДОДАТОК А. Код програм, реалізованих в середовищі GPSS World.	308
ДОДАТОК Б. Фрагменти програмного коду реалізації програмного комплексу на основі імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею.	310
ДОДАТОК В. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	316
ДОДАТОК Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	322

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CDN – content delivery network or content distribution network - мережа доставки (розповсюдження) контенту;

CR – cognitive radio – когнітивне радіо, КР;

DNS – Domain Name System – доменна система імен;

ГІІ – Global information infrastructure – глобальна інформаційна інфраструктура, ГІІ;

FTP – File Transfer Protocol – Протокол передавання файлів;

HTTP – Hyper Text Transfer Protocol – Протокол передавання гіпертексту;

HTTPS – HTTP протокол із додатковим шаром шифрування/аутентифікації;

IaaS – Infrastructure as a Service – Інфраструктура, як сервіс;

IP – Internet Protocol – Інтернет протокол;

IPTV – Internet Protocol Television – цифрове інтерактивне IP-телебачення;

IoT – Internet of Things – Концепція «Інтернету речей»;

ISP – Internet Service Provider – Інтернет-провайдер;

ITU – Міжнародний союз телекомунікацій;

LTE – Long Term Evolution - довготерміновий розвиток систем мобільного зв'язку (група концепцій та стандартів);

MIMO – Multiple Input Multiple Output – системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами;

NaaS – Network as a service – мережа як послуга;

NFV – Network Functions Virtualization – віртуалізація мережевих функцій;

NGN – Next Generation Network – Мережа наступного покоління;

OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – метод мультиплексування;

OSI – Модель взаємодії відкритих систем;

OTT – Over-The-Top Service – доставка відео та аудіо без причетності ISP;

PaaS – Platform as a Service – платформа, як сервіс;

PoP – Point of Presence – точка (операторської) присутності;

QAM – Quadrature Amplitude Modulation – квадратурно-амплітудна модуляція (КАМ);

QoE – Quality of Experience – якість сприйняття сервісу;

QoS – Quality of Service – якість сервісу;

QPSK – Quadrature Phase-shift Keying – квадратурно-фазова модуляція;

SaaS - Software as a Service – програмне забезпечення, як сервіс;

SDN – Software-defined Networking – програмно-конфігурована мережа;

SIP – Session Initiation Protocol – протокол встановлення сесії (як правило, VoIP);

SLA – Service Level Agreement – угода про рівень якості обслуговування;

TCP – Transmission Control Protocol – протокол керування передачею;

TE – Traffic Engineering – управління трафіком;

UDP – User Datagram Protocol – протокол датаграм користувача;

VoD – відео на замовлення;

VoIP – Voice over IP – голос поверх IP (сервіс IP-телефонії);

ІКТ – інформаційно-комунікаційні технології;

КР – когнітивне радіо;

НІІ – Національна інформаційна інфраструктура;

СМО – Система масового обслуговування;

ШПФ – швидке перетворення Фур'є.

ВСТУП

Загальна характеристика роботи. Дисертаційну роботу присвячено проблематиці управління передаванням інформації в розподілених інфокомунікаційних системах та мережах доставки контенту з метою ефективного використання мережевих ресурсів глобальної інформаційної інфраструктури загалом, та її національного сегменту зокрема, шляхом підвищення продуктивності процесів передавання даних в умовах збільшення їх обсягів. Враховуючи динаміку розвитку інфокомунікаційних технологій та збільшення різноманітності послуг, очевидно, що основою для побудови високоефективної інформаційної інфраструктури стають існуючі телекомунікаційні системи. Створення відповідного інфокомунікаційного середовища є важливою проблемою, стаючи основою широкого впровадження інфокомунікаційних технологій, технологій формування і використання інформації та знань у процесі побудови інформаційного суспільства в Україні, а отже, є національним пріоритетом.

Актуальність теми. Сучасне суспільство використовує різноманітні форми соціальної та економічної діяльності, які базуються на масовому використанні інформаційних і телекомунікаційних технологій, а розвиток науково-технічного прогресу визначає перехід від постіндустріального суспільства до інформаційного. Відповідно до Окінавської хартії глобального інформаційного суспільства, прийнятої на саміті країн Великої вісімки (G8) у 2000 році, інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) є одним з найважливіших факторів, що впливають на формування суспільства XXI століття. Вони змінюють стиль життя, навчання та роботи, взаємодії влади та громадянського суспільства, стають рушійною силою розвитку світової економіки, забезпечуючи більш ефективне розв'язання економічних та соціальних проблем у всіх куточках земної кулі та відкриваючи нові величезні можливості для людства.

Україна, як частина спільноти світового інформаційного суспільства, продовжує впроваджувати новітні технології, в т.ч. інформаційно-

комунікаційні послуги, що сприяє розвитку економіки та суспільства, підвищує можливості реалізації людського потенціалу, використання національних ресурсів.

Термін «інфокомунікації» означає нерозривний зв'язок інформаційних і телекомунікаційних елементів інформаційного обміну, які розвиваються в процесі конвергенції. Поєднання інформаційних і телекомунікаційних технологій призвело до реорганізації мережевої архітектури та створення інфокомунікаційних мереж наступного покоління (Next Generation Networks, NGN), в яких надаються мультисервісні послуги з постійно зростаючою інтенсивністю мережевого трафіку. Поява нових інформаційно-комунікаційних послуг, перенесення традиційних послуг на платформу IP, зростання кількості споживачів цих послуг спричинили розвиток технологій, в яких на першому місці стоїть питання якості надання послуг та забезпечення їх доставки до кінцевих користувачів.

Особливої актуальності ці питання набувають в умовах необхідності забезпечення високої продуктивності мережевої інфраструктури та ефективного використання мережевих ресурсів для передавання об'ємів трафіку, що постійно зростають. Зазначені тенденції призводять до підвищення вимог щодо управління трафіком в телекомунікаційних системах. Для задоволення цих вимог в системах передавання даних впроваджуються методи та механізми управління трафіком, які тою чи іншою мірою враховують особливості різних видів послуг.

Зростання об'ємів трафіку та вимог до гарантування якості його передавання спричиняє підвищення вимог до інформаційних мереж, що в сукупності утворюють основу проблематики високоякісної передачі інформації з урахуванням пікових навантажень та максимально можливим використанням наявних мережевих ресурсів. Конвергентна мережева інфраструктура повинна бути придатною для передавання значних за обсягом потоків відео- та аудіоінформації, даних та службової інформації (контенту загалом).

Таким чином, проблематика ефективного управління передаванням інформації в умовах збільшення її обсягів, на основі розроблення моделей і методів доставки контенту в інфокомунікаційних системах, має важливе науково-практичне значення, є актуальною і своєчасною та визначає напрямки досліджень дисертаційної роботи.

Дослідження методів управління мережевими ресурсами та передавання інформації, якості обслуговування, характеристик трафіку, розвиток теорії систем масового обслуговування пов'язані з роботами таких вчених, як Стеклов В., Поповський В., Беркман Л., Лемешко О., Ложковський А., Гольдштейн Б., Хінчин А., Шеннон К., Kleinrock L., Pollaczek F., Crovella M., Willinger W., Leland W., Taqqu M., Paxson V. та інших. Проте, розвиток інформаційних технологій вимагає уточнення і перегляду наявних математичних моделей та розроблення нових методів передавання різноманітного контенту в сучасних інфокомунікаційних мережах, зокрема мережах доставки контенту (CDN).

Нові мережеві технології спричиняють істотний вплив на існуючі і добре розвинені галузі. Особливої уваги заслуговують послуги, які зорієнтовані на передавання даних в режимі реального часу, а саме: IP-телефонія (VoIP), IP-телебачення (IPTV), відео на замовлення (VoD), відеоконференції (VC) та інші, що є більш критичними до мережевих ресурсів. Суттєве зростання об'ємів мультимедійних даних, серед іншого, спричинене різким збільшенням обсягу мобільного IP-трафіку.

Ще одним важливим напрямом розвитку інфокомунікаційних технологій є розвиток технологій віртуалізації та розподілених «хмарних» обчислень. Зростання популярності надання послуг за допомогою різного рівня «хмар»: SaaS, IaaS та PaaS (програмне забезпечення, інфраструктура та платформа, як послуги) та концептуальної моделі NaaS (мережа, як послуга) підвищує вимоги до телекомунікаційної інфраструктури, яка повинна забезпечувати обмін контентом в цих складних розподілених інфокомунікаційних системах.

Основними перевагами розподілених систем, у порівнянні з централізованими, є: можливість виконання паралельних обчислень;

досягнення високої сумарної продуктивності; підвищення ступеня спільного використання ресурсів; краще співвідношення ціна/якість; висока надійність та відмовостійкість.

Мережеві технології сьогодні є однією з найпрогресивніших галузей науки і техніки, а управління інформаційними мультисервісними потоками потребує використання моделей та алгоритмів керування трафіком для оптимізації функціональних характеристик мережевих систем.

Отже, виникає *протиріччя*, оскільки традиційні моделі аналізу трафіку, а також методи розподілу мережевих ресурсів не відповідають сучасному рівню технічного прогресу в галузі інформаційно-комунікаційних технологій, а існуючі методи керування потоками не враховують характеристик трафіку гетерогенних інфокомунікаційних мереж доставки контенту.

На сьогодні дане протиріччя можливо розв'язати шляхом побудови моделей вхідного трафіку, характеристики яких були б найближчими до характеристик реальних потоків даних, зокрема у CDN, розробленням нових моделей та методів управління різнотипними мережевими ресурсами, удосконаленням математичного інструментарію аналізу та дослідження розподілених інфокомунікаційних систем для розроблення засобів підвищення ефективності передавання інформації, що, разом із сукупністю порушених вище питань, дозволяє сформулювати актуальну *наукову проблему* розроблення методологічного забезпечення управління передаванням контенту в розподілених інфокомунікаційних системах та мережах з метою ефективного використання мережевої інфраструктури, підвищення системної продуктивності і якості надання послуг за рахунок динамічного балансування навантаження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з положеннями Законів України «Про Концепцію Національної програми інформатизації», «Про Національну програму інформатизації», «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки», Постанов Верховної Ради України

про «Стратегію розвитку інформаційного суспільства в Україні», «Концепцію конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні», та розпоряджень Уряду України у сфері інформатизації.

Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» - «Інфокомунікаційні системи та мережі», в рамках низки держбюджетних науково-дослідних тем: «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 рр.), № держреєстрації 0115U000444; а також госпдоговірної тематики «Оптимізація параметрів прокладки оптичного кабелю в міській телефонній каналізації» (2014 р.), ГД № 0489; «Розробка алгоритму роботи кешуючого медіасервера з авторизацією на базі Nginx» (2015 р.), ГД № 0519; «Проектування та впровадження локальної мережі передачі мультимедійних даних на базі Ethernet технологій» (2016 р.), ГД № 0548; «Розробка методів управління контентом в інформаційній системі підприємства з використанням технологій віртуалізації» (2017 р.), ГД №0741.

Мета і завдання дослідження. Метою представленої дисертаційної роботи є підвищення продуктивності та ефективності управління передаванням інформації в мережах доставки контенту в умовах збільшення його обсягів на основі вдосконалення моделей і методів передавання потоків навантаження в інфокомунікаційних системах.

Для досягнення поставленої мети в межах дисертаційних досліджень були сформульовані та розв'язані такі завдання:

1. Аналіз стану проблематики управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах, а також особливостей процесу конвергенції телекомунікаційних та інформаційних мереж.

2. Визначення основних вимог до моделей інфокомунікаційних мереж доставки користувачького контенту, дослідження їх функціональних характеристик.

3. Визначення основних характеристик та методів оцінювання трафіку в мультисервісних мережах, зокрема його ймовірно-часових характеристик та властивостей.

4. Вивчення недоліків існуючих моделей для дослідження самоподібного трафіку з метою аналізу якості обслуговування для послуг реального часу.

5. Розроблення та моделювання процесів обслуговування та управління контентом в інфокомунікаційних мережах для покращення якості надання послуг передавання поточкових даних реального часу.

6. Дослідження технології когнітивних радіомереж, розроблення моделей і методів динамічного доступу до ділянок радіоспектру для підвищення ефективності використання частотного ресурсу.

7. Розроблення та дослідження нових моделей та методів управління різнотипними мережевими ресурсами в мультисервісних мережах для підвищення продуктивності передавання користувачького контенту.

8. Дослідження методів побудови мереж доставки контенту на основі існуючих сегментів мережевої інфраструктури.

9. Дослідження адекватності запропонованих моделей та методів на імітаційних моделях, зокрема шляхом експериментальних досліджень параметрів та характеристик інформаційних потоків у процесі застосування запропонованих методів для обслуговування користувачів на діючих мережах.

Об'єктом дослідження є процес передавання інформації в розподілених інфокомунікаційних системах.

Предмет дослідження: моделі та методи управління контентом для підвищення ефективності передавання інформаційних потоків в розподілених інфокомунікаційних системах та мережах доставки контенту.

Методи дослідження. В процесі досліджень використано такі теоретичні засади, як теорія систем масового обслуговування (для дослідження ймовірно-часових характеристик трафіку), теорія телекомунікаційних систем і теорія ієрархічних систем (для загального теоретичного обґрунтування результатів дисертаційної роботи), теорія марківських процесів (для моделювання та дослідження процесів обслуговування навантаження в розподілених інфокомунікаційних системах), методи фрактального аналізу, теорія інформації (при розробленні методів управління інформаційними потоками), методи математичної статистики, теорія ймовірностей, а також методи математичного та комп'ютерного моделювання, метод експертних оцінок.

Для підтвердження теоретичних результатів були застосовані експериментальні методи дослідження характеристик процесів передавання інформаційного контенту у реальних інфокомунікаційних мережах.

Оцінка експериментальних даних проводилася на основі методів математичної статистики. Вибір методів дослідження забезпечив достовірність отриманих результатів та висновків, що підтверджується збіжністю результатів експериментальних досліджень, отриманих під час програмної реалізації алгоритмів управління інтегральними потоками даних з теоретичними і практичними результатами.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що запропоновано, обґрунтовано та застосовано комплексний підхід до науково-практичної проблеми розроблення методологічного забезпечення управління передаванням інформації в розподілених інфокомунікаційних системах та мережах доставки контенту з метою ефективного використання мережевої інфраструктури, підвищення системної продуктивності та якості надання послуг за рахунок динамічного балансування навантаження.

1. Набула подальшого розвитку модель самоподібного мультисервісного трафіку в розподілених мережах передавання потокового користувацького навантаження, яка, на відміну від відомих, використовує поєднання методів

аналітичного та імітаційного моделювання з використанням засобів моделювання GPSS, що дає змогу оцінити основні статистичні характеристики процесів обслуговування мультисервісного трафіку, враховуючи завантаженість мережі та параметр Херста.

2. Вперше запропоновано метод для оцінювання ефективності вибору радіочастотного каналу в когнітивній безпроводній мережі доступу, який, на відміну від відомих, враховує ймовірність зайняття визначених ділянок радіочастотного спектру на основі результатів його сканування, що дає змогу оцінити середній час доставки даних, а також мінімізувати тривалість прийняття рішення про зміну радіочастотних каналів.

3. Набула подальшого розвитку математична модель ймовірнісно-часових характеристик мультисервісної мережі, яка, на відміну від відомих, враховує структурно-функціональні особливості архітектури рівня доступу в мережах доставки контенту, що дало змогу більш точно описати його затримку та джитер.

4. Запропоновано інтегральний критерій для оцінювання ефективності обслуговування черг та управління розподілом навантаження в безпроводних мережах, який враховує значення затримки, джитера та ймовірності втрати пакетів і дає змогу покращити результати роботи механізмів управління мережевими ресурсами та забезпечення належної якості надання послуг.

5. Набув подальшого розвитку метод передавання, розподілу та доставки мультисервісного контенту в розподілених інфокомунікаційних системах із використанням технології CDN, що дає змогу оптимізувати параметри передавання та кешування даних в залежності від їх типу, що в свою чергу підвищує ефективність використання мережевої інфраструктури та якість надання послуг.

6. Вперше запропоновано модель процесу переспрямування замовленого потокового контенту, яка, на відміну від відомих, враховує QoE оцінку користувачів при одержанні послуг, що дало змогу визначити найбільш ефективну PaaS реалізацію методу побудови CDN мережевої системи.

7. Запропоновано методологію синтезу мереж доставки контенту на основі сегменту глобальної мережевої інфраструктури, яка враховує методи ресурсного управління, наскрізного оцінювання їх параметрів, якості сервісу та стану активного мережевого обладнання, а також динамічного балансування навантаження, що дало змогу підвищити системну продуктивність та якість надання інфокомунікаційних послуг за рахунок більш ефективного використання мережевих ресурсів.

Практичне значення одержаних результатів. Основним практичним результатом дисертації, який одержаний на основі проведених теоретичних досліджень, є удосконалена методологія побудови та багаторівнева модель функціонування мережі доставки контенту на основі сегменту існуючої глобальної мережевої інфраструктури, яка враховує методи ресурсного управління, наскрізного оцінювання параметрів якості сервісу та стану активного мережевого обладнання, а також динамічного балансування навантаження, що дало змогу підвищити системну продуктивність та якість надання інфокомунікаційних послуг за рахунок ефективнішого використання мережевих ресурсів.

У межах запропонованої методології використано такі практичні особливості розроблених методів і моделей:

1. На основі математичного моделювання та розробленої імітаційної моделі одержано співвідношення для розрахунку оптимальних параметрів якості обслуговування мультисервісного трафіку, що передається у інформаційних системах, які забезпечують можливість оцінювання та вибору параметрів мережевого обладнання для обслуговування різних типів інформаційних потоків користувачького навантаження. При цьому на 12-15% підвищуються показники якості сервісу та відбувається підтримка вказаних значень упродовж усього періоду експлуатації мережевої системи.

2. Вперше запропоновано імітаційну модель когнітивної системи керування радіомережею доступу, яка відрізняється від існуючих збором та моніторингом параметрів радіочастотних каналів та застосуванням методів прогнозування їх стану, що дало змогу підвищити ефективність використання

радіочастотного спектру, а також покращити параметри якості надання мультисервісних послуг.

3. Удосконалено імітаційну модель для оцінювання ефективності методів вибору радіочастотного каналу в мережах когнітивного радіо на основі введення додаткового показника – тривалості прийняття системою рішення у процесі функціонування алгоритмів балансування вхідного навантаження, що, в поєднанні з оцінюванням ймовірності зайняття радіоканалу на основі моніторингу його параметрів, дало змогу покращити швидкодію системи керування когнітивною радіомережею за рахунок зменшення часу прийняття рішення про зміну радіоканалу до 25% при низькому та на понад 50% при високому вхідному навантаженні.

4. Запропоновано новий підхід до управління радіоресурсами на основі комплексного моніторингу мережі та програмного планування для агрегації декількох смуг на різних частотах у ліцензійному та неліцензійному діапазонах в один канал для мультиоператорського доступу в мережах 4G/5G. Проведено моделювання для оцінювання ефективності запропонованих рішень, яке показало тенденцію до збільшення середньої швидкості передавання користувацьких даних до 40%.

5. Вперше запропоновано елементи архітектури мережі доставки контенту для підвищення ефективності маршрутизації та вибору сервера-обробника запитів користувачів на основі цільової функції, яка враховує в якості основних критеріїв час затримки, навантаження на сервер та ймовірність втрати пакетів, що, у свою чергу, дало змогу зменшити затримку та джитер, що є критичними для послуг реального часу, та забезпечити якість цих послуг в CDN-мережі. Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено:

– у ДП НТЦ "Уарнет" (Україна) під час модернізації магістральної транспортної мережі підприємства та підбору параметрів мережевого обладнання для обслуговування мультисервісних інформаційних потоків абонентського навантаження та підвищення показників якості сервісу;

– у ТзОВ «ЛІТех» при побудові мережі доставки контенту на основі мережі та серверів компанії OVH Telecom (Франція, Канада), що дало змогу

підвищити ефективність використання мережевих ресурсів та збільшити загальний обсяг послуг із забезпеченням необхідної якості обслуговування;

– у ТзОВ ВКФ «Радіо Сервіс «Лімітед» під час моніторингу радіочастотних ресурсів компанії та реорганізації безпроводної мережі для підвищення продуктивності її роботи та більш ефективного використання радіочастотного спектру;

– у ТзОВ «ТРК Західтелесервіс» – для підвищення ефективності використання мережевої інфраструктури та покращення рівня якості сприйняття послуг кінцевими користувачами QoE за рахунок динамічного балансування навантаження із використанням технологій CDN;

– у навчально-науковому процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсів лекцій з дисциплін «Телекомунікаційні та інформаційні мережі, ч.2», «Системне адміністрування телекомунікаційних мереж», «Розподілені сервісні системи та Cloud-технології»; для створення нових курсів лекцій з дисципліни «Маршрутизація та розподіл потоків у телекомунікаційних мережах».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать: [37] – дослідження принципів передавання інформації в розподілених інфокомунікаційних мережах, алгоритми буферизації для зменшення рівня втрат та мінімізації затримки обслуговування мережевих даних, аналіз самоподібного трафіку; [33, 75] – імітаційна модель для вибору оптимальних алгоритмів обслуговування черг у мультисервісних мережах; [23, 131, 160, 161] – дослідження методів та принципів буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку; [18, 46, 51, 77] – дослідження та моделювання самоподібного трафіку та визначення його ймовірно-часових характеристик; [148, 176] – метод оцінки впливу параметрів кодера на якість відеосигналу та підбір параметрів для проведення ефективного кодування; [166, 169, 171] – розроблення алгоритму обслуговування черг у безпроводному середовищі, запропонований інтегральний критерій для оцінювання ефективності обслуговування черг та управління розподілом навантаження;

[173, 192] – дослідження та моделювання впливу буферизації на якість сприйняття послуг кінцевими користувачами, модель процесу переспрямування потокового контенту; [19, 21, 32, 157] – дослідження механізмів оцінки якості сприйняття послуги; [14, 30, 141, 177] – методи оцінки якості надання мультисервісних послуг; [51, 151, , 184] – дослідження впливу самоподібності трафіку на продуктивність роботи мережі доставки контенту; [100, 101, 110] – модель для оцінювання ефективності методів вибору радіочастотного каналу в когнітивній радіомережі; [97, 103] – аналіз методів вибору ділянок спектру для когнітивного радіо та порівняння алгоритмів перемикання каналів за критерієм мінімізації загальної тривалості цього процесу в умовах балансування навантаження; [86, 95, 107] – дослідження продуктивності процесів передавання ділянок спектру для обслуговування користувачів при застосуванні проактивного і реактивного методів спектральної мобільності та розроблення відповідних алгоритмів; [87] – теоретичні основи розроблення імітаційної моделі системи виявлення енергії сигналу для оцінювання спектральної густини потужності; [98, 108] – дослідження принципів побудови когнітивної радіомережі на основі OFDM; [120, 122] – аналіз та дослідження механізмів управління трафіком в мережах LTE/5G; [121, 123, 127, 128] – методи управління радіоресурсами на основі комплексного моніторингу мережі та програмного планування для агрегації декількох спектральних смуг на різних частотах у ліцензійному та неліцензійному діапазонах в мережах 4G/5G; [151, 174, 175, 182, 184] – результати імітаційного моделювання та дослідження продуктивності роботи CDN.

Результати спільних наукових праць було використано у дисертаційних роботах таких співавторів, як Плєсканка Н.М. [196] (для дослідження роботи механізмів обслуговування черг та управління перевантаженням шляхом використання технології адаптивної буферизації даних), Червенець В.В. [197] (для оцінювання параметрів якості обслуговування потокового інформаційного трафіку в мультисервісній мережі), Янишин В.Б. [198] (для моделювання і дослідження моделей і алгоритмів оцінювання ефективності використання

радіочастотного спектру, зокрема визначення параметрів якості надання послуг QoS та покращення пропускнуої спроможності системи когнітивного радіо).

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 26-ти міжнародних і загальнодержавних науково-технічних конференціях та наукових семінарах: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів-Славське, 2010, 2012, 2016 pp.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2013, 2015, 2017 pp.); Науково-практичних конференціях «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2009, 2011, 2012, 2014» (м. Львів, 2009, 2011, 2012, 2014pp.); 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T) (Kharkiv, Ukraine, 2016, 2017); Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки IEEE (UkrMiCo'2016/UkrMiCo'2016) (м. Київ, 2016); 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (Lviv, Ukraine, 2015); 2nd International IEEE Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (м. Львів, 2017); XXX, XXXIII науково-технічних конференціях «Модельовання» ПІМЕ НАН України (м. Київ, 2011, 2014); IV міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (м. Чернівці, Україна, 2014); VI Міжнародному науково-технічному симпозиумі «Нові технології в телекомунікаціях» ДУІКТ-КАРПАТИ '2013, (с. Вишків Долинського району Івано-Франківської області); IX International Conference on The Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2013) (Polyana, Ukraine, 2013); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» COMINFO-2010], (АРК Крим, м. Лівадія, 2010). 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 52 наукових праці, серед них 1 – монографія, статей у наукових фахових виданнях – 23 (всі статті у науковій періодиці, що входить до міжнародних наукометричних баз різного рівня, включаючи Web of Science, Scopus, Index Copernicus, Google Scholar тощо, 1 – опублікована одноособово), 1 патент України, у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 27, з них індексованих у наукометричній базі Scopus – 11.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 330 сторінок друкованого тексту, із них 14 сторінок вступу, 238 сторінок основного тексту, 120 рисунків, 31 таблиця, список використаних джерел зі 198 найменувань, 4 додатки на 22 сторінках. Додатки містять обрані початкові коди розробленого програмного забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список праць автора.

РОЗДІЛ 1

Аналіз стану та тенденцій розвитку розподілених інфокомунікаційних систем

1.1. Аналіз процесів конвергенції телекомунікаційних та інформаційних мереж

1.1.1. Глобальна інформаційна інфраструктура

Розвиток інформаційних та комунікаційних технологій започаткував нову еру, яка характеризується стрімкою інформатизацією суспільства зі створенням глобальної інформаційної інфраструктури (ГІІ, Global information infrastructure, GII). [1]

Головне завдання ГІІ – полегшення розробки, впровадження та сумісність існуючих і майбутніх телекомунікаційних та інформаційних послуг і прикладного програмного забезпечення в середині та між телекомунікаційними й інформаційними технологіями, а також забезпечення можливості доступу до інформаційних ресурсів усього населення планети з використанням провідних та безпроводних ліній зв'язку.

Ця інфраструктура складатиметься з різних механізмів розповсюдження найрізноманітнішої інформації в поєднанні з можливостями безпечного обміну, використання та керування інформацією, роблячи можливим її отримання у будь-який час, у будь-якому місці, із забезпеченням захисту та конфіденційності, за прийнятною вартістю та якістю [2].

Процес конвергенції, який відбувається у сфері інформатизації та телекомунікацій, зумовив появу терміну «інфокомунікації». Поняття інфокомунікацій містить у собі такі основні елементи, як: мережу, мережеві технології, послуги, технології створення послуг. Конвергенція спричинила утворення поняття «контенту» та появу нової індустрії інформаційного наповнення мережі (виробники та дистриб'ютори контенту, контент-провайдери та контент-агрегатори) [3-5].

З точки зору суб'єктів цієї індустрії контент – це все, що можна продати/віддати абоненту (відео- та аудіоматеріали, потокове мовлення, картинки, ігри та ін.). І ці суб'єкти претендують на отримання частини оплачених абонентами коштів інтернет-провайдеру, оскільки абонент не хоче платити лише за доступ до мережі, а, власне, цей доступ необхідний, в першу чергу, для отримання контенту. З іншої точки зору, інтернет-провайдер, забезпечуючи доступ своїм абонентам до контенту, може вимагати частину доходу контент-провайдера. Крім цього, інтернет-провайдери можуть намагатись створювати контент самостійно. Цю тенденцію можна було спостерігати, наприклад, в діях операторів мобільного зв'язку. Спочатку, вони співпрацювали з контент-провайдерами, а з часом почали створювати власний контент (рингтони, картинки, мобільні ігри, а також домовлялись з правовласниками про трансляцію телеканалів, аудіо та відеопродукції).

Усі ці складові формують нове середовище, на якому має базуватися ГП. У свою чергу, доступ до інформаційних ресурсів ГП здійснюється через споживання послуг зв'язку як традиційних, так і нового типу, які дістали назву інфокомунікаційних (мультисервісних) послуг. Прикладом останніх можуть бути: відеоконференції, е-навчання, е-комерція, е-уряд та ін. [6]

Очевидно, що основою для побудови високоефективної інформаційної інфраструктури будуть наявні телекомунікаційні системи, тому створення відповідного телекомунікаційного середовища є важливою національною проблемою. Орієнтація України на створення інформаційного суспільства та інтеграцію до Європейського Союзу вимагає дотримання вимог ЄС до сфери інформаційної політики та інформаційної безпеки.

Після проведення Всесвітнього саміту з питань інформаційного суспільства, що проходив у два етапи в Женеві 10-12 грудня 2003р. [7] і в Тунісі 16-18 листопада 2005р. [8] та прийняття Конституції Інформаційного Суспільства («Декларація принципів» та «План Дій»), світове співтовариство визначило основні пріоритети у розбудові та шлях розвитку інформаційного

суспільства, які стали основою розвитку інформаційного суспільства багатьох країн, а передові країни світу вже змогли скористатися його перевагами.

Розвиток Національної інформаційної інфраструктури (НІІ, National information infrastructure, NII) є необхідною умовою інтеграції України у світовий інформаційний простір на рівноправній основі. Закон України «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007–2015 роки», серед основних стратегічних цілей розвитку інформаційного суспільства в країні визначає розвиток НІІ [9].

1.1.2. Особливості створення Національної інформаційної інфраструктури

Питання розвитку інформаційної інфраструктури у складі національної інноваційної системи України висвітлено в Концепції розвитку національної інноваційної системи (далі – Концепція), схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17.06.2009 р. № 680-р [10].

Основним технологічним завданням стратегії розвитку інформаційного суспільства є розбудова сучасної телекомунікаційної інфраструктури з метою створення високоефективного телекомунікаційного середовища та впровадження досягнень інформаційних технологій у сфері бізнесу, виробництва, науки та освіти, медицини, культури та ін. Враховуючи зростання обсягів різномірних потоків інформації та конвергенцію мереж в рамках створення та побудови НІІ, для формування інтегрованого інфокомунікаційного середовища необхідно передбачити [11]:

- збалансований розвиток усіх видів телекомунікацій з пріоритетним використанням цифрових технологій;
- надання переваги телекомунікаційному забезпеченню національних, галузевих і регіональних інфополісів та їх об'єднанню міжрегіональними каналами зв'язку;
- створення телекомунікаційних систем підтримки інформаційної взаємодії особи з державними та громадськими структурами всіх рівнів;

- розвиток українських пошукових систем і засобів навігації в глобальній мережі Інтернет.

НІІ має забезпечувати взаємоз'єднання та взаємодію всіх інформаційних та телекомунікаційних мереж різних форм власності, як фіксованих, так і мобільних. З іншого боку, телекомунікаційна система як системоутворююча основа Національної інформаційної інфраструктури, повинна інтегрувати у своєму складі інтерактивні, телерадіомовні, мультимедійні та інші системи і механізми передавання, а також можливості забезпечення управління, безпеки, сигналізації, синхронізації, взаємодії інформаційних застосувань, платформ оброблення та збереження інформації і надання користувачам усіх потрібних їм високоякісних послуг у будь-який час і в будь-якому місці за прийнятними цінами.

Шляхи й особливості створення НІІ в різних аспектах висвітлено в низці ключових Законів України, Указів Президента України, розпоряджень Кабінету Міністрів України та Постанов Верховної Ради України.

Загальнодоступна НІІ України формується шляхом:

- розвитку національної, галузевих і регіональних інформаційних систем, мереж та електронних ресурсів, інформаційно-аналітичних систем органів державної влади й органів місцевого самоврядування;
- створення вітчизняними виробниками, на підставі фундаментальних і прикладних досліджень, новітніх конкурентоспроможних ІКТ, засобів інформатизації та комп'ютерних програм, зокрема з відкритими кодами;
- прискорення робіт, пов'язаних із розробкою, створенням і застосуванням суперкомп'ютерних систем;
- активізації впровадження систем електронних розрахунків за придбані товари, виконані роботи та надані послуги;
- створення в електронній формі архівних, бібліотечних, музейних фондів та інших фондів закладів культури, формування відповідних інформаційно-бібліотечних та інформаційно-пошукових систем з історії, культури, народної творчості, сучасного мистецтва України тощо;

- виконання зобов'язань щодо міжнародного співробітництва, спрямованого на розвиток інформаційної інфраструктури та забезпечення розширення участі України у відповідних міжнародних ініціативах.

Відповідно до законодавства України визначено такі терміни:

- Інформаційна інфраструктура – це сукупність взаємодіючих систем виробництва, накопичення, збереження і розвитку інформаційних продуктів та їх доставки, виробництва інформаційних технологій, сервісного обслуговування елементів інфраструктури і системи підготовки кадрів. Інформаційна інфраструктура України складається з організаційних структур, які забезпечують формування, функціонування й розвиток інформаційного простору, а також збирання, оброблення, зберігання, поширення й ефективного використання інформаційних ресурсів. Інформаційно-телекомунікаційні структури й інформаційні технології виконують обслуговуючу (науково-методичне, інформаційне, матеріально-технічне, кадрове, фінансове забезпечення) функцію щодо діяльності цих елементів.
- Національний інформаційний простір України – сукупність національних інформаційних ресурсів та інформаційної інфраструктури, які дозволяють, на підставі єдиних принципів і загальних правил, забезпечувати інформаційну взаємодію громадян, суспільства, держави з їх рівним правом доступу до відкритих інформаційних ресурсів і максимально повним задоволенням інформаційних потреб суб'єктів держави на всій її території, з дотриманням балансу інтересів на входження у світовий інформаційний простір і забезпечення інформаційної безпеки відповідно до Конституції України та міжнародних правових норм.
- Національні інформаційні ресурси – уся інформація, що належить Україні, включаючи окремі документи і масиви документів, незалежно від змісту, форми, часу і місця їх створення, форми власності, а також кінцеві результати інтелектуальної, творчої діяльності, зафіксовані на

будь-яких носіях інформації, доступні для використання особою, суспільством і державою через засоби масової інформації та телекомунікації, архіви, бібліотеки, музеї, фонди, банки даних, публічні виступи, художньо-виконавську діяльність тощо.

- Інформаційна система – організаційно-впорядкована сукупність інформаційних ресурсів та інформаційних технологій і засобів забезпечення інформаційних процесів; загальна структура і мережа інформаційних систем у їх взаємодії в національному просторі України;
- Інформаційно-телекомунікаційні структури – це територіально розподілені державні й корпоративні комп'ютерні мережі, телекомунікаційні мережі й системи спеціального призначення і загального користування, мережі й канали передавання даних, засоби комутації та управління інформаційними потоками.
- Інформаційні послуги – інформаційна або інформаційно-посередницька діяльність, спрямована на задоволення замовних запитів і потреб користувачів інформаційної продукції.
- Інформаційні процеси – здійснення створення, пошуку, збирання, обробки, накопичення, виробництва, зберігання, захисту, передавання, поширення та споживання інформаційної продукції.
- Інформаційні технології – організована сукупність систем, засобів, методів і способів, яка на базі інформаційної інфраструктури забезпечує процеси обробки, зберігання, розвитку, поширення, використання та захисту інформаційних ресурсів.

Загалом інформаційна інфраструктура являє собою сукупність (рис. 1.1): електронних інформаційних ресурсів (ЕІР); автоматизованих інформаційних систем (АІС), як засобів збору, виробництва, накопичення, обробки, збереження та розповсюдження інформації; засобів доставки ЕІР до користувачів і забезпечення інформаційного обміну (лінії та засоби зв'язку, мережі телекомунікацій); відповідних інституційних складових (обчислювальні центри, інформаційні агенції, оператори та провайдери тощо); системи

забезпечення інформаційної інфраструктури, що включає засоби нормативно-правового, економічного забезпечення, стандарти, інструктивні матеріали та документацію; системи підготовки кадрів і людини, як активного фактору впливу на інформаційний простір [12].



Рис. 1.1. Структурна схема НІІ.

1.2. Принципи передавання інформації в розподілених інфокомунікаційних мережах

1.2.1. Еталонна мережева модель інфокомунікаційних мереж

Еталонна модель взаємодії відкритих систем (Open System Interconnection, OSI), або модель OSI – є найвідомішою моделлю міжмережевої взаємодії та використовується для проектування мереж передавання даних, визначення умов експлуатації, а також пошуку та усунення несправностей. Еталонна модель описує, як інформація переноситься через середовище, для чого мережа розбивається по горизонталі на сім рівнів, кожен з яких має виконати

заздалегідь заданий, набір функцій. Варто зазначити, що більша частина рівнів реалізується програмно[13].

Основним об'єктом Еталонної моделі є Рівень, що включає в себе сукупність функцій для розв'язання низки завдань (рис. 1.3). Кожен з рівнів взаємодіє з вище- і нижчерозташованим рівнем однієї системи відповідно до принципу автономності, який полягає у тому, що зміна або модифікація одного рівня не повинна приводити до зміни інших рівнів. Виконання цього принципу реалізується через єдину точку взаємодії Рівня.

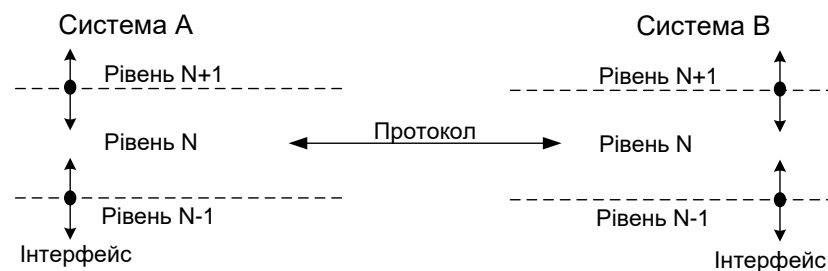


Рис. 1.2. Модель Рівня.

Взаємодія між системами здійснюється за допомогою протоколу й інтерфейсу.

Розглядаючи еталонну модель через кілька десятиків років, її можливості, застосування, нові вимоги й час, що виникли тепер, варто виділити дві проблеми.

По-перше, на транспортному та каналному рівнях реалізуються два незалежні механізми переносу інформації. По-друге, еталонна модель визначає певний протокол для взаємодії рівних рівнів, а для ідентифікації об'єктів вводиться нумерація. Тому в еталонній моделі виникло три системи нумерації:

- 1) номер протоколу (порту), що визначає тип вмісту, який передається;
- 2) номер мережевого об'єкту;
- 3) номер фізичної точки пункту-прийому.

Необхідність ідентифікувати тип вмісту виникла внаслідок об'єднання інформаційних потоків різних послуг у загальний потік гетерогенного трафіку. У ситуації, коли вузькоспеціалізована мережа передавала інформаційний потік тільки одного типу, даної проблеми не існувало. Однак процес конвергенції, в

основі якого лежить прагнення зменшити витрати на підтримку мережевої інфраструктури за рахунок об'єднання різних потоків інформації в загальний цифровий потік, вимагає введення кодів ідентифікації вмісту.

Таким чином, основні проблеми еталонної моделі пов'язані з неможливістю забезпечити якість обслуговування трафіку [14] й підтримувати відповідність між мережевим об'єктом і його номером (адресою), що в свою чергу привело до необхідності «оптимізувати» еталонну модель.

Оптимізація спрямована на об'єднання транспортного й каналного рівнів, а також зменшення числа рівнів, де здійснюється адресація об'єктів.

Оскільки іншої еталонної моделі все-таки не може бути, то надалі під «оптимальним» еталоном слід розуміти Мережеву модель інфокомунікацій (Network Model Infocommunications), зображену на рис. 1.3.

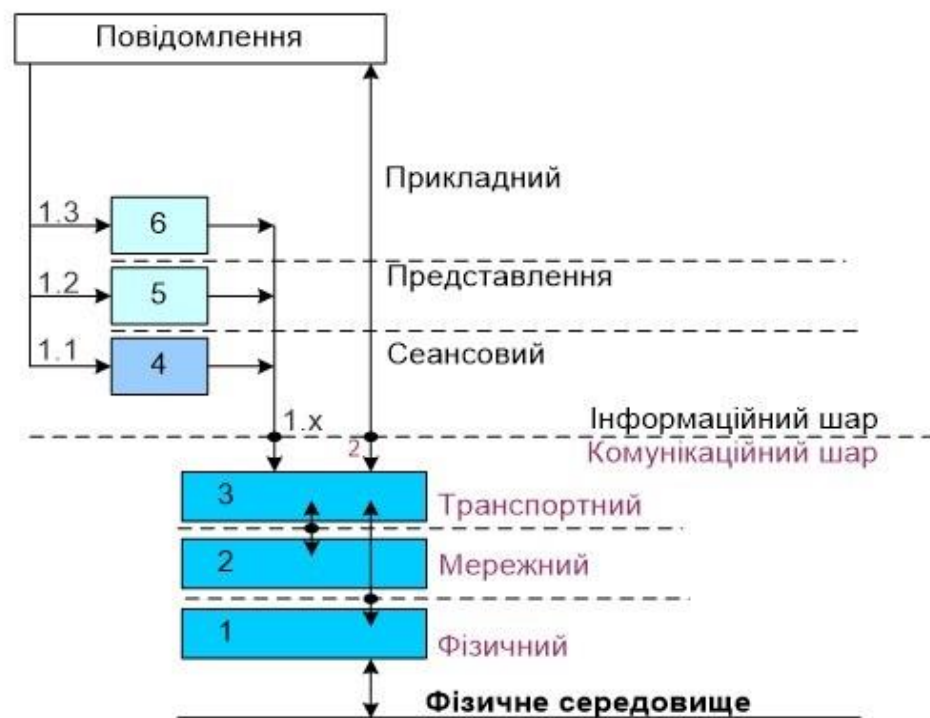


Рис. 1.3. Еталонна модель інфокомунікацій [15].

Мережева модель інфокомунікацій складається із двох шарів – інформаційного й комунаційного, які містять по три рівні й по одному інтерфейсу, кожен з яких виконує певні завдання.

Таким чином, поділ мережевої моделі інфокомунікацій на два шари зменшує кількість керуючих заголовків і збільшує пропускну здатність мережі. Підтримка відповідності між номером (адресою) і мережевим об'єктом дозволяє здійснити достовірну тарифікацію трафіку й виконати контроль цифрових прав при передаванні інформації.

1.2.2. Особливості моделювання розподілених інфокомунікаційних мереж

Побудову інфокомунікаційної мережі відповідно до мережевої моделі показано на рис. 1.4

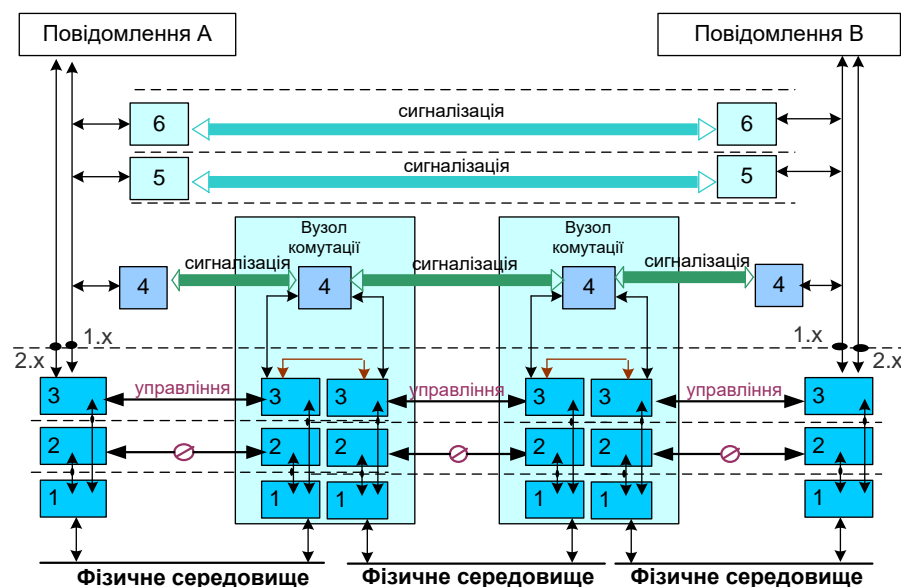


Рис. 1.4. Модель побудови інфокомунікаційної мережі [15].

Слід зазначити, що передавання усіх інформаційних потоків у рамках мережевої інфраструктури очікує від протоколу маршрутизації високої стійкості, безпеки й сумісності. Завдання стійкості вирішується виключенням службових потоків, які пов'язані з періодичним відновленням маршрутних таблиць, внаслідок чого організувати зовнішній дестабілізуючий вплив на протокол маршрутизації й таблиці маршрутів принципово неможливо.

Після встановлення маршруту передавання кожний вузол на мережі автономно виділяє інформаційному потоку необхідну швидкість передавання, з гарантованою затримкою й нормованою флуктуацією затримки. Зокрема кожний інформаційний потік отримує індивідуальне обслуговування від однієї

або сукупності мережевих інфраструктур. Оскільки всі вузли працюють автономно, то відпадає необхідність і в протоколах сигналізації для обслуговування трафіку. А відсутність сигналізації, при обслуговуванні трафіку й встановленні маршруту передавання, істотно спрощує стек протоколів мережевої моделі й створює можливість реалізувати до 96 % функцій комунікаційного шару на апаратних засобах.

Встановивши з'єднання, мережеві повідомлення виконують передавання інформаційного потоку. Після закінчення передавання інформаційного потоку мережеві повідомлення ініціюють процес завершення з'єднання.

1.3. Властивості та класифікація інфокомунікаційних послуг

Відповідно до принципів побудови ГП, вимоги до властивостей (attributes), які вона повинна мати, уже відомі [16]. Оскільки послуги займають певне місце в архітектурі ГП, можна провести адаптацію властивостей мережевої інфраструктури до інфокомунікаційних послуг. Загалом їх можна поділити на дві групи: основні та додаткові.

До основних властивостей інфокомунікаційних послуг відносять (рис.1.5):



Рис. 1.5. Основні властивості інфокомунікаційних послуг.

- мобільність (mobility) – отримання послуги користувачем у будь-

якому місці, зокрема й під час його руху, а також безперервність його обслуговування в будь-якому місці та в будь-який час;

- якість (quality of service) – забезпечення користувача гарантованою якістю обслуговування;
- надійність (reliability) – ймовірність того, що послуга функціонуватиме належним чином протягом визначеного часу;
- продуктивність (performance) – наявність таких параметрів, як: тривалість доступу до послуги, пропускна здатність каналів, кількість оброблень запитів (транзакцій) за секунду тощо;
- безпека (security) – захист інформаційних, програмних та апаратних ресурсів, які підтримують роботу послуги, від випадкових чи зловмисних дій, що призводять до несанкціонованого доступу до ресурсів;
- керованість (manageability) – можливість контролювати використання ресурсів постачальниками послуг, операторами чи користувачами.

Додаткові властивості інфокомунікаційних послуг (рис 1.6):



Рис. 1.6. Додаткові властивості інфокомунікаційних послуг.

- масштабованість (scalability) та переносимість (portability) – можливість перенесення послуги на іншу платформу, з однієї системи в іншу і нормальне функціонування у великому інтервалі змін параметрів, що характеризують платформи чи системи;
- доступність (availability) та корисність (usability) – міра можливого використання послуги;
- мінімальність вимог (minimality), необхідних для функціонування послуги;
- можливість взаємодії (interoperability) – здатність вузлів служб обмінюватись інформацією стосовно послуг та спільно її використовувати;
- прийнятність вартості послуги (affordability);
- підтримка національних особливостей та елементів (cultural elements), наприклад алфавітів, адрес, телефонних номерів тощо.

Основні відмінності інфокомунікаційних послуг від традиційних полягають у такому (рис 1.7):



Рис. 1.7. Основні відмінності інфокомунікаційних послуг.

- здебільшого інфокомунікаційні послуги є мультимедійними;
- інфокомунікаційні послуги є широкосмуговими послугами, які

характеризуються, переважно, несиметричним потоком інформації від користувача до вузла, за допомогою якого надається послуга;

- кожна реалізація інфокомунікаційних послуг передбачає наявність специфічних протоколів рівнів надання послуг моделі OSI та їх різноманітність, а також наявність протоколів управління послугами;
- для ідентифікації споживачів інфокомунікаційних послуг може використовуватися додаткова адресація;
- послуги нового типу передбачають клієнт-серверну підтримку їх роботи (клієнтська частина підтримується програмно-апаратною платформою користувача, а серверна – платформою постачальника послуги).

Більшість інфокомунікаційних послуг мають одну важливу відмінність від традиційних послуг, оскільки є послугами інформаційного змісту, тобто інформація (дані, що містять послуги), може бути перетворена і збережена для подальшого використання та надання користувачам у будь-якому масштабі часу, зокрема реальному.

Внаслідок появи нових технологій та рішень і безперервного розширення номенклатури інфокомунікаційних послуг, питання їх класифікації є доволі не тривіальним завданням. Адже термін «інфокомунікаційна послуга» означає не просто поєднання термінів «телекомунікаційна послуга» та «інформаційна послуга», а ідентифікує продукт з істотно новими телекомунікаційними та інформаційними властивостями. Інфокомунікаційна послуга – це продукт діяльності для передавання, прийому, зберігання, пошуку та обробки інформаційних повідомлень. Відповідно, інфокомунікаційна послуга може характеризуватися видом (видами) інформації, формою повідомлень або режимом поводження з ними.

Найбільш істотними є такі класифікаційні ознаки інфокомунікаційних послуг [17]:

1. За належністю до відповідної галузі:
 - телекомунікаційні послуги (послуги електров'язку), орієнтовані

здебільшого на традиційні види електрозв'язку;

- інформаційні послуги, орієнтовані переважно на процеси обробки, зберігання та пошуку інформації.
2. За застосуванням кінцевих пристроїв користувачів:
 - послуги перенесення (bearer service) (без функцій кінцевих пристроїв користувачів);
 - послуги надання зв'язку або телепослуг (teleservice) (з функціями кінцевих пристроїв користувачів).
 3. За місцем розташування кінцевого пристрою і методу обслуговування користувачів:
 - абонентські послуги, які користувачі отримують за допомогою кінцевих пристроїв, розташованих у приміщеннях абонентів мережі;
 - клієнтські послуги, які користувачі отримують за допомогою кінцевих пристроїв, розташованих у пунктах колективного користування (відділенні зв'язку, переговорному пункті, Інтернет-кафе і т.п.).
 4. За спрямованістю зв'язку:
 - односпрямовані послуги (з одностороннім надсиланням повідомлень);
 - двонаправлені, або інтерактивні послуги (з двостороннім надсиланням повідомлень), які, до речі, поділяються на асиметричні (послуги, в яких швидкості передавання даних у двох напрямках передавання не однакові) та симетричні (послуги, в яких швидкості передавання даних у двох напрямках передавання однакові). Двонаправлені (інтерактивні) послуги поділяються також за ознакою допустимості діалогового зв'язку на діалогові послуги (без проміжного нагромадження в мережі та забезпечують можливість діалогу в реальному масштабі часу) та недіалогові послуги (з проміжним нагромадженням в мережі).
 5. З появою спеціалізованих мережевих засобів («мережевих

серверів»), що дозволяють у мережах надавати нові послуги або послуги з покращеними характеристиками, усі послуги можна розділити на дві категорії:

- прості послуги на базі можливостей традиційних мереж зв'язку;
 - розширені послуги (enhanced services) із покращеними характеристиками (або якісно нові) на основі спеціалізованих мережевих серверів (електронна пошта, мобільний зв'язок, послуги інтелектуальної мережі та ін.).
6. За можливістю обслуговування абонентів мереж мобільного зв'язку є послуги:
- фіксованого (стаціонарного) зв'язку;
 - рухомого (мобільного) зв'язку, зокрема послуги, пов'язані з визначенням місця розташування користувача.
7. За видом повідомлень, що передаються:
- мономедійні послуги – для передавання інформації одного виду (телефонна послуга, факсимільна послуга та ін.);
 - мультимедійні послуги – для передавання інформації двох або більше видів (прикладом мультимедійних послуг є відеотелефон, аудіо-, відеоконференція, послуги передавання аудіо/відео).
8. За доступністю для користувачів є послуги:
- загального користування;
 - обмеженого користування.
9. За важливістю для користувачів:
- основні послуги (надаються при кожному зверненні користувача до постачальника послуги);
 - додаткові (факультативні) послуги (надаються додатково до основної послуги за спеціальним запитом з боку користувача. Додаткова послуга не може бути надана без користування основною послугою. Додаткова послуга змінює або доповнює основну. Прикладами додаткових послуг є перенаправлення викликів, закрита

група абонентів, ідентифікація абонента та ін.

10. За оплатою:

- платні послуги;
- безкоштовні послуги.

1.4. Визначення вимог до управління трафіком в сучасних інформаційно-телекомунікаційних мережах та системах.

1.4.1. Механізми забезпечення якості передавання відеотрафіку в мультисервісних мережах.

Аналіз статистики агрегованого трафіку телекомунікаційних мереж показує значний вміст аудіо- та відеоінформації [18]. Це пояснюється тим, що оператори зв'язку, оператори кабельного телебачення та Інтернет сервіс-провайдери (Internet service provider, ISP), які раніше працювали у вузьких сегментах ринку послуг (зв'язку, телебачення, доступу до Інтернет), значно розширили набір послуг.

Найбільш перспективними послугами в широкосмугових мережах є надання цифрового телебачення (Internet Protocol television, IPTV) та «відео на замовлення» (Video on Demand, VoD) в реальному часі, що в свою чергу, дасть змогу зберегти конкурентоздатність на ринку та задовольнити зростаючий попит споживачів, а також збільшити доходи. Зростання обсягів трафіку та вимог до гарантування якості його передавання спричиняє зростання вимог до інформаційних мереж, які повинні вирішувати проблему високоякісного передавання інформації, витримуючи пікові навантаження, максимально ефективно використовуючи наявні мережеві ресурси. Конвергентна мережева інфраструктура повинна бути придатною для передавання значних потоків відео- та аудіоінформації, даних та службової інформації. Загалом ускладнюється архітектура IP-мереж, вони стають мультисервісними мережами, розробляються нові алгоритми, протоколи і технології, які в значній мірі покращують якість передавання мультимедійного трафіку, особливо трафіку реального часу.

При передаванні відео в мережі виникають три основні проблеми:

- низька пропускна здатність мережі;
- втрата пакетів;
- джитер (коливання затримки передавання пакетів).

Для забезпечення необхідної якості передавання зростаючих обсягів мультимедійної інформації, потрібно забезпечити необхідні пропускні здатності каналів передавання. І, якщо потреба в ширині смуги каналу передавання для надання послуг цифрового телевізійного мовлення не має прямої залежності від кількості споживачів послуги, оскільки передавання відбувається з використанням багатоадресного режиму передавання (multicast), то послуги на замовлення носять індивідуальний характер, використовуючи одноадресну передачу (unicast), і потреба в пропускній здатності різко зростає із збільшенням кількості споживачів зазначених вище послуг [19].

Передавання відеоінформації відіграє важливу роль в роботі мультисервісних мереж, які повинні забезпечувати надання послуг з заданим рівнем доступності та надійності, використовуючи перевірені та надійні технології одно- та багатоадресної передачі. Надання послуг «відео на замовлення» характеризується передаванням великої кількості відеофайлів, що супроводжується різкими змінами швидкості передавання, та може викликати небажані втрати. Оскільки відеосигнал передається в дуже стисненому вигляді з використанням кодування mpeg-2 та mpeg-4, втрата навіть поодиноких IP пакетів може викликати значне погіршення відеозображення.

Відеоінформація у вигляді файлів mpeg-формату знаходиться на відеосервері і передається з використанням протоколу RTP або UDP на транспортному рівні та відповідно IP протоколу на мережевому.

Mpeg потік складається з послідовності GOP – Group of Pictures – групи кадрів трьох типів: I-кадри (intra frames), P- кадри (predictive frames) та B- кадри (bidirectional) (рис.1.8). Кожен GOP починається з I-кадру, зображення в якому стиснено, як звичайна картинка, без врахування відеоінформації в сусідніх

кадрах. Решта кадрів GOP (P та B кадри) використовують інформацію попередніх I чи P кадрів.

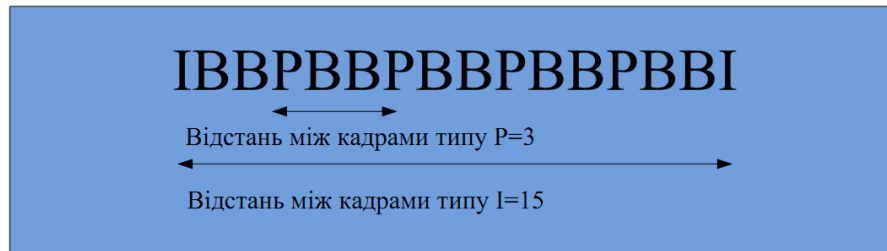


Рис. 1.8. Група зображень (GOP) в потоковому відео стандарті MPEG.

Кодування відеопотоку дозволяє значно зменшити вимоги до пропускну́ї здатності, забезпечуючи можливість передавання відео в існуючих мережах. Проте, залежність P і B кадрів від I-кадру вимагає забезпечення високої надійності передавання, оскільки втрата ключового кадру призводить до різкого погіршення відеозображення. Втрата єдиного пакету, що містить кадр типу I в складі групи зображень одинарного потоку, може призвести до значного погіршення враження від перегляду (рис. 1.9).

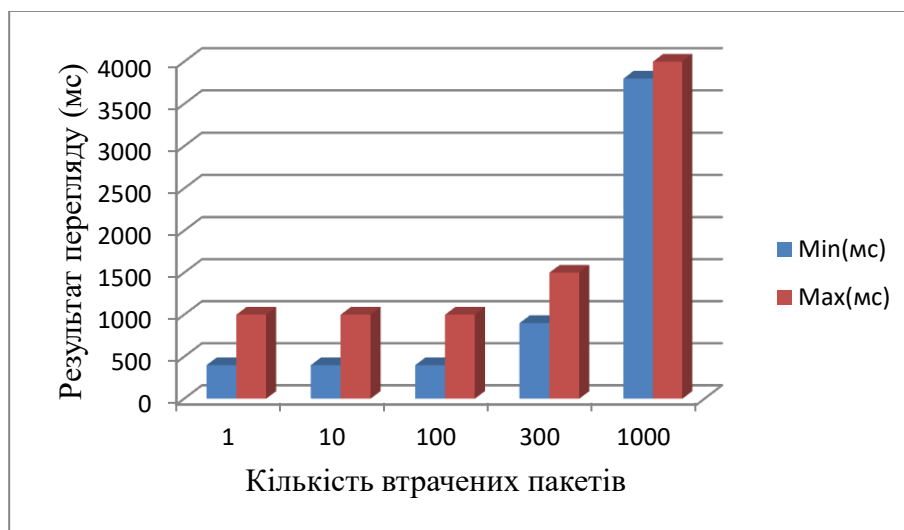


Рис. 1.9. Вплив втрати пакету на результати перегляду для потоку MPEG.

Згідно галузевих норм, якість сприйняття відео зображення є прийнятною, якщо протягом перегляду двогодинної відеопередачі відбувається не більше одного видимого погіршення зображення. Відповідне значення параметра якості обслуговування (QoS) допускає рівень втрат не гірше $P=10^{-6}$.

Виконати ці вимоги можна за допомогою кількох методів:

1. Збільшення пропускної здатності мережі за рахунок модернізації мережевого обладнання та збільшення пропускних здатностей каналів передавання.
2. Забезпечення необхідної QoS за рахунок підтримки необхідних параметрів мережі за допомогою пріоритезації трафіку, алгоритмів керування чергами, запобігання перевантаженням, оптимізації алгоритмів маршрутизації.
3. За рахунок використання систем, які б забезпечували прийнятну якість сервісу, та були б мінімально залежні від параметрів мережі. Такий підхід можна забезпечити вдосконаленням методів управління і передавання незалежно від характеру відеоінформації, або використанням методів стиску, які враховують семантику зображень.

Методологія забезпечення якості послуг Diffserv передбачає використання методів розподілу трафіку за категоріями і пріоритетами, завдяки чому трафік з високим пріоритетом отримує необхідні мережеві ресурси та може використовуватися для забезпечення заданої якості передавання відеотрафіку послуги «відео на замовлення». DiffServ забезпечує простий, але недостатньо точний, метод структурування трафіку за класами сервісу CoS з відповідними пріоритетами [20]. Він використовує поле типу сервісу в заголовку IP-паketу для визначення алгоритму його транспортування від вузла до вузла мережі. Такий підхід, на відміну від IntServ, не вимагає витрат часу на попереднє визначення параметрів транспортування трафіку по маршруту проходження інформаційного потоку [21].

Керування параметрами мережі може здійснюватись шляхом регулювання швидкості на рівні передавання відеотрафіку, адаптивним кодуванням відеоінформації, характеристики якого визначаються швидкістю передавання за допомогою спеціальних методів стиску, та прискоренням передавання на коротких відрізках за рахунок збільшення стиску, використовуючи управління передаванням та стиском.

Транспортний протокол RTP (Real-Time Transport Protocol), що забезпечує передавання даних між кінцевими вузлами мережі, не має ніяких додаткових функцій із забезпечення якості обслуговування, працює поверх протоколу IP і є альтернативою протоколу TCP (Transmission Control Protocol). Протокол RTP володіє засобами виявлення втрат даних, забезпечує ідентифікацію типу та номеру пакету і зменшує затримки передавання до прийняттого рівня для передавання відео потоків реального часу.

Протокол UDP (User Datagram Protocol) використовується в мережах з негарантованою смугою пропускання з метою мінімізації затримок передавання та максимального використання наявної пропускну здатності [22]. Саме цей протокол реалізує, згаданий вище, режим багатоадресної передачі. Застосування UDP для потокового мультимедійного трафіку, в першу чергу, пов'язане з тим, що реакція цих застосувань на роботу функції «управління перевантаженнями» може бути неадекватна і призведе до істотного погіршення якості надання послуги. Застосування UDP не накладає обмежень на застосування протоколів гарантованої доставки даних на прикладному рівні.

Методи керування для запобігання перевищення пропускну здатності мережі при передаванні відеотрафіку можуть реалізовуватись шляхом керування часовим вікном [23] (наприклад, при використанні протоколу TCP, що в свою чергу може викликати затримки передавання через повторне передавання втрачених пакетів [24]) та безпосереднім керуванням швидкістю передавання [25]. В цьому випадку використовується інформація про наявну смугу пропускання і відповідно до неї встановлюється швидкість передавання. Точне визначення ширини смуги пропускання запобігає виникненню перевантажень і втрат пакетів та забезпечує можливість передавання відеотрафіку реального часу.

Методи керування швидкістю передавання поділяються на: методи управління характеристиками джерела інформації (погоджується вихідний відеопотік з наявною смугою пропускання), методи управління характеристиками приймача інформації (регулюється швидкість прийому

відеоінформації шляхом додавання/відключення каналів передавання), та методи комбінованого керування.

Методи керування характеристиками джерела інформації можуть використовуватись при одно- та багатоадресній передачі. Для одноадресного режиму встановлюється така швидкість передавання, яка дозволяє досягнути заданого значення показника втрат пакетів.

При кодуванні відеоінформації потрібно забезпечувати високу якість візуального сприйняття відеоінформації при заданій швидкості передавання, яка в свою чергу може бути сталою, або динамічно змінюватись, залежно від пропускної здатності мережі. Реалізація адаптивного кодування здійснюється шляхом зміни параметра дискретизації відеосигналів, або зміни швидкості передавання відеокадрів. Вирішення проблеми забезпечення необхідної якості передавання можливе з використанням математичних методів оптимізації [26]. Важливим є визначення кількісного критерію якості при заданій швидкості передавання відеотрафіку. Залежність рівня спотворень від швидкості передавання може бути отримана за допомогою моделювання з врахуванням статистичних характеристик відеопотоку для визначених параметрів дискретизації відеоданих.

Розглянемо методи корекції помилок, що виникають в каналах передавання та приводять до спотворення відеоінформації. Для деяких типів критичними є втрати пакетів, хоча допускаються певні затримки, для інших – навпаки. Передавання відеоінформації в реальному часі потребує використання спеціальних методів контролю помилок передавання. Серед них: повторна передача, коректування кодування, видозміна та маскування помилок.

Недоліком повторної передачі є збільшення часу передавання інформації. Керування повторною передачею передбачає відміну повторної передачі пакетів, що не можуть бути відображені протягом наявного інтервалу часу і може здійснюватись як на приймальній, так і на передавальній стороні [27].

Використання коректуючого кодування базується на додаванні додаткової інформації до стисненого відеопотоку, що дозволяє відтворити втрачені пакети.

Це можуть бути методи каналного кодування (надлишковість блочними кодами вводиться незалежно від виду інформації) та методи кодування джерела відеоінформації (кодування шляхом додавання відеоданих з вищим ступенем стиску). В другому випадку зменшуються затримки передавання і при втраті пакетів відбувається відновлення відеоінформації з певною допустимою втратою якості.

Зниження помітності помилок передавання відеоінформації є найефективнішим на етапі стиску інформації та дозволяє запобігти поширенню помилок та обмежити спотворення відеоінформації внаслідок втрати пакетів за рахунок багаторівневої структури представлення відеоінформації з різним ступенем стиску на кожному рівні. Це забезпечує відновлення відео зображення прийнятної якості при втратах частини інформації окремого рівня.

1.4.2. Критерії оцінки якості сприйняття послуг.

Мережі нового покоління NGN (Next Generation Network) [28] використовують стандартну мережеву інфраструктуру IP-мережі з пакетною передачею даних, забезпечуючи можливість надання всієї гами існуючих послуг: передавання даних, голосу і відео. Мережі NGN реалізують принцип конвергенції послуг, гарантуючи при цьому масштабованість, гнучкість та можливість реагувати на зростаючі потреби функціональності і пропускну здатності. Окрім цього, здатність надавати велику кількість послуг користувачу, використовуючи при цьому єдину транспортну IP-мережу, значно підвищує коефіцієнт ARPU (Average revenue per user – середнє значення прибутку від одного окремого абонента), що призвело до швидкого впровадження концепцій NGN провайдерами послуг. Перша послуга, яку можна вважати концептуальною для NGN, це концепція Triple Play. В основі концепції Triple Play була покладена ідея, що всі сучасні послуги зв'язку можна представити у вигляді об'єднання мови, даних і відео [29]. Тріада цих послуг створить свого роду базис, за яким можна розкласти будь-яку сучасну послугу. Перехід від вертикальної до горизонтальної моделі організації й об'єднання

різних послуг на рівні транспорту й доступу це істотний крок на шляху до конвергенції мережі. В концепції Triple Play уперше була запропонована процедура декомпозиції/композиції послуг. Відповідно до цієї концепції запропоновано використовувати тріаду як набір базових послуг. Послуга IPTV з тріади найбільш перспективна для впровадження і найбільш критична, як до завантаження транспортної мережі, так і до технологій, за якими реалізовується. Важливим питанням є оцінка достатньої якості, з якою послуга буде надана кінцевому користувачу, а також формування методів проектування та управління якістю.

Для розв'язання завдань доставки цифрових відеопотоків та вимірювання показника якості надання сервісу (Quality of Service, QoS) і показника сприйняття послуги (Quality of Experience, QoE) необхідно сформулювати підхід для оцінювання QoE та створити механізм керування QoE з кінця в кінець, тобто на всіх ланках проходження відеотрафіку від джерела до користувача.

Для оцінювання сприйняття якості IP телебачення користувачем використовується термін «IPTV QoE». Цей термін використовується для характеристики технічних аспектів, які впливають на задоволення користувача від послуги IP телебачення. До таких факторів можна віднести, для прикладу, реакцію системи на перемикання каналів або якість середовища передавання.

Особливістю оцінювання якості надання послуги IPTV в мультисервісних мережах є наявність в мережі ще й голосового та трафіку передавання даних, які поділяють ресурси мережі. Всі ці різновиди трафіку будуть боротися за ресурси, які б забезпечили необхідний рівень якості. Тобто, при дослідженні якості надання послуг IPTV в мультисервісних мережах, необхідно врахувати комбінацію всіх типів трафіку, присутнього в мережі і визначити, як тип трафіку впливає на якість послуг.

Виділяють такі критерії IPTV QoE [30]:

- вимірювання часу затримки при перемиканні каналів абонентом та контроль відповідності каналу, який запитував користувач;
- вимірювання параметрів якості середовища передавання;

- вимірювання пропускної здатності;
- перевірка відповідності інформації, що передається;
- еталонне тестування серверного обладнання;
- взаємні впливи при передаванні даних, голосу та відео в мультисервісній мережі.

Час затримки і надійність переключення каналів будується на основі експериментальних тестових мереж, де задіяне різнотипне вимірювальне обладнання, яке встановлене на стороні користувача на кінцевому абонентському обладнанні (set-top box, STB), або інтегровано у вигляді програмного забезпечення на робочій станції користувача. Час затримки, при переключенні каналів абонентом, менший секунди, вважається прийнятним.

Для дослідження якості надання відеослуг необхідно, попередньо, провести оцінку адекватності джерела відеосигналу. Якість відеосигналу може змінюватися, як правило, в напрямку погіршення при кожній маніпуляції з контентом: кодування/декодування, передавання через мережу.

Спрощена схема передавання відеоконтенту від джерела до користувача приведена на рис.1.10.



Рис. 1.10. Спрощена схема проходження відеотрафіку в мережі Інтернет.

Погіршення, пов'язані з кодуванням:

- програмна часова затримка;
- зменшення якості зображення;
- вихід з синхронізації відео/звук;
- кодування, стиснення;
- погіршення потоку.

Погіршення, пов'язані з передаванням через мережу:

- втрата пакетів, затримка, джитер;
- залежність від коливань пропускної здатності;
- розбиття зображення при втраті I/P/B фреймів;
- погіршення на термінальному обладнанні користувача (STB та ін.) при декодуванні відеосигналу.

Це все треба враховувати при формуванні підходів до оцінювання показника QoE, що включає етапи, наведені на рис. 1.11.

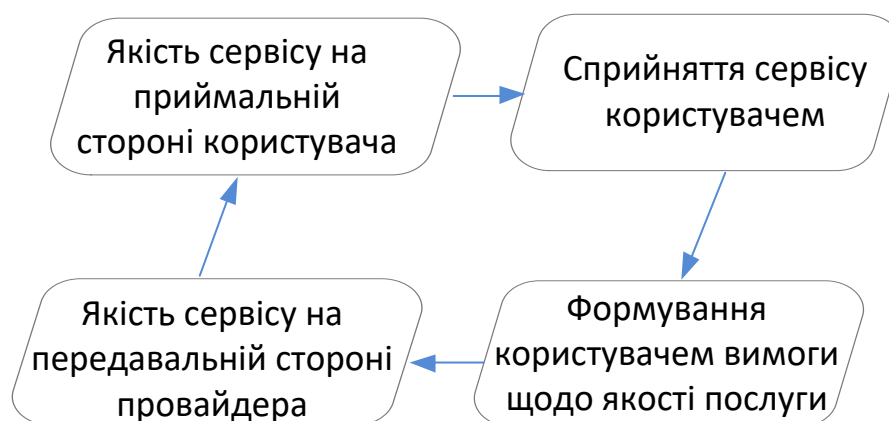


Рис. 1.11. Схема етапів оцінки QoE.

Загалом пропонуються такі підходи для оцінки QoE [31]:

1. Повнозв'язне рекомендоване наближення:
 - порівняння окремого відеокадру;
 - аналіз захопленого зображення;
 - висока деталізація та відповідність переданного кадру;
 - процедура вивірки, яка формує показник погіршення відеокадру після передавання його через мережу.

2. Інтуїтивна оцінка якості зображення експертом, коли проводиться спостереження в реальному часі, без застосування вимірювання якості та проведення вивірки.

Для реалізації першого підходу, в точках, позначених на рис. 1.10., необхідно провести зняття проб та наступний аналіз відповідно. В точці під номером:

1. Піксельний аналіз відеотрафіку на виході джерела: фіксація ефекту сповільненого показу, зупинки, шуму, зміни кольору, поява плям.
2. Поточковий аналіз відеотрафіку: фіксація погіршення якості відео, асоціація потоку з часовими мітками, які відповідають послідовності І-фреймів.
3. Аналіз після проходження через опорну ІР-мережу: аналіз QoS, та вплив його на часову синхронізацію за мітками.
4. Аналіз на стороні кінцевого користувача: аналіз QoS, та вплив його на часову синхронізацію за мітками.

Отже, можна вважати, що QoE – це показник оцінки якості сприйняття послуги на стороні користувача, який формується на основі того, як кінцевий користувач сприймає сервіс та його якість, дозволяє окреслити погіршення якості та ідентифікувати причини їх виникнення [32].

1.5. Проблеми розподілу ресурсів та завдання досліджень в розподілених інфокомунікаційних системах.

Аналіз, проведений вище, показав, що розвиток інфокомунікаційних мереж та підвищення вимог до забезпечення якості надання послуг вимагають розв'язання проблеми ефективного використання мережевих ресурсів. Це завдання може розв'язуватись шляхом оптимального управління трафіком (Traffic Engineering, TE), пропускнуою здатністю каналів передавання даних, буферним простором мережевих пристроїв [33], маршрутизацією.

Проте, статистичні моделі не дозволяють враховувати зміни стану мережі при передаванні мультимедійного трафіку, особливо це відчутно при

передаванні трафіку реального часу (управління технологічними процесами та обладнанням, VoIP-телефонія, відеоконференції та ін.), однією з характерних особливостей якого є чутливість до затримок. Для прикладу, затримка чи втрата пакету з мультимедійними даними реального часу відразу проявляється на стороні отримувача у вигляді погіршення звуку або зображення.

Навіть невеликі збої при передаванні пакетів можуть призвести до значного зниження якості. Для прикладу, при передаванні потоків телебачення високої роздільної здатності (High-definition television, HDTV) максимально допустимий рівень втрат пакетів, при передаванні мережею, становить 10^{-6} , а для потоків стандартного телебачення (Standard-definition television, SDTV) – не більше 10^{-5} .

Аналогічна ситуація і з механізмами керування мережевими ресурсами, які не враховують типів інформаційних потоків. З іншого боку, відсутність врахування зміни характеристик трафіку, завантаженості каналних і буферних ресурсів досить часто стає причиною прийняття необґрунтованих рішень при резервуванні мережесих ресурсів і обмеженні трафіку в мережах.

Використання систем управління на основі політик управління ресурсами (Policy-Based Management, PBM) [34] дозволяє покращити деякі параметри та досягнути вищого показника завантаженості мережі, але, при цьому, також не враховуються пріоритети інформаційних потоків [35].

Варто враховувати, що, в загальному випадку, телекомунікаційна система є динамічною та багатопараметричною, яка потребує різних, за ступенем складності та ефективності, стратегій управління. Тому, досягти необхідного рівня адекватності математичного опису таких мереж, для забезпечення оптимального управління її ресурсами, можливо лише в рамках динамічних моделей, в яких враховується зв'язок станів системи в часі [36].

Отже, необхідно розробити моделі та методи передавання контенту в інфокомунікаційних системах, які б забезпечували підвищення продуктивності інформаційних мереж та ефективності управління передаванням інформації.

Використання сучасних можливостей інформаційних технологій стає більш ефективним при оптимізації структури інформаційних мереж, окремих вузлів і їх взаємодії, за рахунок широкого використання методів управління параметрами мережі і режимів адаптації. Критичні характеристики розподіляються узгоджено в структурній частині, характеристиках апаратного та програмного забезпечення, що підвищує якість і надійність роботи, розширює функціональні можливості інфокомунікаційної системи та дозволяє досягти належних показників її функціонування. До основних показників належать (рис.1.12): продуктивність, надійність, безпека, керованість, якість обслуговування, сумісність, інтегрованість, масштабованість.

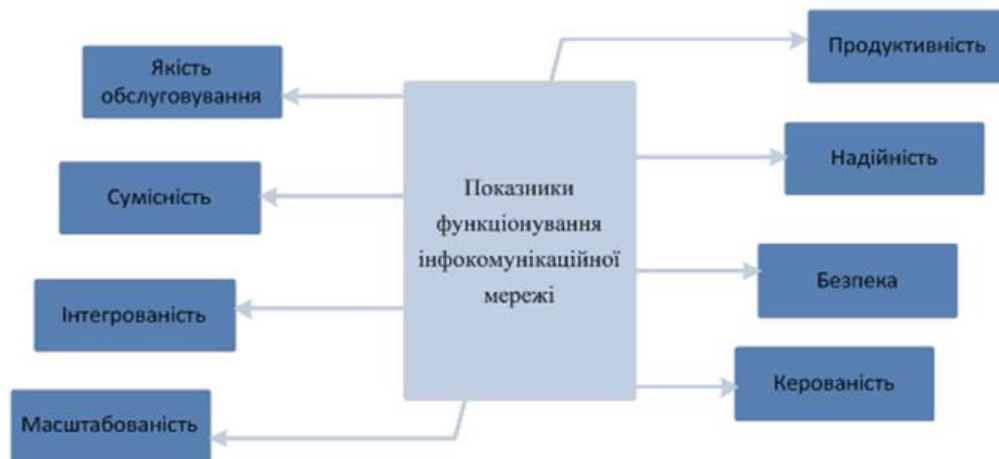


Рис. 1.12. Основні показники функціонування інфокомунікаційної мережі.

Оптимальний розподіл мережевих ресурсів в процесі експлуатації мережі дозволяє підвищити ефективність використання вже існуючого мережевого обладнання та ліній зв'язку. Управління інформаційними потоками найчастіше використовується для боротьби з перевантаженнями, при зростанні навантаження понад пропускну здатність мережі. Для управління мережевим трафіком потрібні механізми регулювання навантаження в лініях зв'язку та комутаційному обладнанні, механізми профілювання потоків на вході в мережу, механізми справедливого розподілу ресурсів для обслуговування різних потоків навантаження, засоби реалізації мережевих політик. Базовими елементами реалізації цих механізмів є алгоритми обслуговування черг пакетів та алгоритми управління середньою та піковою швидкістю передавання.

Дослідження трафіку мереж з комутацією пакетів, до яких належать мультисервісні мережі, показали, що трафік цих мереж володіє властивістю самоподібності. Самоподібність можна пояснити та підтвердити виходячи з принципів функціонування мережі, що призводить до нового розуміння як характеристик, що притаманні трафікові сучасних мереж, так і до нових підходів при вирішенні проблем, пов'язаних з організацією та управлінням мережевим трафіком, що в подальшому впливає на проектування та розробку мереж. При такому підході важливе значення мають статистичні методи та методики моделювання. З'ясувалося, що кожний вид трафіку, який функціонує в мережі, можна описати відповідним законом розподілу [37].

1.6. Висновки до 1-го розділу.

1. Питання розвитку Національної інформаційної інфраструктури для успішної інтеграції у світовий інформаційний простір має бути національним пріоритетом і вирішуватись шляхом створення високоефективного інфокомунікаційного середовища на основі існуючих та перспективних інформаційних та телекомунікаційних мереж різних форм власності та з використанням різних технологій для надання користувачам високоякісних послуг, з врахуванням постійного зростання обсягів різнорідних потоків інформації та конвергенції мереж. Різнорідний трафік передається через єдину телекомунікаційну мережу і повинен рівномірно розподілятися та оптимізуватися для максимального забезпечення якості та надійності передавання. Одна з основних переваг конвергентних мереж полягає в тому, що встановлювати і контролювати потрібно лише одну фізичну мережу.

2. Класифікації інфокомунікаційних послуг постійно уточнюються та розширюються. Наприклад, багато неінтерактивних послуг перетворюються на інтерактивні (передусім, це спостерігається в послугах телевізійного та звукового мовлення); паралельно розвиваються послуги «реального часу»; розширюється номенклатура основних інформаційних та додаткових послуг,

які не можуть надаватися окремо від основної послуги, але можуть змінюватись чи розширюватись паралельно з розширенням основних послуг.

3. Оптимальним рішенням, для передавання відеотрафіку реального часу із заданою якістю обслуговування, є використання каналів передавання з високою пропускнуою здатністю. Проте, існуючі IP мережі, як правило, не можуть забезпечити цю вимогу. Для вирішення цих проблем пропонується використання різних технологій та методів, серед яких керування параметрами мережі, управління стиском інформації та корекція помилок. Загалом, розвиток сучасних високих технологій дозволив реалізувати та оптимізувати різні методи і алгоритми перетворення та обробки зображень для якісної передачі відеотрафіку в мультисервісних мережах.

4. Якість сприйняття послуги встановлюється в індивідуальному порядку, тими користувачами, які сформували здатність оцінювати її, завдяки проведенню великої кількості часу, переглядаючи відеоматеріали. Ці дані дають можливість лише формувати поріг прийнятної якості перегляду відео зображень і мають мінімальну цінність для пошуку та усунення несправностей чи редагування конфігурацій мережевого обладнання, які б усунули причину досягнення недопустимого рівня QoE. Тому, виникає питання про впровадження моделей та систем адаптивного керування параметрами якості систем доставки відеоконтенту.

5. Загалом, зростання обсягів інформації та поява нових видів послуг спричиняють потребу у розробці нових методів оцінки характеристик трафіку і нових аналітичних та імітаційних моделей трафіку, характеристики яких максимально б відповідали характеристикам реальних мультисервісних мережевих потоків для дослідження та проектування інфокомунікаційних мереж з належною якістю обслуговування та ефективним використанням мережевих ресурсів.

РОЗДІЛ 2

Методи та моделі підвищення ефективності передавання інформації в розподілених інфокомунікаційних системах

2.1. Визначення основних характеристик ефективності та методів оцінки трафіку

Розвиток телекомунікаційних мереж відбувається у напрямку зростання ринку мультисервісних послуг, впровадження нових телекомунікаційних та інформаційних технологій, їх конвергенції. Впровадження нових послуг, як і підтримка існуючих, вимагає відповідних мережевих ресурсів. В роботах [38-41], достатньо повно висвітлюють різні сторони цієї проблеми (методи управління маршрутизацією, методи управління інтенсивністю потоків, можливості реалізації методів управління процесами обміну інформацією в конкретних мережах і т. п.). Проте, використання існуючих підходів [42, 43, 44, 45] для моделювання трафіку, який передається в сучасних телекомунікаційних мережах, має ряд недоліків. Так, наприклад, не враховуються особливості, властиві для мультисервісних мереж (різні види інформаційних потоків, велика розмірність, ієрархічні топологічні структури, використання високошвидкісних цифрових каналів зв'язку). Розрахунки характеристик інфокомунікаційних мереж, що використовують Марківські моделі, не забезпечують адекватних розрахунків, що, в свою чергу, унеможливує гарантування якості обслуговування.

Трафік, в сучасних інфокомунікаційних мережах, можна розділити на чотири основних класи: трафік реального часу (нееластичний), потоковий трафік, трафік передавання даних (еластичний) та трафік систем сигналізації, кожен з яких відрізняється за рівнем чутливості до характеристик мережі:

Основні характеристики кожної з цих груп трафіку:

- Трафік реального часу – трафік чутливий до затримок, втрати пакетів та джитера, який генерують мультимедійні сервіси, такі як VoIP-телефонія та відеоконференції, сервіси управління технологічними процесами та

промисловим обладнанням, а також інші послуги реального часу. Основними особливостями наведених послуг є: інтерактивність, використання IP-мережі, застосування протоколів реального часу, використання механізмів пріоритетності та стабілізації часу проходження пакетів по мережі.

- Поточковий трафік – трафік, схожий на трафік реального часу, але значно критичніший до параметрів мережі (затримок, втрати пакетів, джитера тощо) та відтворення (перегляд та (або) прослуховування) інформації по мірі її надходження на термінальне обладнання користувача. До послуг, які генерують цей вид трафіку, можна віднести: IP-телефонію, ширококомовне IP-телебачення, перегляд відеоматеріалів з оплатою за показ (Pay-per-view, PPV), відео на замовлення (VoD), Інтернет-телебачення, дистанційне навчання, конференц-зв'язок, відеоспостереження в реальному часі та інші послуги реального часу, критичні до параметрів каналу зв'язку.
- Трафік передавання даних трафік – це трафік, для якого зміна пропускної здатності тракту практично не впливає на якість обслуговування. Еластичний трафік відноситься до класу трафіку, чутливого до втрат та нечутливого до затримок. Прикладом може бути трафік електронної пошти, пересилання даних, веб-додатків (трафік HTTP, SMTP, FTP).
- Трафік систем сигналізації – це потік окремих викликів (інтерактивний). Може передаватися за допомогою різних протоколів, основні з яких: SIP, H.323, MGCP, H.248/MEGACO та ін. Характеризується невеликою чутливістю до параметрів якості обслуговування, однак, перевантаження в мережі можуть привести до значного збільшення часу встановлення з'єднання або навіть до неможливості його встановлення.

Характерним є те, що при переході до мереж наступного покоління, побудованих на основі протоколу IP, зростає частка трафіку реального часу, в порівнянні з традиційним трафіком передавання даних, що пояснюється зростанням інтересу до сервісів, які дозволяють передавати по мережі звук та

відео високої якості, таких як AoD (Audio on Demand), VoD та IPTV.

В мультисервісній мережі, зазвичай, наявні різні комбінації перелічених видів трафіку. Кожен тип трафіку висуває свої вимоги до якості обслуговування (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1. Класифікація типів трафіку мультисервісної мережі

Тип трафіку	Додатки	Вимоги	Протоколи транспортного рівня
Реального часу	IP-телефонія та відео конференцзв'язок	- чутливість до затримок - чутливість до джитера затримки - мала чутливість до втрат	RTCP, RSVP, UDP, RTP
	Процеси управління Ігри on-line	- чутливість до затримок - чутливість до джитера затримки - чутливість до втрат	UDP, TCP
Потоковий	Аудіо на вимогу Відео на вимогу Інтернет мовлення	- мала чутливість до затримок -чутливість до джитера -чутливість до втрат	RSVP, UDP, TCP, SCTP
Еластичний	Конференція документів	- мала чутливість до затримок - мала чутливість до джитера затримок - велика чутливість до втрат	TCP
	Анімація Передача файлів E-mail	- дуже мала чутливість до затримок - мала чутливість до джитера затримок - висока чутливість до втрат	
Сигналізації	Ініціалізація сеансів зв'язку та взаємодії мережевих пристроїв	- мала чутливість до затримок - мала чутливість до джитера затримок - висока чутливість до втрат	H.232, SIP, MGCP, H.248

Найпростішим способом управління передачею потокових даних є використання, в якості транспортного, протоколу TCP. Незважаючи на те, що протокол TCP здійснює надійне передавання даних та використовує механізми попередження перевантажень, використання цього протоколу не може бути задовільним для трафіку реального часу, адже він не завжди зможе забезпечити своєчасність доставки даних (оскільки використовує механізми повторної передачі та підтвердження отримання).

Для не інтерактивних сервісів, згладити коливання затримок можна завдяки здійсненню буферизації даних прикладними програмами клієнта. Вибір розміру буфера відбувається, виходячи з максимально можливої затримки пакетів даних[46]. Проте, використання для такого типу трафіку протоколу TCP є недоцільним. Поточкові дані необхідно доповнювати службовою інформацією (номери послідовності пакетів, часові мітки і т.п.), для чого зручно використовувати протокол RTP (Real Time Protocol), а в якості транспортного протоколу – протокол UDP.

Таблиця 2.2. Закони розподілу трафіку на різних рівнях TCP/IP

Тип трафіку	Рівень	Закони розподілу	
		Вхідного потоку	довжин блоків даних
VoIP	Прикладний	Парето	Парето
FTP/TCP	Транспортний	Парето	Вейбула, логнормальний
SMTP/TCP	Транспортний	Експоненціальний	Експоненціальний
HTTP/TCP	Транспортний	Парето	Логнормальний, Парето
IP	Мережевий	Парето	Парето
Ethernet	Канальний	Парето	Парето

Внаслідок аналізу результатів досліджень трафіку в мультисервісних мережах проведена його класифікація та визначено закони розподілу для

кожного його виду, які дозволяють оптимально описати характер трафіку на певному рівні протокольного стеку TCP/IP [47] (табл. 2.2).

В [48] запропонована комплексна методика оцінки трафіку, яка дозволяє прийняти рішення відносно того чи є процес самоподібним (фрактальним), хаотичним та нелінійним і включає такі етапи:

1. Часо-частотний аналіз – аналіз виду часового сигналу, автокореляційної функції, що, в свою чергу, дозволяє визначити, яка із залежностей характерна для нього (довготривала чи короткотривала.), спектральної щільності потужності та вейвлет перетворення процесу, яке показує наявність самоподібності у вигляді розвиненої деревоподібної структури з розгалуженнями, залежність від масштабу яких описується по ступеневому закону [49].

2. Статистичний аналіз – інструментом статистичного аналізу є дослідження функції розподілу. Для самоподібних процесів зі ступеневим (гіперболічним) спаданням автокореляційної функції характерним є розподіл типу «важкий хвіст» [50]. Найчастіше, для апроксимації гістограм експериментальних даних самоподібних процесів, застосовуються функції субекспоненціальних законів розподілу Парето[51], Вейбула [52] та логнормального. Для перевірки адекватності зазначених теоретичних розподілів експериментальним даним використовуються критерії згоди Колмогорова і Пірсона. Показник «важкості хвоста» (параметр форми) визначають по методу Хілла або шляхом побудови графіку додаткового розподілу в подвійному логарифмічному масштабі [53]. Для перевірки нульової гіпотези про незалежність і тотожність розподілу значень часового ряду, запропоновано BDS-тест, який також дозволяє виявити нелінійність системи, відрізнити випадкові системи від детермінованого хаосу або від нелінійних стохастичних систем [54]. Якщо, в результаті виконання BDS-тесту, для залишків (похибки) лінійної моделі виявиться, що нульову гіпотезу потрібно відхилити, то даний процес є нелінійним.

3. Фрактальний аналіз – аналіз фазового портрету атратора за дискретним

відображенням часової реалізації; обчислення кореляційної ентропії, яка є оцінкою К-ентропії Колмогорова і характеризує ступінь хаотичності режиму; кореляційного інтервалу прогнозованості (глибини прогнозу) процесу та кореляційної розмірності атрактора; визначення показника Херста; визначення розмірності вкладення атрактора (розмірності фазового простору – глибини пам'яті) системи; аналіз флуктаційних функцій та часткових функцій процесу; аналіз скейлінг експонентів, показників Гельдера (узагальнених показників Херста).

2.2. Дослідження властивостей трафіку та визначення його ймовірно-часових характеристик.

2.2.1. Критерії класифікації мультисервісного трафіку

В якості основних критеріїв класифікації, прийняті три характеристики трафіку [55]:

- відносне передбачення швидкості передавання даних;
- чутливість трафіку до затримок пакетів;
- чутливість трафіку до втрат і спотворень пакетів.

За критерієм відносного передбачення швидкості передавання, трафік ділять на два великі класи: потоковий трафік (stream) і пульсуючий (burst). Додатки з поточним трафіком породжують рівномірний потік даних, який надходить в мережу з постійною бітовою швидкістю (ConstantBitRate, CBR). При пакетному методі комутації, трафік таких додатків виглядає, як послідовність пакетів однакового розміру, рівного B біт, що надходять на обслуговуючий пристрій один за одним через однаковий інтервал часу T . Середня швидкість поточного трафіку CBR може бути обчислена шляхом усереднювання на одному періоді: $CBR = B/T$, де B – розмір одного пакету в бітах, а T – період повторення пакетів в секундах.

В загальному випадку, середня швидкість поточного трафіку менша номінальної максимальної бітової швидкості протоколу, за допомогою якого передаються дані, оскільки між пакетами існують паузи.

Так, при роботі додатків файлового сервісу, інтенсивність трафіку може збільшуватися від нуля, коли файли не передаються, до безмежності, коли, після передачі запиту на файл додатку, потрібна якомога швидша передача даних файлу. Зрозуміло, що реальна швидкість передавання обмежена можливостями мережі. Загалом, будь-які додатки генерують пульсуючий трафік, у тому числі і потокові. Ступінь пульсації часто характеризують коефіцієнти пульсації. Коефіцієнт пульсації рівний відношенню середньої швидкості на періоді пульсації до середньої швидкості, виміряної на тривалому інтервалі часу, що включає велику кількість періодів пульсації.

Насправді, практично будь-який трафік має ненульовий коефіцієнт пульсації, в т.ч. трафік поточкових додатків,. Проте, коефіцієнт пульсації у поточкового і пульсуючого трафіків відрізняється якісно. У додатків з пульсуючим трафіком він, зазвичай, знаходиться в межах від 2:1 до 100:1, а у поточкових додатків істотно менший.

У локальних мережах коефіцієнт пульсації зазвичай вищий, ніж в глобальних, оскільки, на магістральних лініях глобальних мереж, трафік є сумою трафіків великої кількості джерел, відповідно окремі пульсації, за законом великих чисел, додаються.

За критерієм чутливості трафіку до затримок пакетів, додатки ділять на такі основні типи (наведені в порядку підвищення чутливості до затримок пакетів):

- Асинхронні;
- синхронні;
- інтерактивні;
- ізохронні;
- надчутливі до затримок.

Асинхронні додатки – практично немає обмежень на час затримки («еластичний» трафік). Приклад такого додатку – електронна пошта.

Синхронні додатки – додатки чутливі до затримок, але допускають їх наявність.

Інтерактивні додатки – затримки можуть бути помічені користувачами, але вони не позначаються негативно на функціональності додатків. Приклад – текстовий редактор, що працює з віддаленим файлом.

Ізохронні додатки – є поріг чутливості до затримок, при перевищенні якого різко знижується функціональність додатку. Приклад – передавання голосу, коли, при перевищенні порогу затримок в 100-150 мс, різко знижується якість відтвореного голосу.

Надчутливі до затримок додатки. Затримка доставки даних зводить до нуля функціональність. Приклад – додатки, що керують промисловим об'єктом в реальному часі.

Взагалі кажучи, інтерактивність додатку завжди підвищує його чутливість до затримок. Наприклад, ширококомвне розповсюдження аудіоінформації може витримувати значні затримки передавання пакетів, а інтерактивна телефонна розмова досить чутлива до їх наявності.

Разом з приведеною вище класифікацією, існує і більш загальний поділ додатків за цією ж ознакою на два класи – асинхронні і синхронні додатки.

До асинхронних відносять ті додатки, які нечутливі до затримок передавання даних в дуже широкому діапазоні (аж до декількох секунд). Решта додатків, на функціональність яких затримки впливають істотно, відносять до синхронних додатків.

До синхронних додатків, згідно узагальненої класифікації, відносять такі типи додатків, з наведеної вище детальної класифікації, як ізохронні і надчутливі.

Щодо інтерактивних додатків – то вони можуть відноситися як до асинхронних (наприклад, текстовий редактор), так і до синхронних (наприклад, відеоконференція).

За критерієм чутливості трафіку до втрат і спотворень пакетів, додатки поділяють на дві групи: чутливі до втрат додатки та стійкі до втрат додатки.

Чутливі до втрат додатки – це практично всі додатки, що передають алфавітно-цифрові дані (до яких відносяться текстові документи, коди програм,

числові масиви і т. п.), володіють високою чутливістю до втрати окремих, навіть невеликих, фрагментів даних. Такі втрати часто ведуть до повного знецінення успішно переданої інформації.

Для прикладу, відсутність хоча б одного байту в коді програми робить її непрацездатною. Всі традиційні мережеві додатки (файловий сервіс, сервіс баз даних, електронна пошта і т. д.) відносяться до цього типу додатків.

Стійкі до втрат додатки – до цього типу відносяться багато додатків, що передають трафік, який несе інформацію про інерційні фізичні процеси. Стійкість до втрат пояснюється тим, що невелику кількість втрачених даних можна визначити на основі прийнятих.

Так, при втраті одного пакету, що несе декілька послідовних вимірів голосу, відсутні виміри при відтворенні голосу можуть бути замінені апроксимацією на основі сусідніх значень. До такого типу додатків відноситься велика частина додатків, які працюють з мультимедійним трафіком (аудіо- і відеододатки).

Можна відзначити також, що не всі види мультимедійного трафіку такі стійкі до втрат даних. Для прикладу, компресований голос або відеозображення дуже чутливі до втрат, тому відносяться до першого типу чутливих до втрат додатків.

Загалом, між значеннями трьох характеристик якості обслуговування немає строгого взаємозв'язку. Тобто додаток з рівномірним потоком може бути як асинхронним, так і синхронним. А, наприклад, синхронний додаток може бути як чутливим, так і нечутливим до втрат пакетів.

Проте, практика показує, що зі всього різноманіття можливих поєднань значень цих трьох характеристик є декілька таких, які охоплюють більшість, що використовуються на даний час.

Наприклад, поєднання таких характеристик трафіку – рівномірний потік, ізохронний, стійкий до втрат відповідає таким популярним додаткам, як IP-телефонія, підтримка відео конференцій, аудіо трансляція через мережу Інтернет.

В рекомендації Y.1541 [56] визначено числові значення параметрів, котрі повинні виконуватись в мережах IP на міжнародних лініях зв'язку, що з'єднують термінали користувачів. Норми на параметри по різних класах QoS визначаються в залежності від додатків та механізмів забезпечення гарантованої якості обслуговування (табл. 2.3).

Таблиця 2.3. Норми для характеристик мереж IP з поділом по класах якості обслуговування.

Характеристики мережі	Класи QoS					
	0	1	2	3	4	5
Затримка	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1с	-
Варіація затримки	50мс	50мс	-	-	-	-
Відсоток втрачених пакетів	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-
Відсоток помилок пакетів	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	-

Згідно з рекомендаціями ITU-TY.1541, варто виділяти шість класів трафіку, які наведені в таблиці 2.4, для забезпечення механізмів QoS. Характеристики QoS особливо важливі у тому випадку, коли мережею передається одночасно трафік різного типу, наприклад, трафік web- додатків, голосу, відео, так як різні типи трафіку висувають різні вимоги до характеристик якості обслуговування [57, 58]. Врахувати одночасно усі характеристики QoS для усіх видів трафіку складно. Тому види трафіку, що існують в мережі, класифікують, відносячи кожен до одного з розповсюджених типів, а потім намагаються досягти одночасного виконання визначеної підмножини з набору вимог для кожного з цих типів трафіку.

Гарантована якість обслуговування, забезпечує верховенство вимог користувача відносно якості послуг: користувач надає сервісу заявку на послуги необхідної йому якості, а сервіс виконує цю заявку або повідомляє користувачеві про неможливість її реалізації. Останній варіант розглядається як надзвичайна ситуація.

Таблиця 2.4. QoS класи для IPмереж.

Клас QoS	Приклад додатків	Механізми у вузлі	Мережеві прийоми
0	Трафік реального часу, інтерактивний, чутливий до джитера	Окремі черги із пріоритетом	Примусова маршрутизація й відстань
1	Трафік реального часу, інтерактивний, чутливий до джитера	обслуговування, упорядкування трафіку	Менш примусова маршрутизація й відстань
2	Передавання даних, дуже інтерактивний трафік (інформація систем сигналізації)	Окремі черги, пріоритет відкидання пакетів	Примусова маршрутизація й відстань
3	Передавання даних, інтерактивний трафік		Менш примусова маршрутизація й відстань
4	Трафік з низькими втратами (дрібні пересилання, трафік, відео потоки)	Довгі черги, пріоритет відкидання пакетів	Будь-яка маршрутизація або шлях
5	Традиційні додатки IP мереж	Окремі черги (фоновий пріоритет)	Будь-яка маршрутизація або шлях

Результат функціонування системи керування з QoS проявляється в тому, що користувачеві гарантується замовлена ним якість послуг, незалежно не тільки від його трафіку, але й від трафіків інших користувачів [59]. Цей ефект у ряді випадків може супроводжуватися деяким зниженням якості послуг у користувачів, яким надано нижчий пріоритет.

2.2.2. Визначення параметрів мережеских потоків у мультисервісних мережах.

Для визначення параметрів мережеских потоків проводилось дослідження трафіку, який був представленим у вигляді потоків, що пересилалися через мережу доставки контенту CDN. Структура мережі представлена на рисунку 2.1. В ході проведення дослідження відстежувався весь трафік, який проходив між серверами протягом кількох днів. Далі було проведено детальне дослідження типів потоків, що передавалися, та визначено основні характеристики і властивості цих потоків.

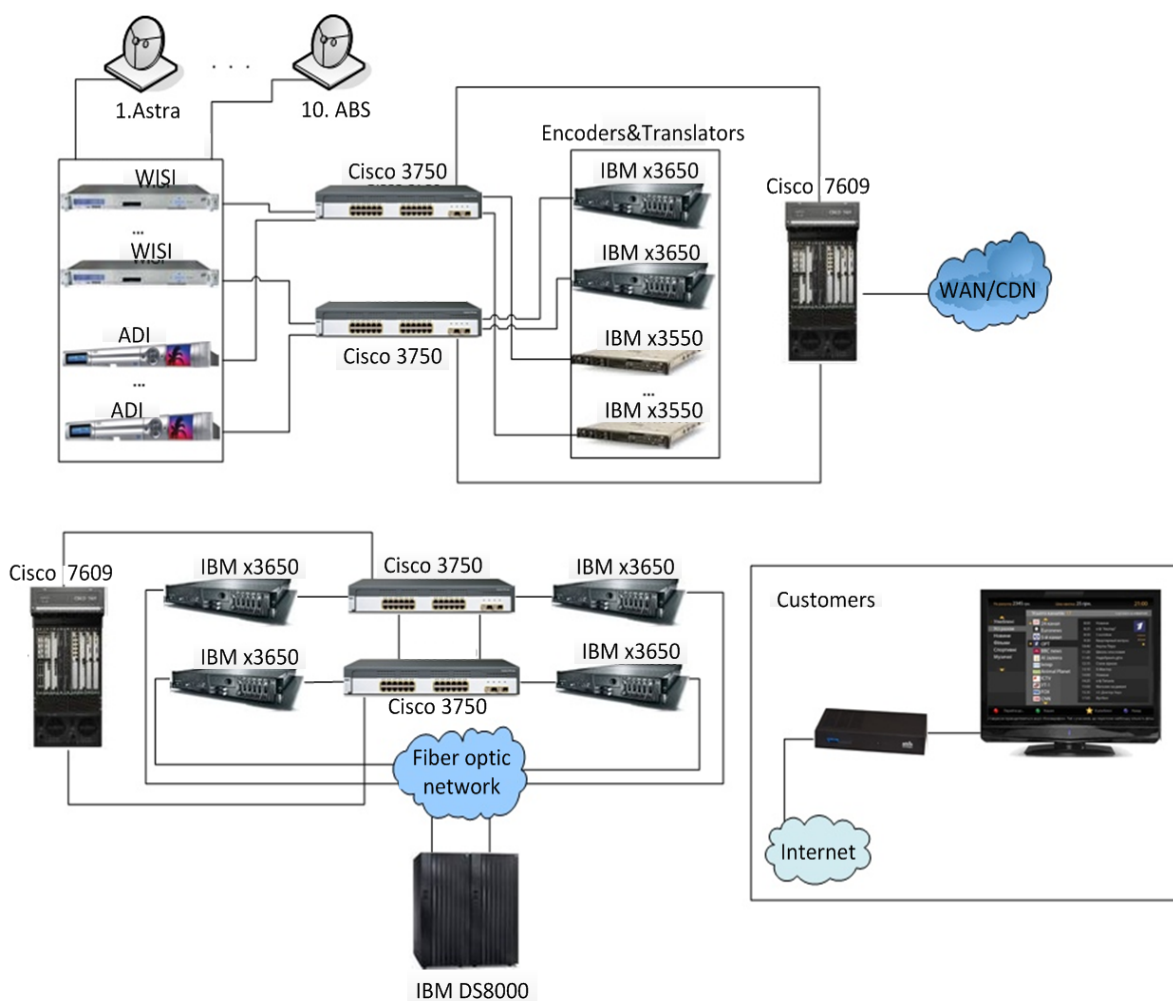


Рис.2.1. Структура мережі доставки контенту.

Для аналізу, дослідження та подальшого опису за допомогою математичної моделі необхідно визначити основні параметри отриманого трафіку, як для кожного потоку окремо, так і для загальної сукупності всіх потоків (рис.2.2-2.13, табл. 2.5).

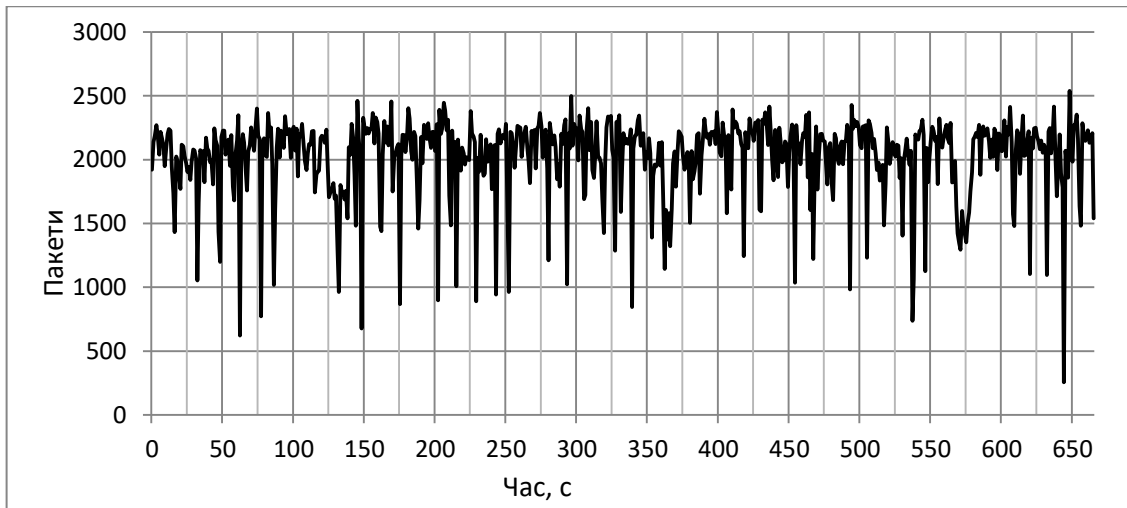


Рис. 2.2. Профіль трафіку для загального потоку.

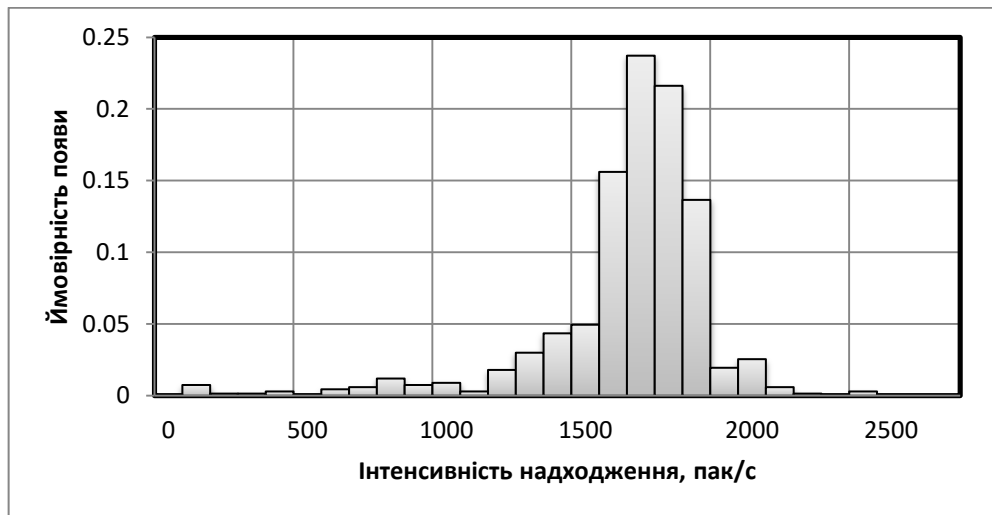


Рис. 2.3. Розподіл інтенсивності надходження пакетів загального потоку.

Середня інтенсивність надходження пакетів визначається за формулою:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \lambda_k \quad (2.1)$$

Дисперсію і середньоквадратичне відхилення за формулою:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\lambda_k - \bar{\lambda})^2 \quad (2.2)$$

$$S = \sqrt{D} \quad (2.3)$$

Інтенсивність обслуговування вираховується за формулою:

$$\mu = \frac{\text{Transmit rate}}{\text{Frame length}}, \quad (2.4)$$

де *Transmit rate* – швидкість передачі даних мережевим інтерфейсом, біт/с;

Frame length – розмір кадру канального рівня, біт. Максимальне значення довжини пакету – 1518 байт.

Варто зауважити, що задане значення може змінюватись, оскільки розмір кадру Ethernet може змінюватись в межах від 64 до 1518 байт, тому, для кожного типу трафіку використовується відповідне значення розміру кадру.

Мультисервісний трафік, на якому проводились дослідження, представляв собою сукупність різних типів мережевих потоків із різними потребами у ресурсах мережі. Тому за максимально можливою інтенсивністю обслуговування будемо вважати таку, при якій не буде втрат пакетів, тобто таку, яка зможе обслужити потік заданої інтенсивності. Замінімо параметр *Transmit rate* на *Bandwidth* для кожного мережевого потоку та отримаємо формулу:

$$\mu = \frac{\text{Bandwidth}}{\text{Frame length}} \quad (2.5)$$

Коефіцієнт завантаженості визначається як:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}}{\mu} \quad (2.6)$$

Таблиця 2.5. Основні параметри досліджуваних мережевих потоків

Тип трафіку	Сер. Інтенсивність пак/с	Сер. Кв. Відхилення пак/с	Інтенсивність обслуговування пак/с	Коеф. Завантаження
Відео за запитом (VoD)	290.50	58.24	342.62	0.81
IPTV-multicast	500.26	101.88	519.74	0.92
Web-трафік	643.97	133.54	659.04	0.94
IP-телефонія	83.90	30.90	92.06	0.71
IPTV-unicast	394.46	76.59	2150.40	0.18
Службові дані	29.47	5.43	33.50	0.42
Загальний потік	1942.66	300.16	1971.07	0.96

Представимо значення розподілу інтенсивностей надходження пакетів та профілі трафіку для кожного із наявних потоків.

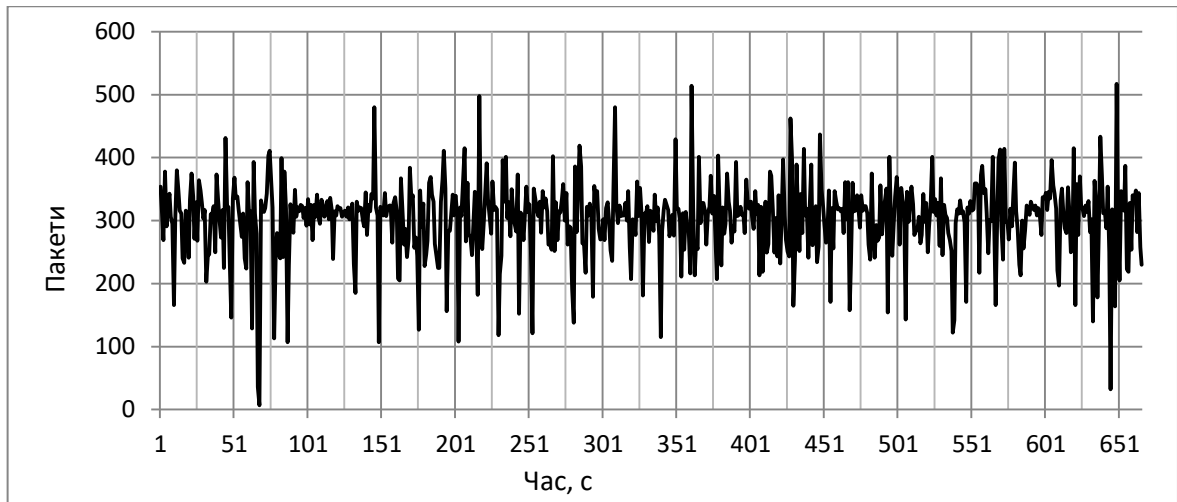


Рис. 2.4. Профіль трафіку для потоку VoD.



Рис. 2.5. Розподіл інтенсивності надходження пакетів VoD.

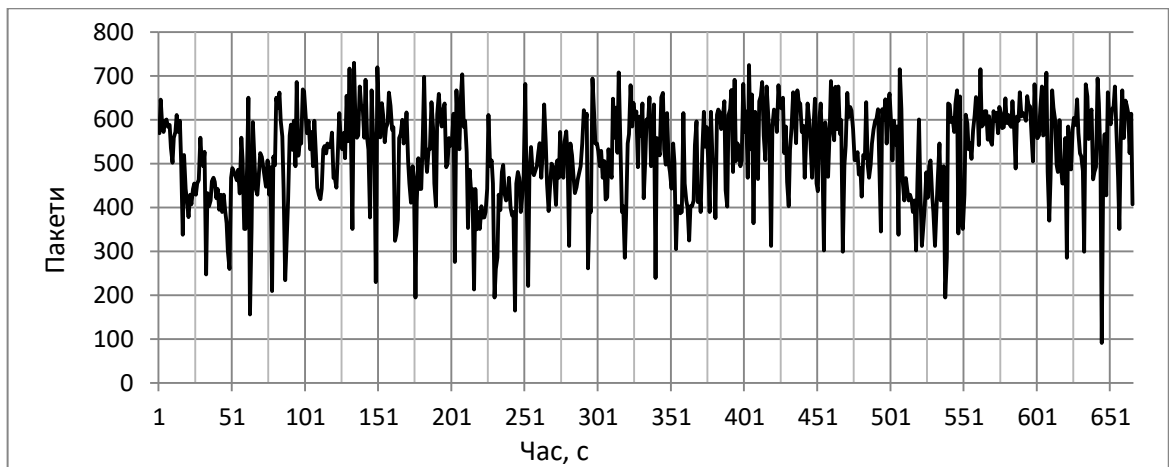


Рис. 2.6. Профіль трафіку для потоку IPTV-Multicast.

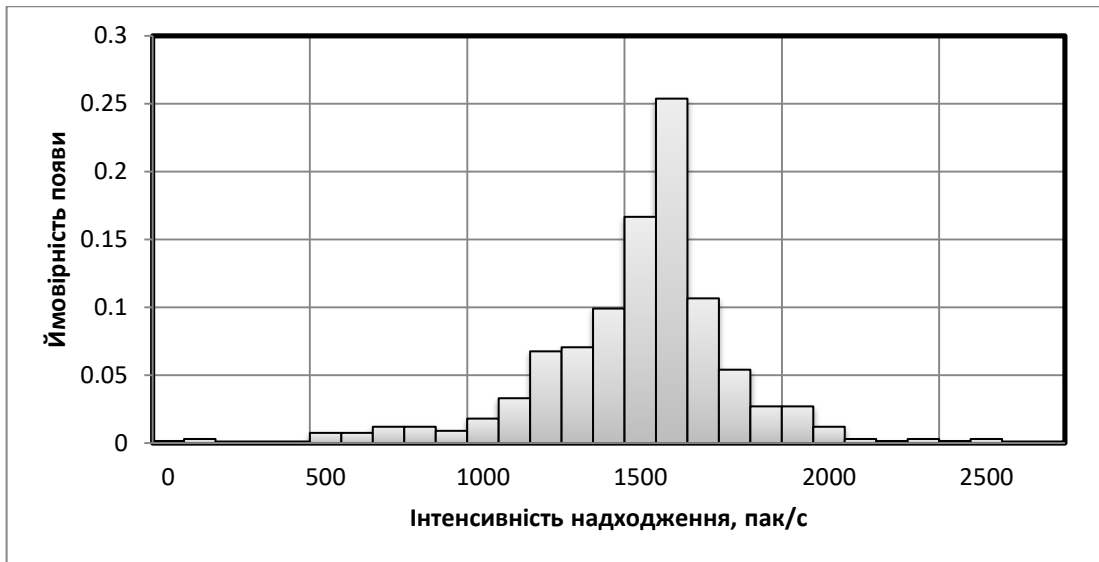


Рис. 2.7. Розподіл інтенсивності надходження пакетів IPTV-Multicast.

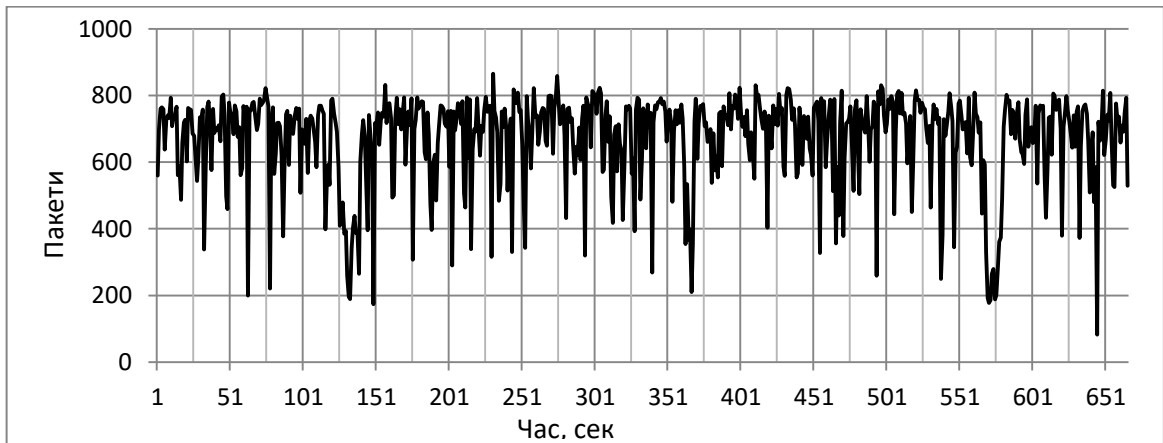


Рис. 2.8. Профіль трафіку для потоку WEB-Data.

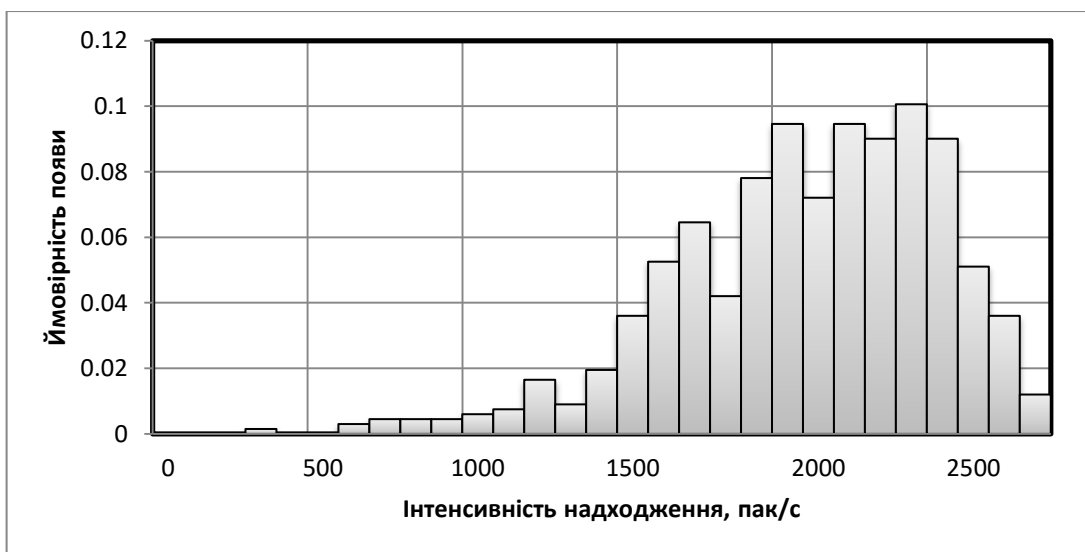


Рис. 2.9. Розподіл інтенсивності надходження пакетів WEB-Data.

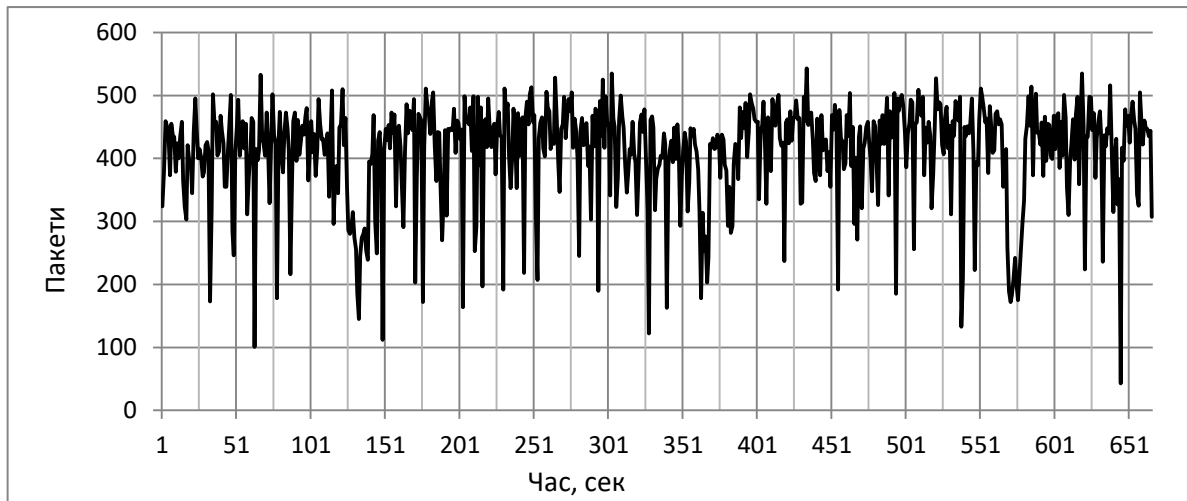


Рис. 2.10. Профіль трафіку для потоку IPTV-Unicast.

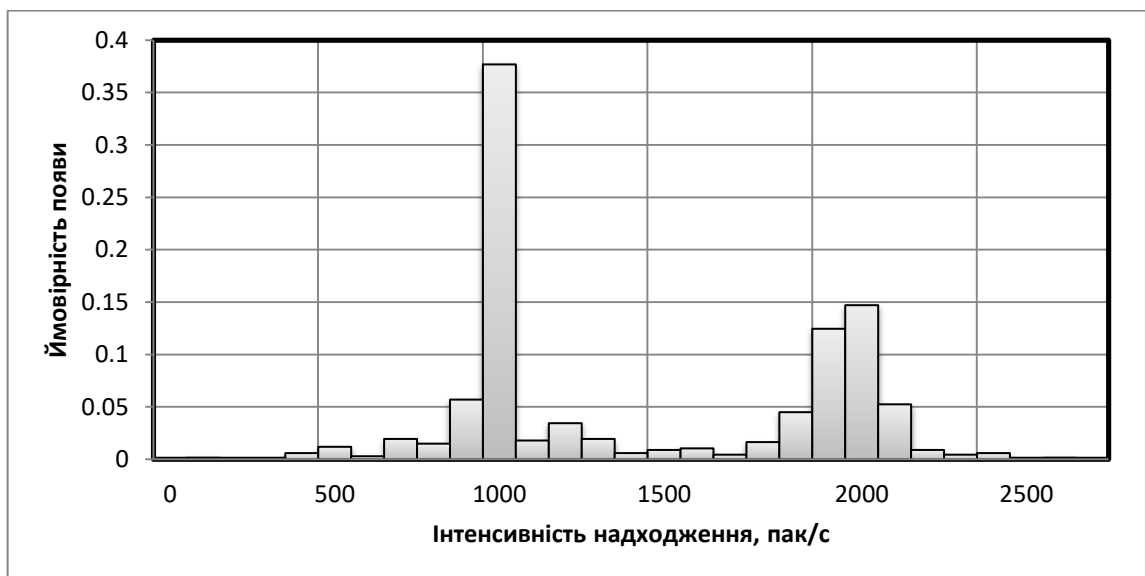


Рис. 2.11. Розподіл інтенсивності надходження пакетів IPTV-Unicast.

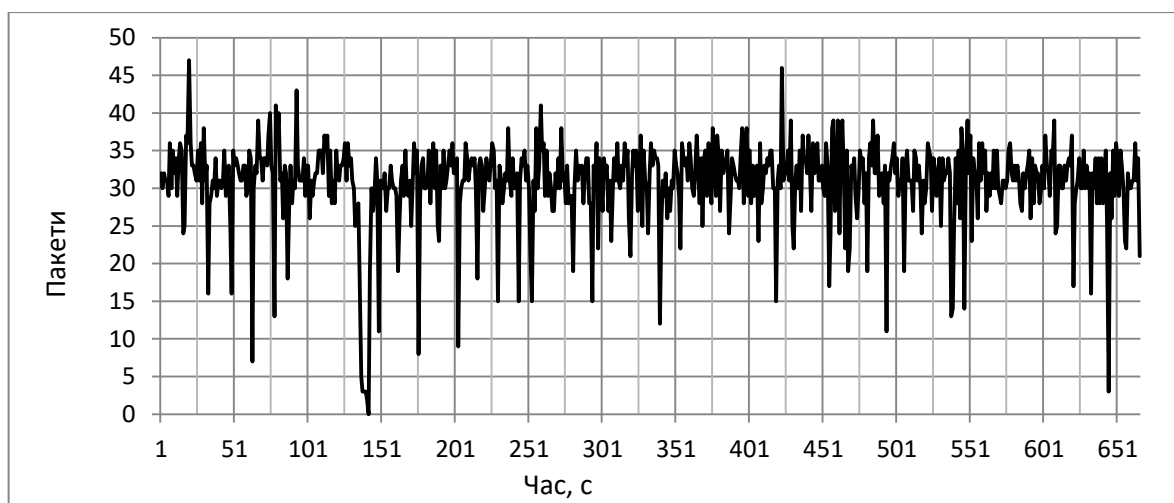


Рис. 2.12. Профіль трафіку для потоку Service-Data.



Рис. 2.13. Профіль трафіку для потоку Service-Data.

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 за запитами користувачів.

2.3. Дослідження методів моделювання та аналізу самоподібного мережевого трафіку.

Властивість самоподібності мережевого трафіку призводить до певної некоректності та похибок результатів, отриманих при розрахунку параметрів якості обслуговування пакетів за класичними методами розрахунків. Далі будуть наведені основні підходи до розрахунків та моделювання систем з самоподібним трафіком.

2.3.1. Підходи до моделювання систем з самоподібним трафіком

Дослідження різних типів мережевого трафіку за останні роки доводять, що мережевий трафік є самоподібним (self-similar) або фрактальним (fractal) по своїй природі. «Самоподібність» являє собою властивість процесу зберігати свою поведінку та зовнішні ознаки при розгляді в будь-якому масштабі.

Концепція самоподібності тісно пов'язана з поняттям фракталів та теорії хаосу, які є підмножиною теорії складності. Визначення фракталу, яке дав Б. Мандельброт [60], характеризує фрактал як структуру, що складається з частин, які в певному розумінні подібні цілому. Фрактал можна розбити на будь-які малі частинки так, що кожна частина виявиться просто зменшеною частиною цілого.

З властивості самоподібності мережевого трафіку випливає, що методи моделювання та розрахунку мережевих систем, засновані на використанні пуассонівських потоків, не дають повної та точної картини того, що відбувається в мережі.

Крім того, самоподібний трафік має особливу структуру, яка завжди характеризується присутністю значної кількості сплесків при невеликому середньому рівні трафіку [61]. Саме ці сплески викликають значні затримки і втрати пакетів, навіть коли середнє значення інтенсивності потоків далеке від максимально допустимих значень. В реалізації, як правило, присутня певна кількість сплесків при відносно невеликому середньому рівні трафіку (рис.2.14).

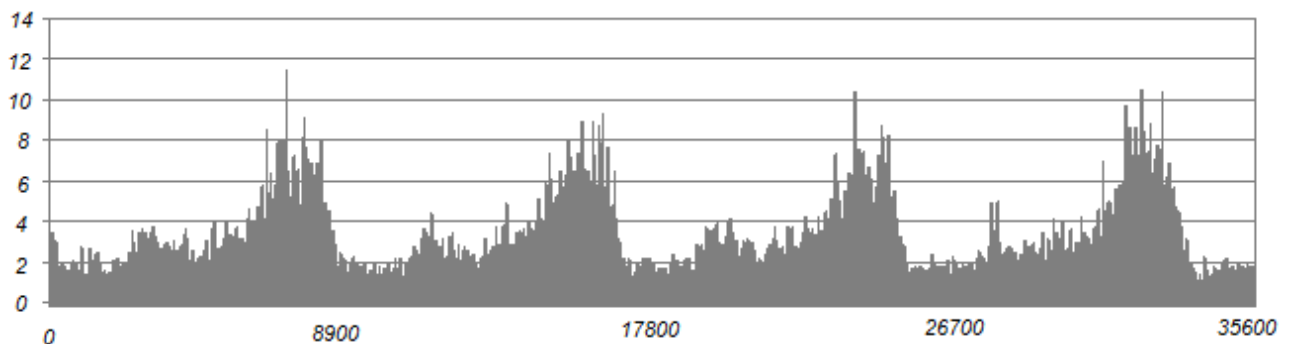


Рис. 2.14. Приклад самоподібного мережевого трафіку.

Дане явище погіршує характеристики (підвищує втрати, затримки, джитер пакетів) при проходженні самоподібного трафіку через вузли мережі. На практиці це проявляється в тому, що пакети, при високих їх швидкостях передавання по мережі, потрапляють на вузол не окремо, а цілою пачкою, що може призводити до їх втрати при обмеженості обсягу буфера, який розрахований за класичними методиками. Ця особливість мережевого трафіку

викликала лавиноподібний ріст публікацій та досліджень по методах аналізу, моделюванню та прогнозуванню самоподібного трафіку.

Не дивлячись на велику популярність даної теми та тривалий період її активного вивчення, доводиться визнати, що до цього часу залишається багато питань та невирішених задач. Так, наприклад, відсутні загальноприйняті універсальні достатньо точні та легкі в застосуванні методи моделювання та прогнозування поведінки самоподібного трафіку, методи проектування мультисервісних мереж.

Оскільки трафік мультисервісних мереж є самоподібним, то його моделювання вимагає своїх визначених способів. На сьогоднішній день розроблено багато різноманітних моделей, призначених для імітування фрактального трафіку [62].

Керуючись аналізом по моделюванню самоподібного трафіку, можна виділити такі його моделі:

Фрактальний броунівських рух (Fractional Brown Motion, FBM). В основі моделі FBM лежить випадковий процес, що починається на початку координат з незалежними нескінченно малими гаусівськими приростами. FBM описується аналітично. Також для генерації FBM широко застосовується алгоритм випадкового переміщення середньої точки (RMD-алгоритм) та алгоритм послідовного випадкового додавання (SLA-алгоритм).

Фрактальний гаусівський шум (Fraction Gaussian Noise, FGN). FGN – стаціонарний в широкому розумінні стохастичний процес з визначеними параметрами (середнім значенням, дисперсією, параметром Херста) та автокореляційною функцією заданого виду. В порівнянні зі звичайним гаусівським шумом, FGN має додатковий параметр Херста, який кількісно визначає ступінь фрактального масштабування. Основна важкість у використанні FBM та FGN – підбір найкращих значень параметрів для отримання генерованого трафіку, що буде близьким за своїми властивостями до експериментально отриманих реалізацій трафіку.

Хаотичні відображення (Chaotic Map, СМАР). Такі моделі являються достатньо розповсюдженими та концептуально простими, вони використовують меншу кількість параметрів, ніж FGN та FBM та їхній вибір є більш зрозумілим.

Авторегресійні моделі (Autoregressive Models, AR) широко застосовуються для моделювання та передбачення завдяки властивості довготривалої пам'яті самоподібних процесів. В таких моделях текуче значення величини, що генерується, розраховується як зважена сума N попередніх відліків плюс випадкова змінна. Як різновиди таких моделей, використовуються моделі ARMA (процес ковзаючого середнього значення), ARIMA (інтегральний процес ковзаючого середнього значення) та FARIMA (фрактальний інтегральний процес ковзаючого середнього значення). До переваг останньої необхідно віднести можливість гнучкого керування кореляційною структурою.

Фрактальні точкові процеси (Fractal Point Process, FPP) являються дуже наочними для моделювання самоподібного трафіку. Простіший точковий процес представляється на часовій осі неспадною ступінчатою функцією, моменти росту якої є випадковими. Існує багато модифікацій FPP, які достатньо економічні та ефективні в обрахунках.

ON/OFF-моделі. В цих моделях трафік розглядається, як комбінація джерел, які його генерують. Кожне джерело має таку структуру: певний період часу вони можуть генерувати пакети інформації (так звані ON-періоди), при цьому всередині одного періоду пакети приходять з однаковими інтервалами між ними. Після ON-періоду йде OFF-період, коли джерело не генерує пакети [63]. Розмір ON- і OFF-періодів є випадковою величиною, яка повинна мати скінченне математичне очікування та нескінченну дисперсію. Слід відзначити, що в ON/OFF процес класифікований, як фрактальний процес відновлення, що чергується.

Моделі на основі класичних систем масового обслуговування. Як правило, такі моделі вдало описують трафік з пуассонівськими потоками. Проте, така модель, як $M/G/\infty$, здатна створити приблизно самоподібний трафік, шляхом

керування поведінкою «хвоста» довільного розподілу обслуговування користувачів, створюючи при цьому довготривалу залежність.

Також ще можна згадати: моделі з використанням нечіткої логіки, нейромережеві моделі, фрактальний рух Леві (Fractional Lévy Motion, FLM), мультифрактальні моделі (Multifractal, MF), вейвлет моделі (Wavelet Models) та моделі на основі техніки «динамічного моделювання Маркова» (Dynamic Markov Modelling, DMM).

2.3.2. Математичний опис самоподібного (фрактального) процесу

Неперервний стохастичний процес $X(t)$ є статистично самоподібним з параметром Херста ($0.5 \leq H \leq 1$), якщо для будь-якого додатного числа a , процеси $X(t)$ та $a^{-H}X(at)$ будуть мати ідентичні розподіли, тобто мати однакові статистичні властивості для всіх додатних цілих n .

$$\{X(t_1), X(t_2) \dots X(t_n)\} \sim \{a^{-H}X(at_1), a^{-H}X(at_2) \dots a^{-H}X(at_n)\} \quad (2.7)$$

де відношення \sim означає асимптотичну рівність в розумінні розподілу.

Практично статистична самоподібність ґрунтується на виконанні таких умов [64]:

$$\text{середнє значення } E[X(t)] = \frac{E[X(at)]}{a^H} \quad (2.8)$$

$$\text{дисперсія } \text{Var}[X(t)] = \frac{\text{Var}[X(at)]}{a^{2H}} \quad (2.9)$$

$$\text{функція автокореляції } R(t, \tau) = \frac{R(at, a\tau)}{a^{2H}} \quad (2.10)$$

де H – параметр Херста, який показує «ступінь» самоподібності. Значення $H=0.5$ показує відсутність самоподібності, а більше значення H (близьке до 1) показує високий ступінь самоподібності або тривало-залежності (long-range dependent, LRD) в процесі. Це означає, що якщо LRD процес має тенденцію до збільшення (або зменшення) в минулому, то з великою ймовірністю він буде мати тенденцію до збільшення (або зменшення) в майбутньому.

2.3.3. Математичний опис дискретного самоподібного процесу

Розглянемо часовий процес $X = \{X_n, n \in Z^+\}$ та визначимо інший часовий процес (m-aggregated) $X^{(m)} = \{X_n^{(m)}, n \in Z^+\}$ шляхом усереднення оригінального часового процесу на сусідні блоки довжиною m , які не перетинаються:

$$X_n^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=nm-(m-1)}^{nm} X_i \quad (2.11)$$

Існує два класи самоподібних процесів, так звані точно самоподібні та асимптотично самоподібні процеси.

Процес X називається точно самоподібним з параметром β ($0 < \beta < 1$), якщо для $m \in Z^*$ виконуються умови:

$$\text{дисперсія } \text{Var}[X^{(m)}] = \frac{\text{Var}[X]}{m^\beta} \quad (2.12)$$

$$\text{функція автокореляції } R(k, X^{(m)}) = R(k, X) \quad (2.13)$$

Параметр β пов'язаний з параметром Херста H співвідношенням:

$$\beta = 2(1 - H) \quad (2.14)$$

Існує інший клас самоподібних процесів – так звані асимптотично самоподібні. Процес X називається асимптотично самоподібним, якщо для великих k :

$$\text{дисперсія } \text{Var}[X^{(m)}] = \frac{\text{Var}[X]}{m^\beta} \quad (2.15)$$

$$\text{функція автокореляції } R(k, X^{(m)}) = R(k, X) \quad (2.16)$$

при $m \rightarrow \infty$

Згідно спостереження, для обох класів самоподібних процесів дисперсія $\text{Var}[X^{(m)}]$ зменшується значно повільніше, ніж $1/m$ при $m \rightarrow \infty$ в порівнянні зі стохастичними процесами, де дисперсія зменшується пропорційно $1/m$ і наближається до 0 при $m \rightarrow \infty$.

З математичної точки зору фрактальний об'єкт, перш за все, володіє дрібною розмірністю, яку можна визначити у вигляді формули:

$$d = \frac{\log N}{\log(\frac{1}{r})} \quad (2.17)$$

де N – це кількість рівних частин, на які необхідно розділити об'єкт, а кожна частина буде зменшеною копією цілого в $1/r$ разів.

2.3.4. Опис моделі самоподібного трафіку

Існує декілька підходів до формування самоподібного потоку. Найбільш відомим є метод, першочергово запропонований Мандельбротом. Даний метод заснований на суперпозиції декількох (які суворо чергуються) незалежних та з однаковим розподілом ON/OFF джерел, інтервали між ON та OFF періодами якого володіють ефектом Ноа (Noah effect). Під джерелами ON/OFF, які суворо чергуються, слід розуміти модель, де ON та

OFF періоди чергуються, тривалості ON періодів незалежні та мають однаковий розподіл, тривалості OFF періодів теж незалежні та мають однаковий розподіл, і послідовності тривалостей ON і OFF періодів не залежать один від одного. При цьому, тривалості ON та OFF періодів можуть мати різні розподіли.

Також, ефект Ноа в розподілі тривалостей ON/OFF періодів є основною точкою при моделюванні самоподібного трафіку, на відміну від моделей, коли використовуються стандартні експоненційний чи геометричний розподіл. Ефект Ноа є синонімом синдрому нескінченної дисперсії, що з'явився завдяки емпіричним спостереженням того, що багато природних явищ можуть бути описані розподілом з нескінченною дисперсією. Математично, для досягнення ефекту Ноа, можна використовувати розподіл Парето або логарифмічно-нормальний розподіл, який часто називають розподілом з «важким хвостом». Найбільш популярним є розподіл Парето. Перевагою такого розподілу є можливість визначення фрактальності трафіку по його параметрах. Недоліком є те, що цей розподіл має нескінченну дисперсію, що визначає високу мінливість вхідного трафіку. Відповідно, використовувати цей розподіл не вдається.

Розподіл Парето має функцію розподілу, яка визначається як:

$$F(x) = 1 - \left(\frac{\beta}{x}\right)^\alpha \quad (2.18)$$

де α – параметр форми, який характеризує чи буде розподіл мати скінченне або нескінченне середнє значення та дисперсію, і β – параметр нижньої межі (мінімальне значення випадкової величини x).

Густина розподілу Парето задається функцією:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\beta}{x}\right)^{\alpha+1} \quad (2.19)$$

для $x > \beta$ та $\alpha > 0$, та:

$$f(x) = F(X) = 0 \quad (2.20)$$

для $x \leq \beta$.

Параметр α визначає середнє значення та дисперсію x таким чином:

- для $\alpha \leq 1$ розподіл має нескінченне середнє значення;
- для $1 \leq \alpha \leq 2$ розподіл має скінченне середнє та нескінченну дисперсію;
- для $\alpha \leq 2$ розподіл має нескінченну дисперсію;

Також існує співвідношення між параметром α та параметром Херста H :

$$H = \frac{3-\alpha}{2} \quad (2.21)$$

Разом з розподілом Парето, найчастіше, при моделюванні фрактального трафіку, використовується розподіл Вейбула. Закон розподілу ймовірностей для розподілу Вейбула має вигляд:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2.22)$$

де β , α – відповідно масштабний параметр та параметр форми.

Зв'язок між параметрами стохастичних фрактальних процесів [65] зображений на рис. 2.15.

Для оцінки параметра Херста часового ряду існує багато методів: R/S статистика, аналіз графіку зміни дисперсії, оцінка Вітгла, вейвлет-аналіз, аналіз індексу дисперсії та ін. [66].

Одним зі способів визначення коефіцієнта H є аналіз так званої R/S статистики (номінального розмаху). Розрахунок за цим способом проводиться в кілька кроків:

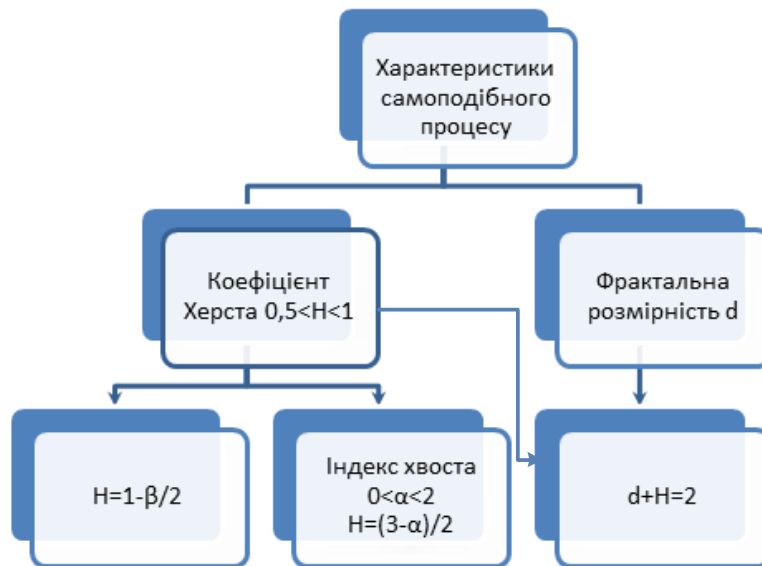


Рис. 2.15. Зв'язок між параметрами стохастичних фрактальних процесів.

- 1) За формулою 2.23 визначається математичне очікування випадкового ряду X_k ($k=1..N$):

$$M_N = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k \quad (2.23)$$

- 2) За формулою 2.24 визначається дисперсія вибірки:

$$S_N^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X_k - M)^2 \quad (2.24)$$

- 3) За формулою 2.25 визначається інтегральне відхилення:

$$D_j = \sum_{k=1}^j X_k - j * M, \quad j \in [1, N] \quad (2.25)$$

- 4) За формулою 2.26 визначається рознесення випадкового процесу:

$$R_N = \max D_j - \min D_j \quad (2.26)$$

- 5) Із встановленого Херстом співвідношення:

$$\frac{R}{S} \approx \left(\frac{N}{2}\right)^H \quad (2.27)$$

визначається параметр Херста H :

$$H = \frac{\log\left(\frac{R}{S}\right)}{\log\left(\frac{N}{2}\right)} \quad (2.28)$$

Використовуючи отримане значення параметра Херста та формулу Полячека-Хінчіна, можна розрахувати розмір буфера [67]:

$$N = \frac{\lambda}{\mu} * \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{\frac{H-0.5}{1-H}}}{\left(1-\frac{\lambda}{\mu}\right)^{\frac{H}{1-H}}} \quad (2.29)$$

Параметр Херста H являє собою міру стійкості статистичного явища, або міру тривалості довгострокової залежності. Значення $H=0,5$ вказує на відсутність довгострокової залежності. Чим ближче значення H до 1, тим вища степінь стійкості довгострокової залежності. Різноманітні дослідження різних типів трафіку сучасних телекомунікаційних систем показали, що параметр Херста, для більшості застосувань, знаходиться в межах $0,5 < H < 1$. Отже, кожен тип трафіку в мережі має свою степінь фрактальності. Деякі приблизні значення параметра Херста, для різного трафіку, наведені у вигляді таблиці (табл.2.6) та кругової діаграми на рис. 2.16, для більшої наочності з більшою кількістю типів трафіку.

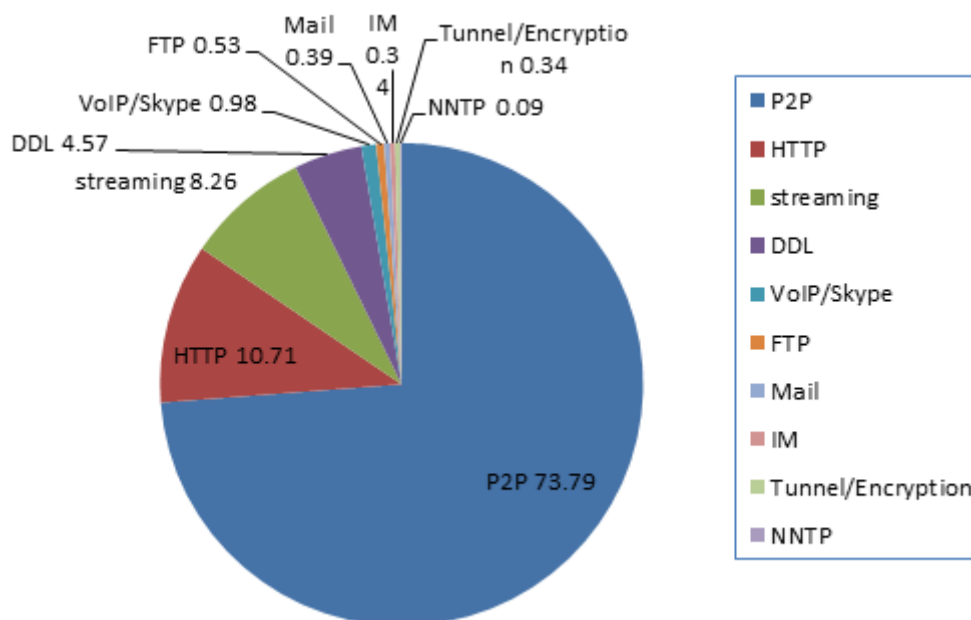


Рис. 2.16. Значення параметра Херста для різних типів трафіку [68].

Таблиця 2.6. Фрактальність різних типів трафіку.

Тип трафіку	Фрактальність трафіку (H)
HTTP	0.75-0.92
Відео	0.6-0.9
Аудіо	0.6-0.9
P2P	0.6-0.9

Як видно з таблиці, основні типи мережевих застосувань мають коефіцієнт Херста більший 0,6.

Для системи M/G/1 за [69] є справедливою рівність (2.30), яка виражає середню кількість заявок в системі:

$$N = \rho + \frac{\lambda^2 \bar{x}^2}{2 * (1 - \rho)} \quad (2.30)$$

де \bar{x}^2 – другий початковий момент часу обслуговування, який залежить від закону розподілу.

Для визначення другого початкового моменту, для різних законів розподілу, використовуються формули:

- експоненційний розподіл:

$$\bar{x}^2 = \frac{2}{\mu^2} \quad (2.31)$$

- рівномірний розподіл:

$$\bar{x}^2 = \frac{Y^2}{3} \quad (2.32)$$

де Y – тривалість обслуговування, мкс.

- нормальний розподіл:

$$\bar{x}^2 = \sigma_x^2 + m_x^2 \quad (2.33)$$

де σ_x – середнє квадратичне відхилення часу обслуговування;

$m_x \geq 3 * \sigma_x$ – математичне очікування і $m_x + 3 * \sigma_x = Y$;

Введемо в рівняння (2.30) нормовану дисперсію часу обслуговування (коефіцієнт варіації), яку можна визначити за формулою:

$$C_b^2 = \frac{\delta_b^2}{\bar{x}^2} \quad (2.34)$$

де δ_b^2 – стандартне відхилення;

\bar{x}^2 – середнє значення випадкової величини.

Спочатку, зі значення дисперсії, визначається значення \bar{x}^2 :

$$\delta^2 = (x - \bar{x})^2 = (x^2 - 2 * x * \bar{x} + \bar{x}^2) = \bar{x}^2 - 2 * \bar{x}^2 + \bar{x}^2 = \bar{x}^2 - \bar{x}^2$$

Звідси знаходимо, що:

$$\bar{x}^2 = \delta^2 - \bar{x}^2 \quad (2.35)$$

Підставляючи отримане значення у рівняння (2.30) та вважаючи, що $\rho = \lambda * \bar{x}$ отримаємо вираз:

$$N = \rho + \frac{\lambda^2 * \bar{x}^2}{2 * (1 - \rho)} = \rho + \frac{\lambda^2}{2 * (1 - \rho)} * (\sigma^2 + \bar{x}^2) = \rho + \frac{\lambda^2}{2 * (1 - \rho)} * \bar{x}^2 * \left(1 + \frac{\delta^2}{\bar{x}^2}\right) = \rho + \frac{\lambda^2 * \bar{x}^2}{2 * (1 - \rho)} * (1 + C_b^2) = \rho + \rho^2 * \frac{(1 + C_b^2)}{2 * (1 - \rho)} \quad (2.36)$$

Вираз (2.36) являє собою відому формулу, яка визначає середню кількість заявок в системі M/G/1 і яку часто називають формулою Полячека-Хінчіна.

З цієї формули можна отримати необхідні залежності для систем M/M/1 та M/D/1, якщо для розрахунків використовувати значення коефіцієнта варіації, яке відповідає розподілам цих систем. Для системи M/M/1 значення величини коефіцієнта варіації є рівним 1, а для системи M/D/1, де розподіл часу обслуговування пакетів є рівномірним, коефіцієнт варіації дорівнює 0 [70].

Відповідно, якщо ці значення підставити у формулу (2.36), то отримаємо вже відомі значення формул для розрахунку цих систем. Середня кількість заявок в системі M/M/1 визначається за формулою:

$$N = \rho + \rho^2 * \frac{2}{2 * (1 - \rho)} = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (2.37)$$

Для системи M/D/1, для якої коефіцієнт варіації дорівнює 0, середня кількість заявок в системі з формули (2.36) набуде вигляду:

$$N = \rho + \rho^2 * \frac{1}{2 * (1 - \rho)} \quad (2.38)$$

Для знаходження середньої кількості заявок у черзі, для цих систем, можна скористатися співвідношенням:

$$Q = N - \rho \quad (2.39)$$

де ρ – коефіцієнт завантаженості мережі.

Наступною важливою характеристикою системи масового обслуговування є значення. Цей час можна визначити за співвідношенням:

$$W = \rho * \frac{(1 + C_b^2)^2}{2 * (1 - \rho)} * \overline{t_{\text{обсл.}}} \quad (2.40)$$

Для того, щоб дізнатися час перебування заявки в системі, цілком логічно, необхідно до часу перебування її в черзі додати час обслуговування заявки.

Черговою, необхідною нам, характеристикою систем масового обслуговування є ймовірність втрати пакетів в системі. Загальний вираз для визначення ймовірності втрат пакетів для системи G/G/1 має вигляд [71]:

$$P_{\text{loss}} = \frac{(1-\rho)}{1-\rho^{(W+1) \cdot \frac{2}{C_\lambda^2 + C_\mu^2}}} * \rho^{W \cdot \frac{2}{C_\lambda^2 + C_\mu^2}} \quad (2.41)$$

де $C_\lambda^2 = \left(\frac{\delta[\lambda]}{M[\lambda]}\right)^2$ – квадратичний коефіцієнт девіації вхідного потоку;

$C_\mu^2 = \left(\frac{\delta[\mu]}{M[\mu]}\right)^2$ – квадратичний коефіцієнт девіації вихідного потоку;

W – ємність запам'ятовуючого пристрою, що вимірюється в пакетах.

Якщо вхідний та вихідний потоки розподілені за експоненційним законом, то коефіцієнти $C_\lambda^2 = C_\mu^2 = 1$, і таким чином отримуємо вираз, який дозволяє визначити ймовірність втрат для системи M/M/1:

$$P_{\text{loss_MM1}} = \frac{(1-\rho)}{1-\rho^{(W+1)}} * \rho^W \quad (2.42)$$

де $\rho = \lambda/\mu < 1$ – коефіцієнт завантаженості каналу зв'язку;

λ та μ – інтенсивності надходження пакетів та інтенсивність обслуговування пакетів за одиницю часу відповідно;

Для розрахунку ймовірності втрат, в залежності від розміру буфера, використовується інший метод [72], який використовує значення параметра Херста, що характеризує самоподібність отриманого трафіку:

$$P_{\text{loss}} = \frac{(1-\rho)}{1-\rho^{(W+1)^{2*(1-H)}}} * \rho^{W^{2*(1-H)}} \quad (2.43)$$

При невідомих розподілах часу між надходженнями пакетів та часу обслуговування пакетів, можна використовувати формули для системи G/G/1, яка описує систему з довільним розподілом часу між надходженнями заявок та довільним законом розподілу часу обслуговування. У такому випадку, можна користуватися наведеними далі твердженнями.

Нехай на вхід системи надходять заявки з інтенсивністю λ та коефіцієнтом варіації α . Середній час та коефіцієнт варіації тривалості обслуговування заявок складає b та β . Тоді, середній час очікування можна знайти за формулою:

$$W = \frac{\rho * b}{2 * (1 - \rho)} * (\alpha^2 + \beta^2) * f(\rho, \alpha, \beta) \quad (2.44)$$

де $f(\rho, \alpha, \beta)$ – коректуюча функція від α , яка визначається за формулою:

$$f(\rho, \alpha, \beta) = \begin{cases} \exp\left\{-\frac{2 * (1 - \rho)}{3 * \rho} * \frac{(1 - \alpha^2)^2}{\alpha^2 + \beta^2}\right\} \\ \exp\left\{-(1 - \rho) * \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha^2 + 4 * \beta^2}\right\} \end{cases} \quad (2.45)$$

Перший вираз у формулі (2.45) справедливий при $\alpha < 1$, а другий при $\alpha \geq 1$.

Середній час очікування заявок обслуговування в системі буде відрізнятися від значення середнього часу очікування в черзі на величину, яка дорівнюватиме часу обслуговування заявки в системі:

$$T = W + (1/\mu) \quad (2.46)$$

Застосовуємо формулу Літла у вигляді виразу, що зв'язує середню кількість заявок в системі N з інтенсивністю λ надходження вимог та середнім часом T перебування заявок в системі:

$$N = \lambda * T \quad (2.47)$$

Знаючи значення виразу (2.47), за формулою (2.39) можна знайти середню довжину черги Q , яка буде відрізнятися від N на значення ρ .

Як видно з наведених вище виразів, розрахунок цих систем не є складним. Проте, тут використовуються певні узагальнені формули, які можуть давати похибки в отриманих результатах. Загальну тенденцію залежностей необхідних величин від різних параметрів трафіку ми отримуємо, проте вони не будуть точно описувати та відповідати реальним результатам в мережі і можуть бути недостатньо адекватними для їх застосування.

2.4. Моделювання якісних та часових параметрів мультисервісного трафіку

Сучасні методи та моделі аналізу продуктивності та якості інформаційних мультисервісних мереж можна розділити на два напрямки: аналітичне ймовірнісне моделювання на основі теорії масового обслуговування та імітаційне моделювання. Методи першого напрямку, засновані на результатах теорії масового обслуговування, обмежуються пуассонівськими потоками в

мережах систем масового обслуговування M/M/1, M/D/1, M/G/1 та ін. Другий можливий метод моделювання базується на використанні пакетів з вбудованими генераторами потоків з різними законами розподілу (наприклад такі програмні продукти як COMNET, GPSS World, NetCracker, OPNET Modeler, та ін.), але вони не враховують реальних властивостей та параметрів існуючих мереж.

Обмеженість пуассонівських моделей підтверджує безліч публікацій на тему самоподібного трафіку з розподілом виду «важкий хвіст». В більшості цих робіт стверджується, що трафік мультисервісних мереж не може бути адекватно описаний пуассонівськими моделями, оскільки висновки, отримані на їх основі, є досить оптимістичними стосовно затримок. Тому більш ефективно, в якості моделей масового обслуговування, використовувати системи масового обслуговування типу G/G/1, G/G/m, G/M/1, проте, це ускладнює розрахунки, оскільки дисперсії цих процесів нескінченні.

Інтенсивність надходження пакетів даних на мережевий інтерфейс вузла обслуговування за кожну секунду часу спостереження, зображена на рис. 2.17.

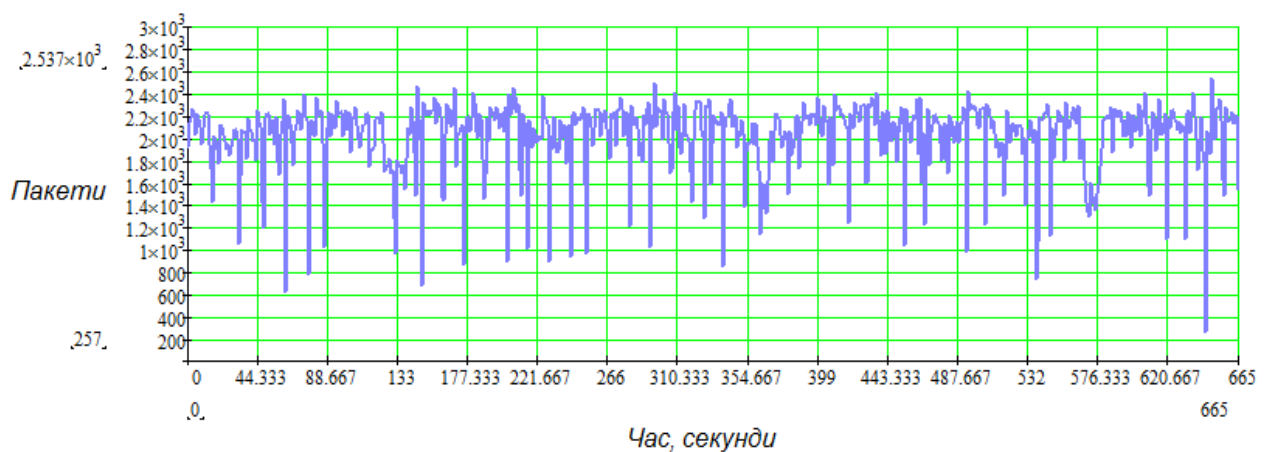


Рис. 2.17. Інтенсивність надходження пакетів на вузол обслуговування за час спостереження.

2.4.1. Визначення ступеня самоподібності мультисервісного трафіку.

Для початку, потрібно виконати перевірку та підтвердити те, що отриманий мережевий трафік дійсно є самоподібним. Для підтвердження цього здійснюється розрахунок показника самоподібності трафіку, а саме параметра

Херста. Для цього використовується метод R/S-аналізу [73]. Розрахунок буде проводитись за допомогою формул (2.23-2.28). Для обрахунків використовується програмне забезпечення MathCad. Отримане значення параметра Херста дорівнює 0,754.

За формулою (2.29) здійснюється розрахунок необхідного розміру буфера пам'яті, використовуючи для цього отримані параметри вхідного потоку та розраховане значення параметра Херста. Залежність розміру буфера від завантаженості обслуговуючого пристрою зображено на рис. 2.18

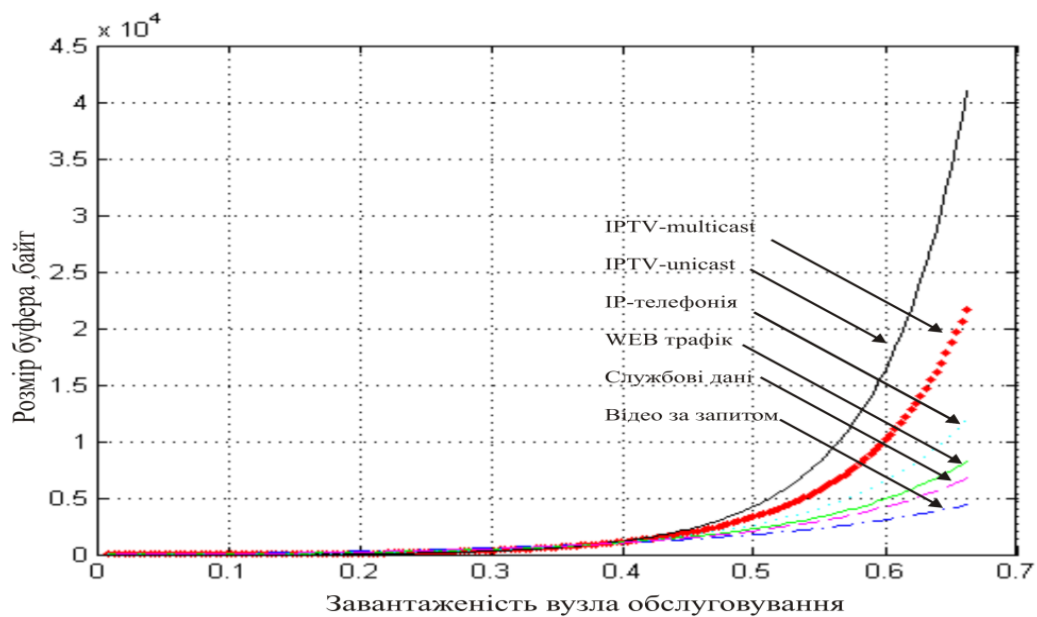


Рис.2.18. Залежність розміру буфера від завантаженості обслуговуючого пристрою.

Також, для кращого сприйняття отриманих даних, наведено залежності розміру буфера при параметрах Херста, рівних 0.4 та 0.5, які відповідно описували б несамоподібний трафік та трафік, який знаходиться на межі самоподібності.

Графік даних залежностей зображено на рис. 2.19.

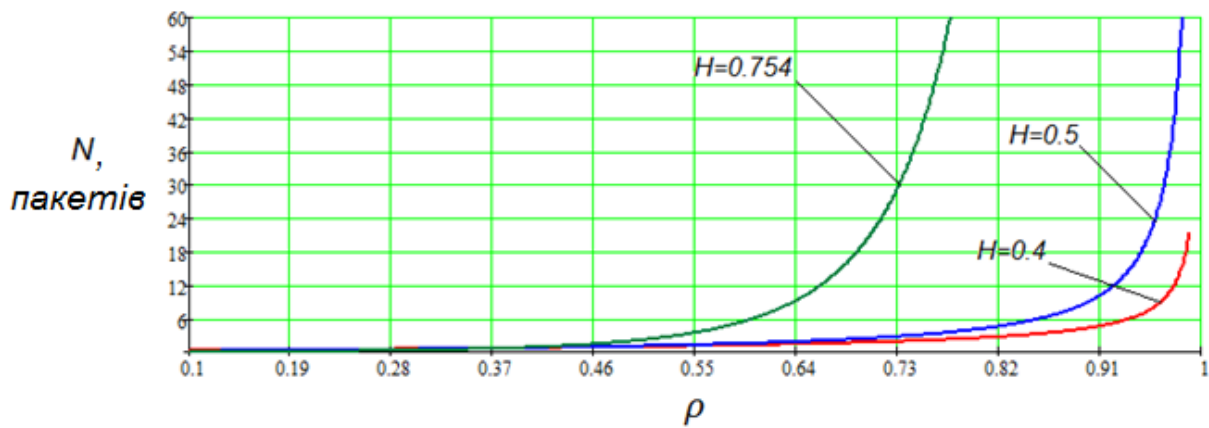


Рис. 2.19. Залежність зміни розміру буфера від завантаженості мережі при значеннях параметра Херста $H=0.4$, $H=0.5$ та $H=0,754$.

Цей графік описує залежність розміру буфера від значення параметру Херста при збільшенні коефіцієнта завантаженості мережі. Як видно з отриманих графіків, для самоподібного трафіку є необхідним буфер більшого розміру вже при менших значеннях коефіцієнта завантаженості мережі ρ .

Залежність ймовірності втрат, для різних типів досліджуваного трафіку, від завантаженості обслуговуючого пристрою представлена на рисунку 2.20.

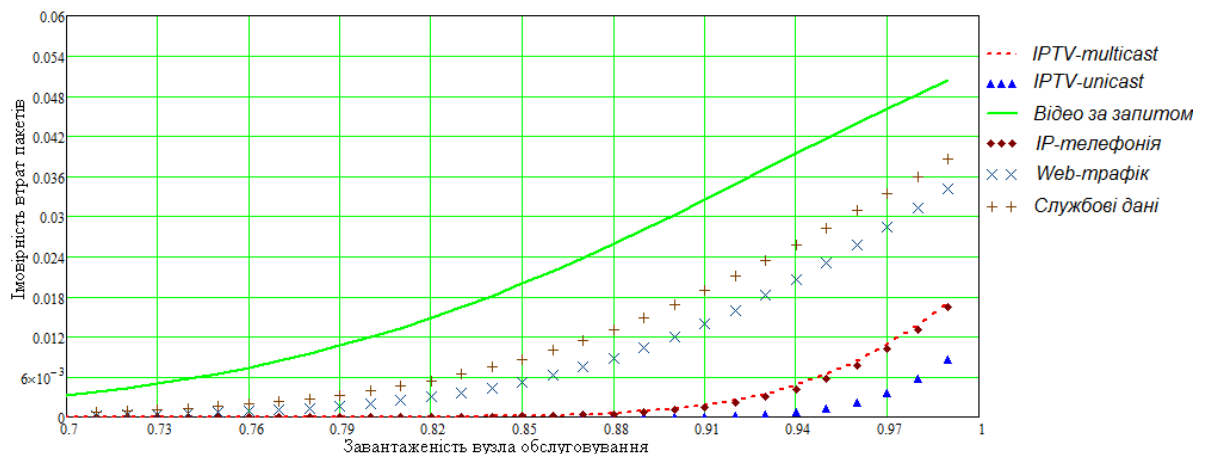


Рис.2.20. Залежність ймовірності втрат пакетів від завантаженості вузла обслуговування.

2.4.2. Дослідження способів аналітичного моделювання самоподібного трафіку

Вважається, що нам невідомий закон розподілу проміжків часу між надходженнями заявок у систему. Тому, здійснюється розрахунок параметрів СМО, вважаючи, що вхідний потік є пуассонівським. Розглянуто такі системи

як: M/M/1, M/D/1 та M/G/1. Оскільки, виходячи з розрахунків системи M/G/1, можна перейти до двох інших згаданих систем, то розгляд розпочато саме з системи M/G/1.

Для визначення інтенсивності обслуговування заявок, необхідно знати пропускну здатність інтерфейса вузла обслуговування та розмір кадру каналного рівня, який змінюється від 64 до 1518 байт. Їхнє відношення дасть значення інтенсивності обслуговування пакетів. Для розрахунків було прийнято значення довжини пакету рівним 1024 байти. Таким чином, значення інтенсивності обслуговування визначається як:

$$\mu = \frac{\text{Stream Bandwidth}}{\text{Packet Size}} \quad (2.49)$$

і дорівнює:

$$\mu = \frac{\text{Stream Bandwidth}}{\text{Packet Size}} = \frac{20 \cdot 1024 \cdot 1024}{1024 \cdot 8} = 2560 \text{ пак./с}$$

Для розрахунку кількості заявок у системі M/G/1, було використано отриману раніше формулу Полячека-Хінчіна (2.37). Використовуючи цю формулу, а також формули (2.38) та (2.39) було розраховано значення середньої кількості заявок для систем M/M/1 та M/D/1.

Статистику для отриманої вхідної послідовності пакетів, що зображена на рис. 2.21, наведено у таблиці 2.5:

Таблиця 2.7. Характеристики вхідного трафіку

Інтенсивність надходження пакетів λ , пак./сек.	Інтенсивність обслуговування пакетів μ , пак./сек.	Математичне очікування випадкової величини M	Дисперсія випадкової величини D	Параметр Херста
257 – 2537	2560	2023,59	97616,33	0,754

Коефіцієнт варіації C_b^2 буде дорівнювати (за формулою 2.34):

$$C_b^2 = \frac{97616,33}{(2023,59)^2} = 0,154$$

Отримані залежності для середньої кількості заявок, для цих трьох пуассонівських систем, представлено на рис. 2.24.

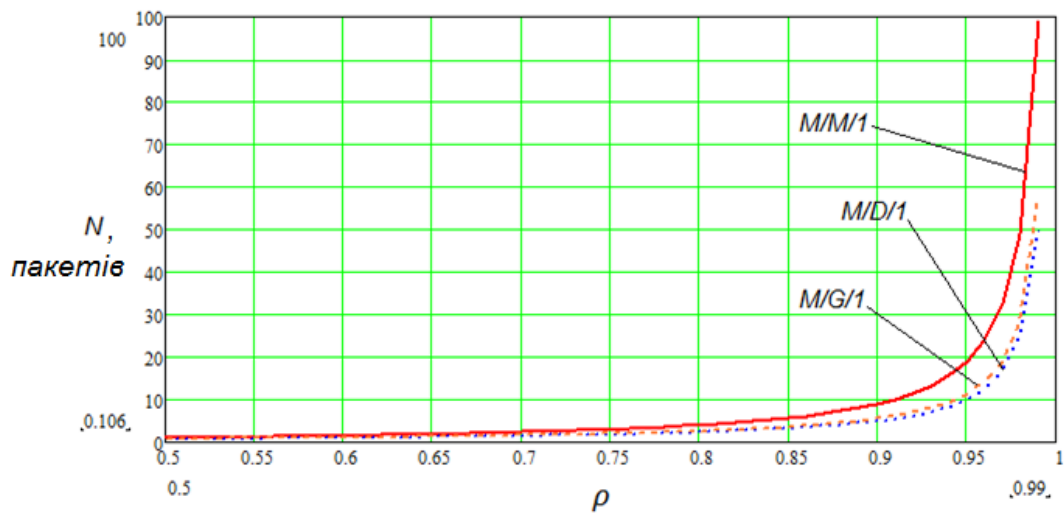


Рис. 2.21. Залежність середньої кількості заявок у системі від значення коефіцієнта завантаженості.

Як видно з отриманих залежностей, для всіх систем, зі збільшенням завантаженості системи кількість заявок, що очікують обслуговування у ній, буде збільшуватися. Значення середньої кількості заявок у черзі розраховується за формулою (2.40) і буде несуттєво відрізнятися від значення середньої кількості заявок в системі (рис. 2.25), адже між собою вони відрізняються лише на значення величини коефіцієнта завантаженості, який, для отриманого трафіку, в нашому випадку, знаходиться в межах від 0,1-0,99.

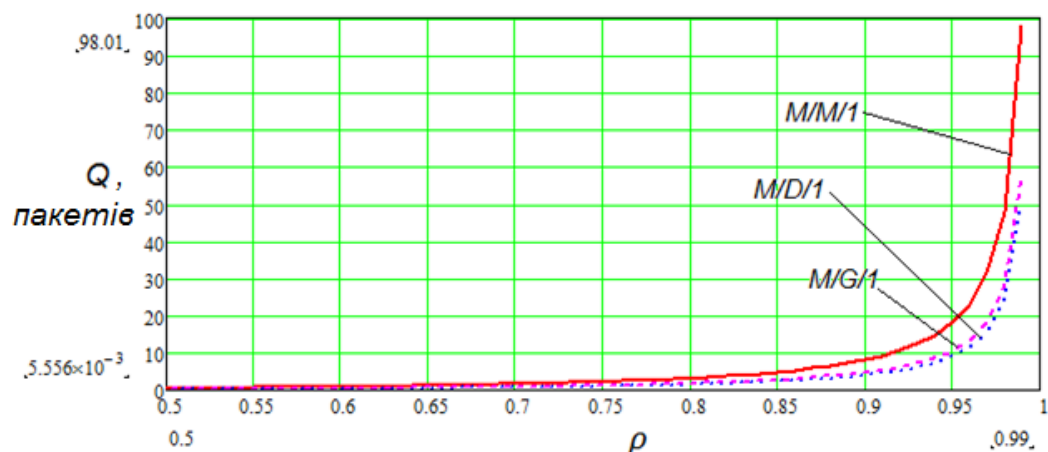


Рис. 2.22. Залежність середньої кількості заявок в черзі від завантаженості.

Залежності середнього часу перебування заявок у черзі для різних СМО розраховуються за формулою (2.41), а графічне представлення цих залежностей зображено на рис. 2.23. Отримані залежності показують, що зі збільшенням

завантаженості, час перебування заявок в системі збільшується. Найбільший час перебування заявок в черзі будуть мати системи класу M/M/1.

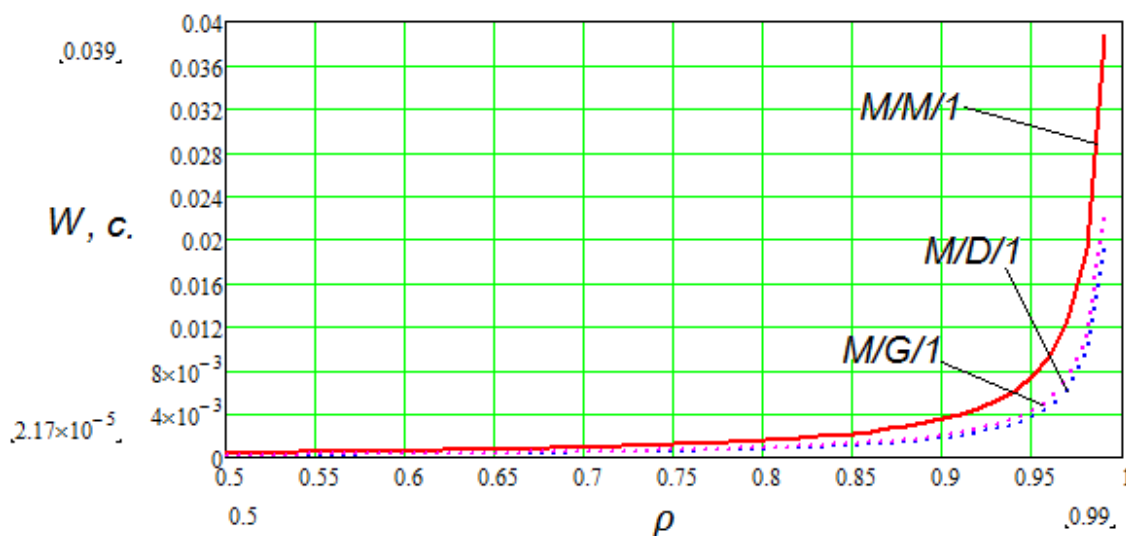


Рис. 2.23. Залежність середнього часу перебування заявок у черзі для різних значень коефіцієнта завантаженості.

Дослідження [71 ,74] показали, що методи розрахунку характеристик інфокомунікаційних мереж, таких як: пропускна здатність, час доставки пакету та ін., засновані на марківських моделях, дають невиправдано оптимістичні оцінки та ведуть до недооцінки навантаження та до нездатності забезпечення необхідної якості обслуговування.

Одним із найважливіших параметрів, при визначенні якості обслуговування, є ймовірність втрат повідомлення за рахунок переповнення буферу запам'ятовуючого пристрою. Буфер призначений для згладжування короткотривалих пульсацій мережевого трафіку та запобігання втрати пакетів при цьому. Необхідність у буферній пам'яті проявляється в моменти пікових навантажень мереж передавання даних та обслуговуючих пристроїв [75].

Для розрахунку ймовірності втрат за параметром Херста (формула 2.33), розмір буфера було прийнято рівним 512 пакетів (довжина пакету 1518 байт) [76], параметр Херста, для отриманого трафіку, рівний 0,754. Отримана залежність зображена на рис. 2.24.

Аналізуючи отриману залежність, можна зробити висновок, що у мережах з несамоподібним типом трафіку ймовірність втрат, при визначеному

розмірі буфера пам'яті, буде дуже малою. Трафік, що знаходиться на межі самоподібності, теж має досить незначний рівень втрат. Проте, як тільки трафік набуває властивостей самоподібності, відразу помітне зростання ймовірності втрат, і чим більшою є степінь самоподібності, тим більшим є це зростання.

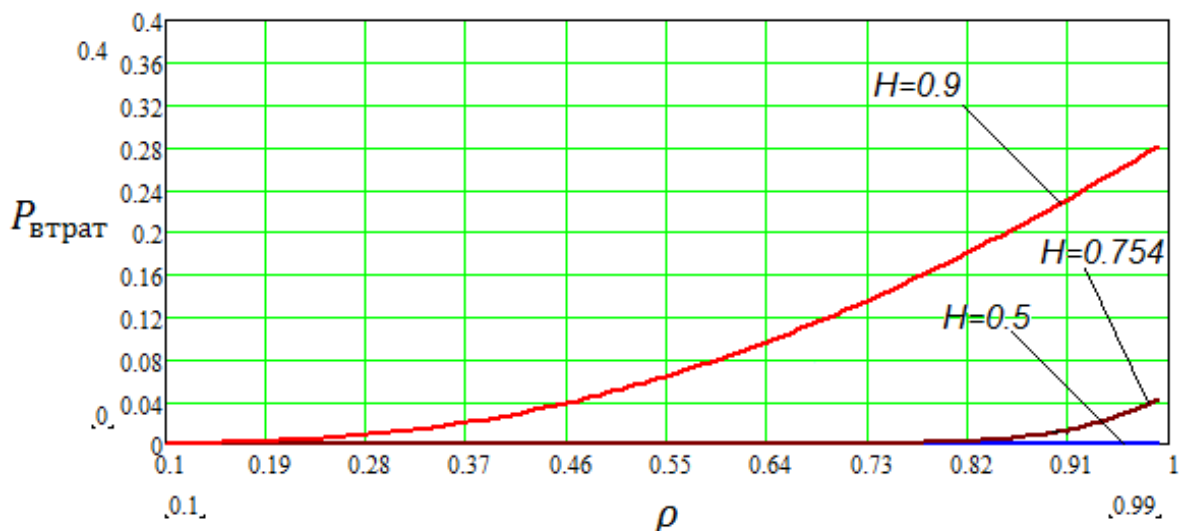


Рис. 2.24. Залежність ймовірності втрат від коефіцієнта завантаженості обслуговуючого пристрою при розмірі буфера 512 пакетів.

Окремо розглянуто поведінку залежності значення ймовірності втрат від коефіцієнта завантаженості, при різних значеннях величини буфера, а саме при: $W=5$, $W=10$, $W=15$ та $W=20$ пакетів. Для розрахунків використано формулу (2.42), а отримані залежності представлено на рисунках 2.25.-2.28.

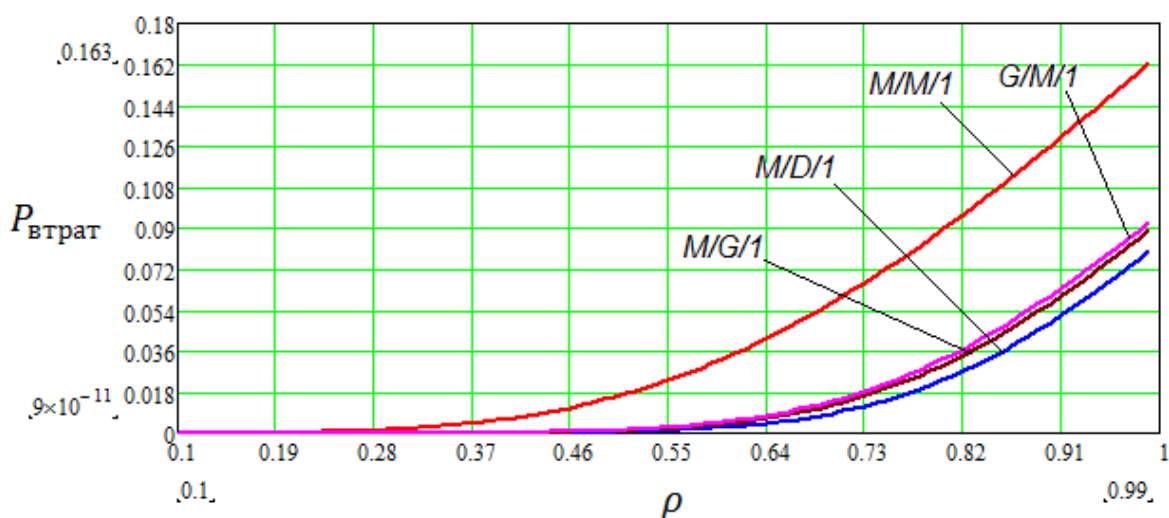


Рис. 2.25. Залежність значення ймовірності втрат від коефіцієнта завантаженості при значенні величини буфера $W=5$ пакетів.

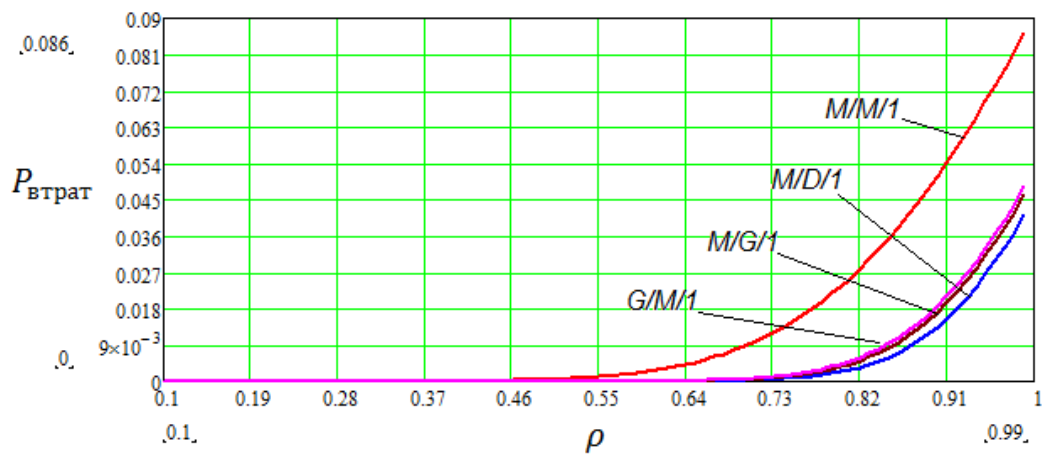


Рис. 2.26. Залежність значення ймовірності втрат від коефіцієнта завантаженості при значенні величини буфера $W=10$ пакетів.

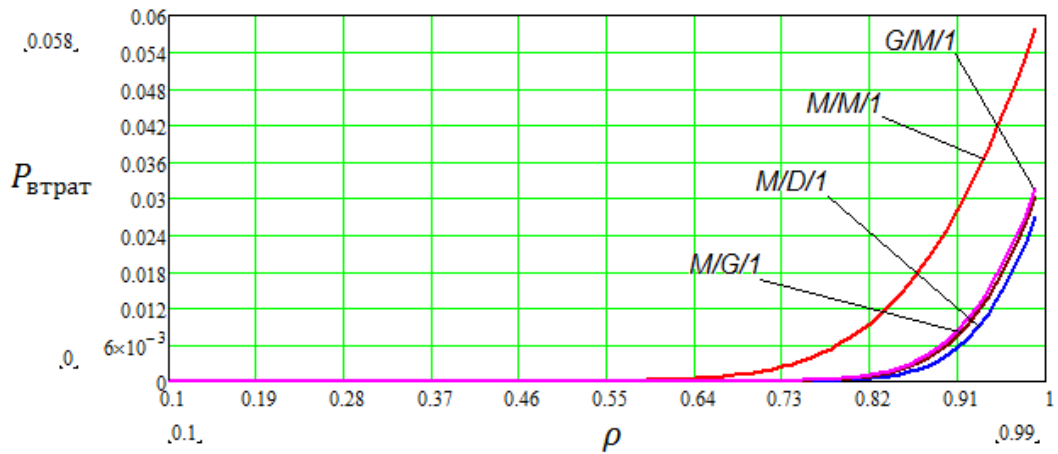


Рис. 2.27. Залежність значення ймовірності втрат від коефіцієнта завантаженості при значенні величини буфера $W=15$ пакетів.

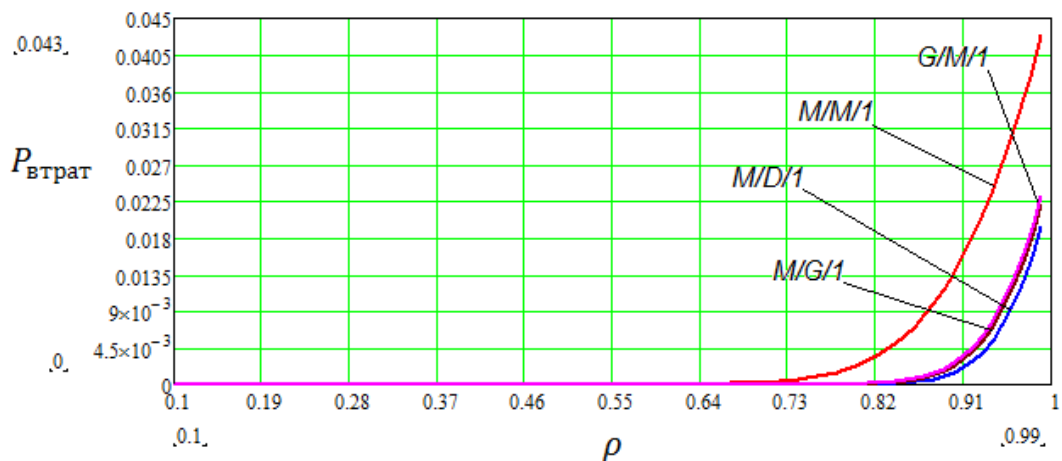


Рис. 2.28. Залежність значення ймовірності втрат від коефіцієнта завантаженості при значенні величини буфера $W=20$ пакетів.

Розрахунки для системи G/G/1 було проведено з використанням формул 2.42, 2.45, 2.49.

Графік залежності середнього часу очікування в системі G/G/1 від коефіцієнта завантаженості обслуговуючого пристрою, що розраховується за формулою (2.42), зображено на рис. 2.29.

Середній час очікування обслуговування заявок в черзі буде відрізнятися від середнього часу очікування в системі на величину часу обслуговування однієї заявки.

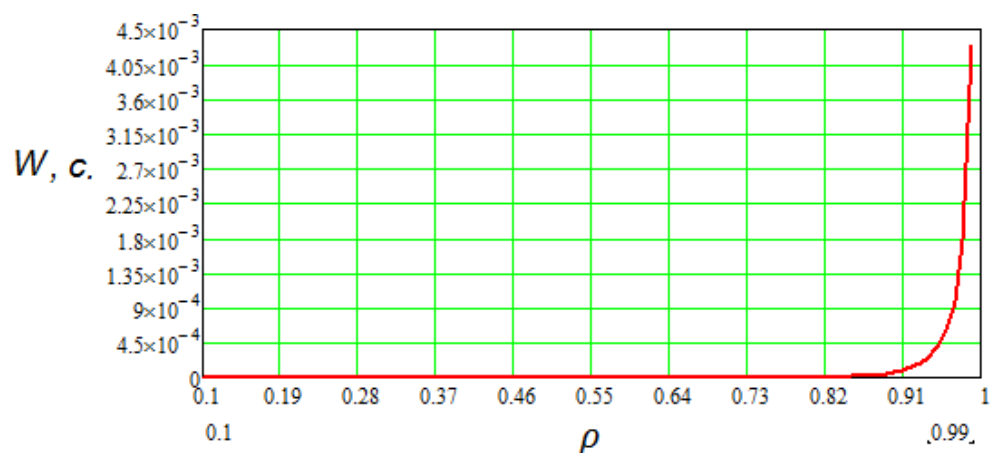


Рис. 2.29. Графік залежності середнього часу очікування від коефіцієнта завантаженості для системи G/G/1.

Якщо використати формулу Літтла, то можна знайти середню кількість заявок в системі (формула 2.48). Залежність середньої кількості заявок від коефіцієнта завантаженості зображено на рисунку 2.30.

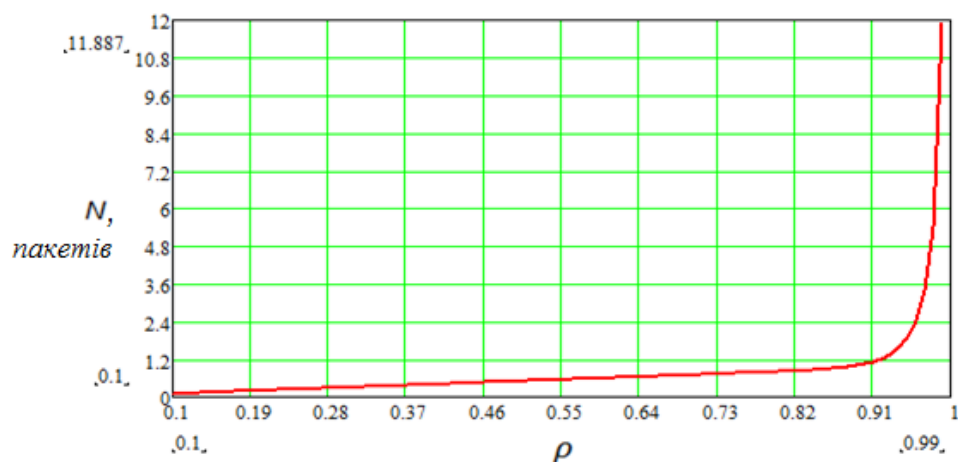


Рис. 2.30. Залежність середньої кількості заявок в системі від коефіцієнта завантаженості для системи G/G/1.

Ймовірність втрат для системи G/G/1, при різних значеннях величини буфера, можна розрахувати за формулою (2.42). Отриману залежність, при різних значеннях розміру буфера, представлено на рисунку 2.31.

Якщо порівняти результати, отримані для систем M/M/1, M/D/1, M/G/1 з результатами для системи G/G/1, то можна побачити, що отримані значення ймовірності втрат для системи G/G/1, при степені завантаженості каналу вище 0.7, є меншими, ніж для інших систем. Аналогічні спостереження є також і в залежностях ймовірності втрат. Для системи G/G/1 максимальне значення ймовірності втрат, при розмірі буфера $W=5$ пакетів, становить менше 2% тоді, як для інших систем, наприклад системи M/D/1, при такому ж розмірі буфера пам'яті, ймовірність втрат становить приблизно 8%.

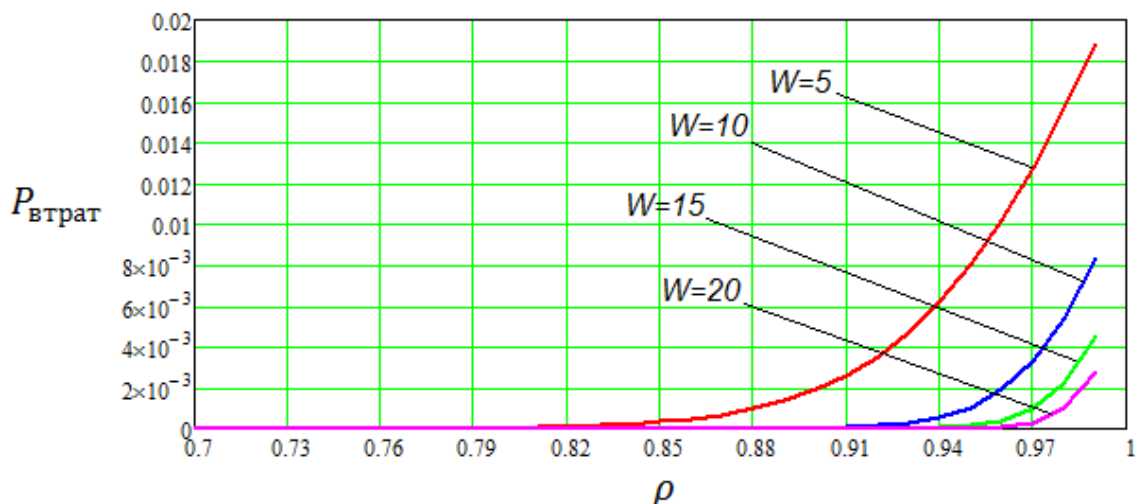


Рис. 2.31. Залежність ймовірності втрат від коефіцієнта завантаженості мережі при різних значеннях величини буфера (система G/G/1).

Отже, можна припустити, що кращим варіантом для виконання розрахунків є взяття за основу системи G/G/1, адже цим враховуємо специфіку та властивості отриманого трафіку [77]. Проте, як вже зазначалося, розрахунок для цих систем здійснюється за спрощеними формулами, що може спричинити певні похибки та недооцінку або переоцінку отриманих результатів. Тому, пропонується здійснювати розрахунок, визначивши спочатку закон розподілу часу між викликами, що надходять у систему, а вже потім знаходити аналітичні вирази для розрахунку такої системи. Проте, часто такі розрахунки є досить

складними, а інколи, навіть, можуть не мати аналітичних розв'язків, що зумовлює необхідність введення спрощень та припущень.

2.4.3. Результати комп'ютерного моделювання

Для підтвердження результатів, отриманих методом аналітичного моделювання, в роботі було проведено також імітаційне моделювання системи масового обслуговування. Імітаційне моделювання було виконано на програмному забезпеченні GPSS World, за допомогою якого було отримано необхідні числові значення характеристик системи, які можна порівняти з аналітично отриманими результатами. Перед початком імітаційного моделювання, було створено блокову модель роботи системи, а вже потім здійснено її реалізацію програмно. Отже, порядок подій у системі обслуговування був таким:

- Генерування вимог в системі (блок GENERATE);
- Вхід згенерованих вимог в чергу (QUEUE);
- Визначення зайнятості каналу обслуговування (SEIZE). Якщо канал зайнятий, то вимога залишається в черзі, якщо вільний – то заявка потрапляє в канал на обслуговування;
- Вихід вимоги з черги (DEPART);
- Обслуговування вимоги в каналі обслуговування (ADVANCE);
- Звільнення каналу обслуговування (RELEASE);
- Вихід вимоги з системи (TERMINATE).

Якщо об'єднати всі ці блоки в єдине ціле, то можна отримати схему реалізації імітаційного моделювання, яку зображено на рисунку 2.32.

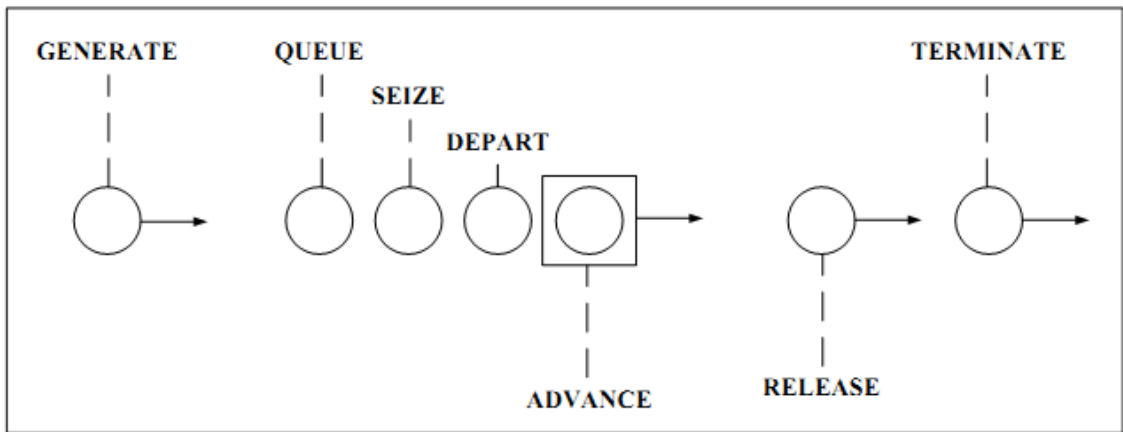


Рис. 2.32. Модель процесу імітаційного моделювання в середовищі GPSS World.

Створивши по даній схемі імітаційну модель для систем M/M/1 та M/D/1, було отримано середні значення кількості заявок у черзі та середній час очікування заявки в черзі. Результати, отримані при розрахунках та за допомогою імітаційної моделі, для наочного порівняння наведено на рис. 2.33 та 2.34 (взято не всі отримані значення, а лише незначна їх кількість для здійснення порівняння).

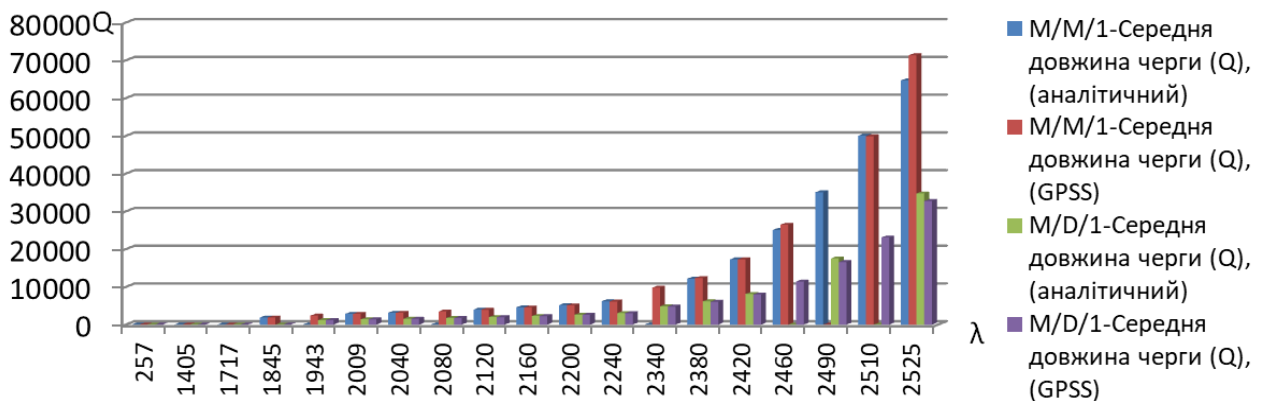


Рис. 2.33. Результати порівнянь параметрів системи M/M/1 та M/D/1, отримані аналітичним та імітаційним методами моделювання.

Порівняння результатів, отриманих методами аналітичного та імітаційного моделювання, показує, що ці результати між собою відрізняються несуттєво, з похибкою менше 10%. Код програм, реалізованих в середовищі GPSS World, наведено в Додатку А.

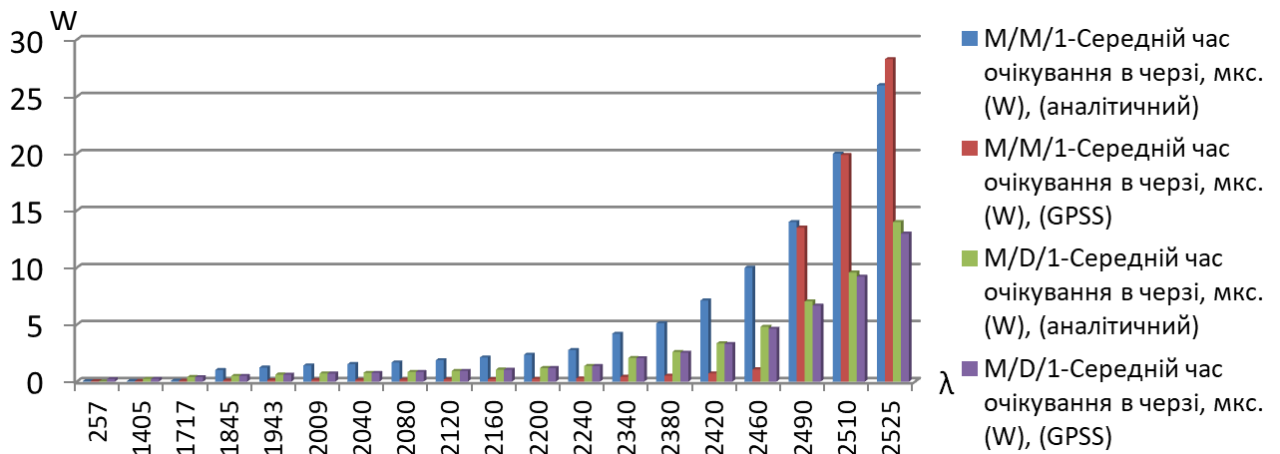


Рис. 2.34. Результати порівнянь параметрів системи M/M/1 та M/D/1, отримані аналітичним та імітаційним методами моделювання.

Для наочності, графічні залежності отриманих параметрів для систем M/M/1 та M/D/1, для яких здійснювалося імітаційне моделювання, представлено на наступних рисунках. Відповідно, на рис. 2.35 буде зображено залежність середньої довжини черги від коефіцієнта завантаженості каналу, а на рис. 2.36 – залежність середнього часу очікування в черзі.

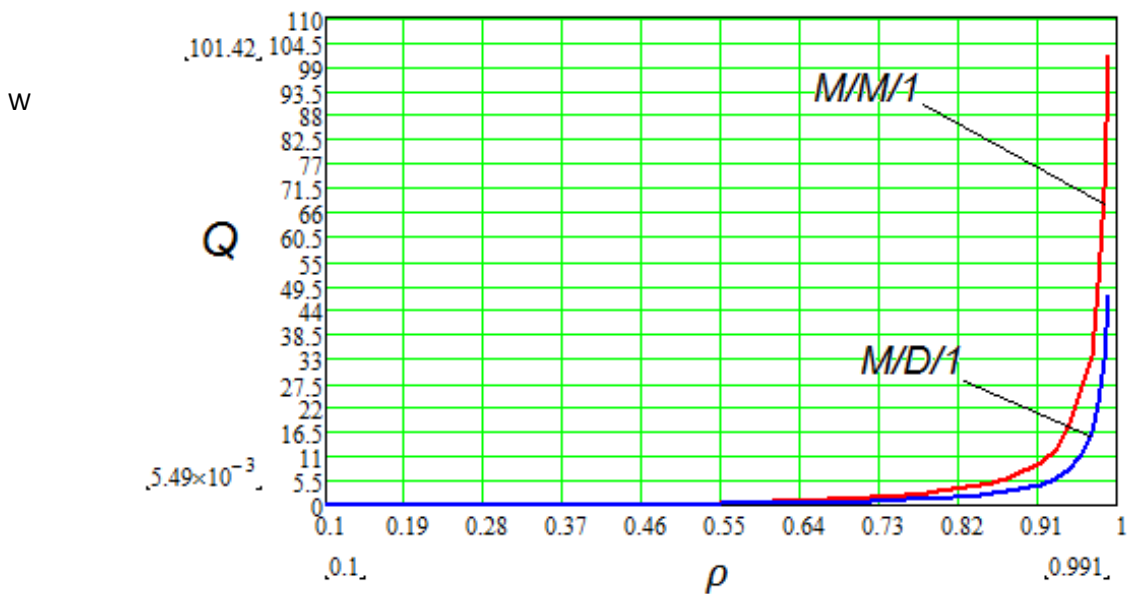


Рис. 2.35. Середня довжина черги, отримана при імітаційному моделюванні.

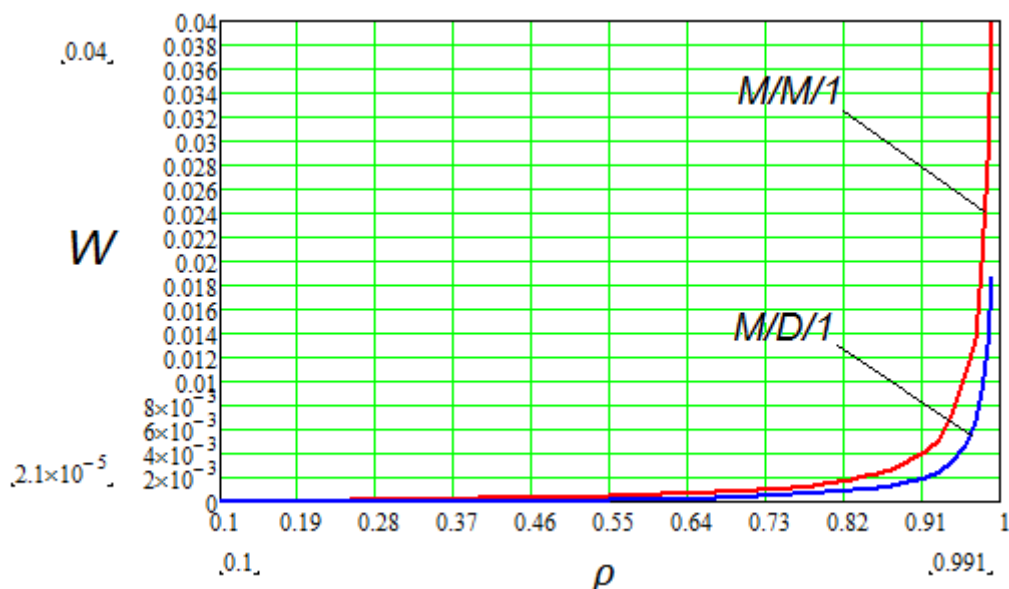


Рис. 2.36. Середній час очікування, отриманий при імітаційному моделюванні.

Порівняння отриманих результатів аналітичного та імітаційного методів моделювання показує, що результати є майже однаковими, лише деякі значення несуттєво відрізняються між собою.

2.5. Висновки до 2-го розділу.

1. Наведена класифікація властивостей трафіку мультисервісних мереж з визначеними ознаками самоподібності на різних рівнях моделі TCP/IP та законами розподілу ймовірностей вхідного потоку. Запропонована комплексна методика ідентифікації трафіку в інфокомунікаційних мережах, з використанням часо-частотного, статистичного і фрактального аналізів, дозволяє оцінити характеристики та отримати динамічну модель трафіку, що в свою чергу дало змогу адекватно підбирати алгоритми керування передаванням контенту в інфокомунікаційних мережах.

2. Проведено аналіз потоків трафіку, що передавався в мультисервісній мережі доставки контенту. Представлено розподіли інтенсивностей надходження потоків різних типів на обслуговуючий пристрій та визначено основні характеристики і властивості досліджуваних потоків.

3. Представлено підходи, які використовуються для визначення ступеню самоподібності мережевого трафіку. Опіраючись на результати проведених

досліджень мультимедійного трафіку інформаційної системи, можна стверджувати, що досліджуваний трафік є самоподібним. Використовуючи один з відомих методів аналізу самоподібного трафіку (R/S метод), визначено степінь самоподібності кожного із наявних мережевих потоків. Варто зауважити, що, при проведенні розрахунків, використовувались певні узагальнені формули, які дають розуміння залежностей необхідних величин від різних параметрів трафіку, проте, можуть давати похибки в отриманих результатах і можуть бути недостатньо адекватними для їх застосування.

4. Проведено математичне моделювання, використовуючи теорію масового обслуговування для визначення параметрів якості обслуговування. Підтверджено, що використання довільної методики обрахунку параметрів якості сервісу є недопустимим для мультисервісного трафіку, який володіє властивістю самоподібності. Запропоновано використання системи класу G/G/1, як базової, для розрахунку параметрів мультисервісного трафіку.

РОЗДІЛ 3

Моделювання та дослідження методів передавання контенту в безпроводних мережах доступу.

3.1. Безпроводні телекомунікаційні радіомережі з використанням технології когнітивного радіо.

Постійне удосконалення телекомунікаційних систем та покращення технологій безпроводного передавання інформації призводить до ускладнення методів використання та контролю обмеженим частотним ресурсом. При одночасному використанні одного діапазону частот для декількох передавачів виникають перешкоди, що призводять до значних спотворень переданої інформації. Також це значно ускладнює роботу телекомунікаційних систем різного призначення. Тому впровадження систем когнітивного радіо є одним з можливих рішень цієї проблеми [78].

У світовій практиці, зазвичай, певний частотний діапазон призначений для певної галузі на довгостроковій основі. Незважаючи на те, що більшість радіочастотного діапазону в даний момент вже розподілено, існує зростаючий попит на його використання, а виділені частоти не завжди використовуються ефективно, а здебільшого в міру необхідності. Тобто, велика частина діапазонів частот нерегулярно і неповністю завантажуються в просторовій та часовій областях, і можуть бути додатково використані.

Системи, що побудовані по принципах когнітивного радіо, враховують особливості сигналу від первинної мережі для співпраці з нею та використовують, не зайняті в даний час, частини спектру (так звані «спектральні діри») на вторинній основі. Проте, відсутність перешкод для первинної мережі є основним критерієм для таких систем.

Передовою технологією для забезпечення ефективного використання радіочастотного спектру є підхід до побудови системи когнітивного радіо, яку ще називають розумне радіо. Відмінними рисами когнітивного радіо є здатність адаптивно приймати і передавати сигнал для усіх прийомо-передавачів при

зміні вибраних радіочастот, а також можливість адаптивної зміни типу модуляції, типу кодування та інших параметрів системи [79].

Інтелектуальна комп'ютерна система керування, що використовується в системах когнітивного радіо, для роботи системи зв'язку, повинна збирати інформацію про радіосередовище і розвивати різні стратегії на основі наявної інформації. Когнітивна система радіозв'язку, під час навчання, повинна враховувати особливості діапазонів частот, що використовується або плануються використовуватися, а також повинна враховувати допустимі конфігурації наявного обладнання. Базові станції когнітивних систем повинні вміти динамічно визначати діапазон частот для доступу до мережі і наступного їх використання.

Когнітивна система являє собою радіо з механізмами самонавчання та керування, з різними рівнями можливості адаптації до змінних умов навколишнього радіосередовища. Дані механізми базуються на принципах постійного саморозвитку системи і штучного інтелекту.

При взаємодії з системою радіозв'язку, для когнітивної системи найважливішими критеріями є: аналіз результатів вимірювань і налаштування параметрів прийомо-передавачів (типу модуляції, параметрів модуляції, діапазону частот, і т.д.).

Особливостями системи когнітивного радіо визначають [80]:

1. Можливість отримання інформації про середовище радіозв'язку.
2. Здатність виконувати інтелектуальний аналіз інформації про стан радіосередовища.
3. Здатність адаптивно змінювати параметри системи телекомунікацій, при зміні параметрів радіосередовища, щоб забезпечити ефективне функціонування системи зв'язку.

3.1.1 Технологія когнітивного радіо

Когнітивне радіо (КР) – це радіосистема, що поєднує в собі набір методів і технік, які забезпечують можливість спільного використання спектру, шляхом

отримування та аналізу інформації про всі зміни в її робочому середовищі і може, відповідно до результатів аналізу, автономно та динамічно коригувати свої радіопараметри (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Цикл роботи когнітивного радіо.

В основі когнітивної радіомережі, за рахунок гетерогенної архітектури бездротової мережі і методів динамічного доступу до спектру, повинна забезпечуватися висока пропускна здатність для мобільних користувачів. Дана ціль може бути реалізована за допомогою ефективних динамічних методів управління використанням спектру. Власне, необхідність забезпечити виконання різноманітних вимог щодо якості обслуговування (QoS) для різних додатків, а також через часті швидкі зміни в доступності спектру, створює унікальні проблеми при проектуванні мереж когнітивного радіо, яке може змінити параметри передавача, базуючись на взаємодії з навколишнім середовищем. Двома основними характеристиками когнітивного радіо визначають:

- Реконфігурація – характеристика, завдяки якій, можуть бути вибрані найоптимальніші робочі параметри і найкращі частини спектру (когнітивне радіо може бути запрограмоване для передачі і прийому на різних смугах частот, в тому числі на несуміжних, а також для використання різних технологій доступу [81].
- Когнітивність – через взаємодію в реальному часі з навколишнім радіосередовищем проводиться ідентифікація ділянок спектру, які в

певний час та в певному місці не використовуються. Когнітивність дозволяє використовувати тимчасово незайняті смуги спектру, які називають «мертві зони» або «спектральні діри», як показано на рис.3.2. Таким чином може бути обрана найкраща смуга спектру для спільного використання з іншими користувачами та її використання без втручання в роботу ліцензованих користувачів.

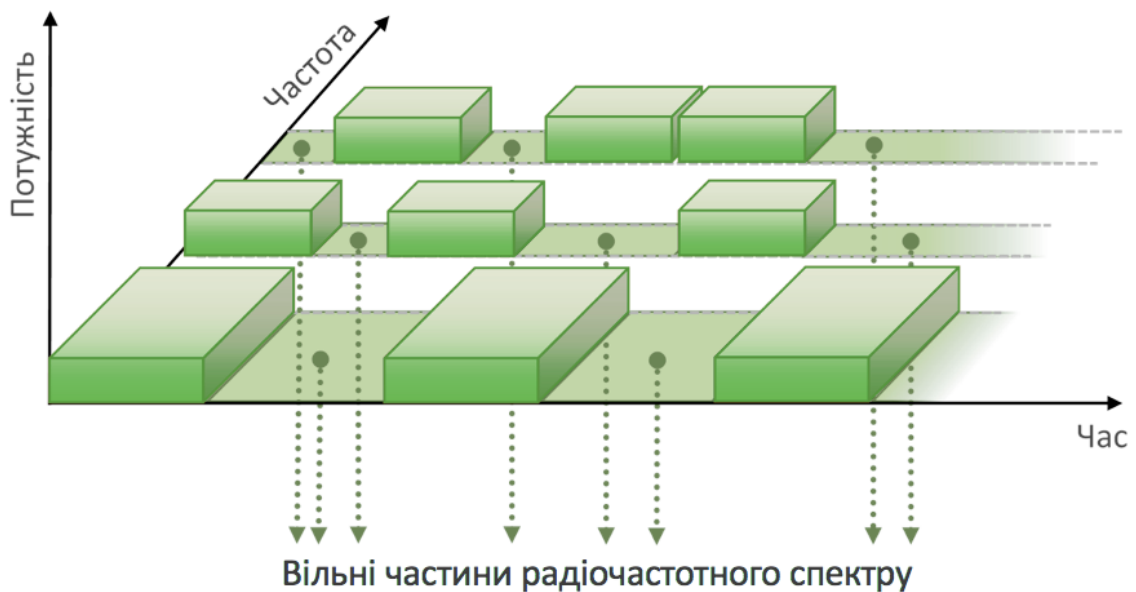


Рис. 3.2. Концепція вибору вільних частин спектру.

Для реалізації цих можливостей, технологія когнітивного радіо потребує нову архітектуру радіочастотного приймача (рис.3.3). Основними компонентами когнітивного радіо прийомо-передавача є блок обробки основної смуги частот і радіочастотний інтерфейс. Дані компоненти вже були запропоновані для роботи радіо з програмованими параметрами (Software Defined Radio, SDR).

Прийнятий сигнал посилюється у радіочастотному інтерфейсі, зміщується і відбувається аналого-цифрове перетворення (Analog to Digital, A/D). Сигнал модулюється або демодулюється у блоці обробки основної смуги частот. Для адаптації до мінливого в часі радіочастотного середовища кожен з компонентів може бути налаштований шиною керування.

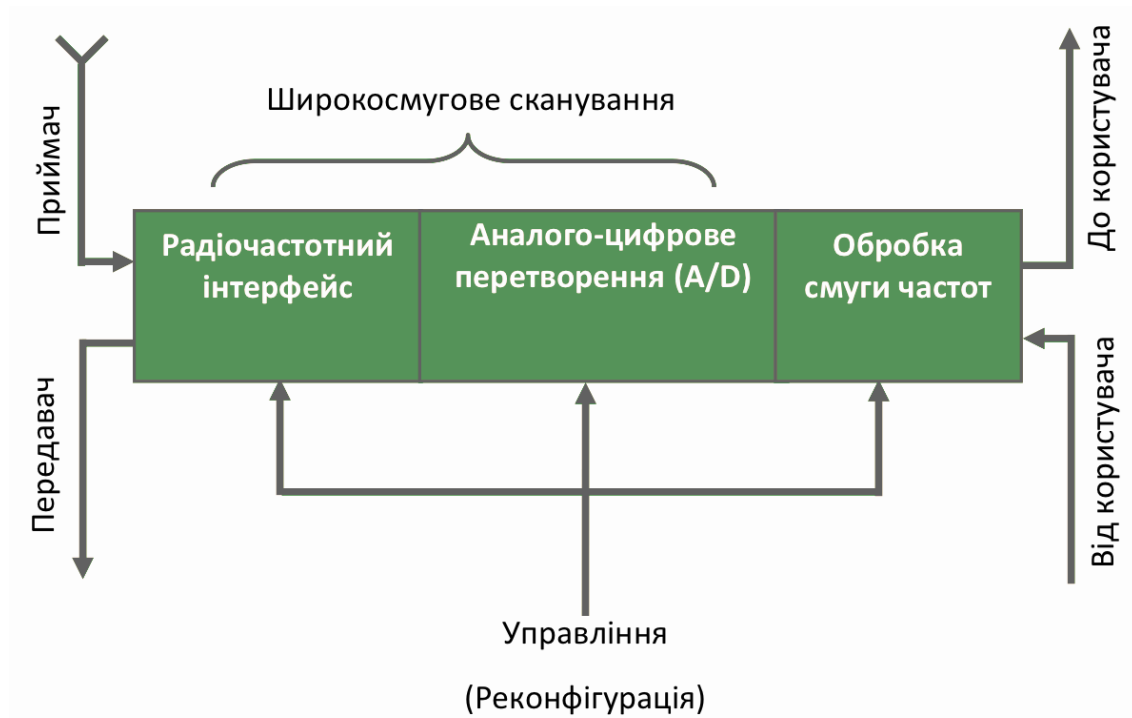


Рис. 3.3. Архітектура когнітивного радіо прийомо-передавача.

Новою властивістю когнітивного прийомо-передавача є широкопосмуговий радіочастотний інтерфейс, що може здійснювати одночасне сканування в широкому діапазоні частот. Цей компонент пов'язаний, головним чином, з такими радіочастотними апаратними технологіями, як: адаптивний фільтр, підсилювач потужності, широкопосмугова антена.

Загалом, радіочастотні апаратні засоби когнітивного радіо повинні налаштовуватися на будь-яку частину з широкого діапазону спектру. Основною проблемою в дизайні прийомо-передавача когнітивного радіо є потреба у можливості виявляти слабкий сигнал радіочастотним інтерфейсом у широкому динамічному діапазоні, оскільки приймач когнітивного радіо отримує сигнали від різних передавачів, що працюють на різних рівнях потужності, частотних смугах і з різних місць [82].

Радіосистема КР, так як і система SDR, повинна мати програмно-конфігуровану платформу, але відмінною особливістю КР є наявність когнітивного (інтелектуального) модуля (рис.3.4).

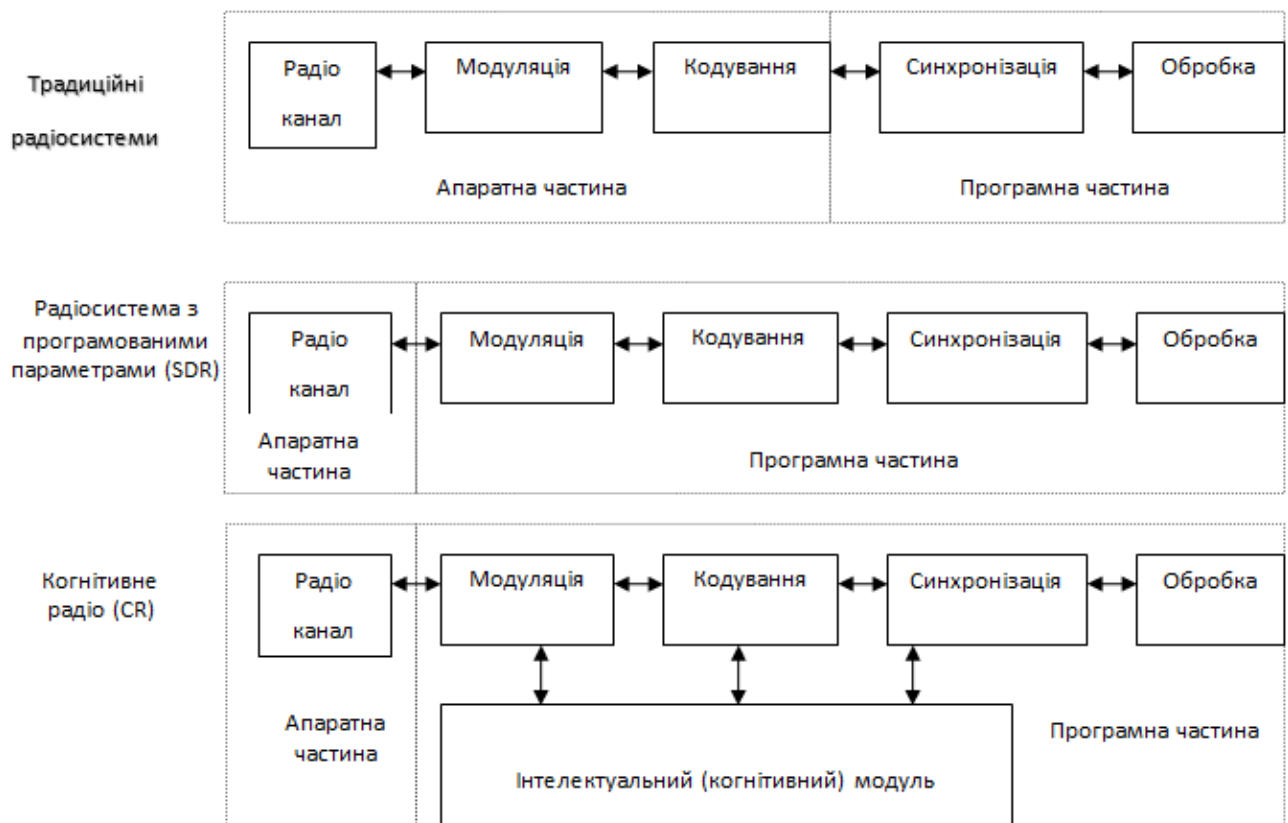


Рис.3.4. Порівняння традиційних радіосистем, радіосистем з програмованими параметрами (SDR) і когнітивного радіо (CR).

Властивість когнітивності по відношенню до радіосистеми (тобто здатності до пізнання і самонавчання), означає здатність вирішувати такі завдання:

- 1) здійснювати моніторинг спектру та виявляти частотні смуги, які не використовуються в даний момент часу;
- 2) аналізувати параметри радіоканалу, оцінювати передану по каналу інформацію та прогнозувати стан радіоканалу;
- 3) контролювати рівень потужності випромінювання та управляти процесом динамічного доступу до спектру.

КР повинне мати в своєму складі елементи, що дозволять формувати і обробляти радіосигнали для виконання цих функцій апаратно, які загалом можна назвати радіоплатформою з можливістю реконфігурації. Структурна схема КР, яке виконує ці функції, наведена на рис.3.5.



Рис.3.5. Функціональна структурна схема КР [83].

Елементами такої платформи є:

- модуль моніторингу спектру – елемент, який здійснює нагляд за радіочастотним спектром;
- когнітивний або інтелектуальний модуль – елемент, який здійснює аналіз результатів спостережень і навчання системи;
- модуль керування – елемент, який забезпечує нормативну керованість системи (відповідно до діючих цілей, правил і політики управління спектром);
- база даних – елемент, який накопичує знання і отримані відомості.

Для структурно-логічного опису принципів функціонування КР може використовуватися «цикл пізнання», який може бути представлений у вигляді кібернетичної моделі OODA (Observe – спостерігай, Orient – орієнтуйся, Decide

– вирішуй, Аст – дій), що передбачає багаторазове повторення циклу дій та формується чотирма послідовними взаємодіючими процесами.

Процес спостереження передбачає збір необхідної, для прийняття рішення, інформації, яка може бути отримана як від зовнішніх (датчики/сенсори КР та інші канали отримання інформації), так і від внутрішніх джерел (елементи зворотного зв'язку циклу).

Найвідповідальнішим та найскладнішим, з когнітивної точки зору, є наступний етап орієнтації, що складається з етапів аналізу та синтезу. Завдання розбиваються на елементарні складові, для яких в системі вже є план вирішення. Когнітивний модуль ідентифікує поточну ситуацію з існуючими відомими подіями і застосовує заздалегідь заготовлений план дій для такої ситуації. Потім ці елементарні складові об'єднуються в загальний план дій, який відповідає етапу синтезу. Новостворений план запам'ятовується з метою можливого подальшого використання. У випадку відсутності планів, з числа яких може бути вибрано рішення, процес залишається на етапі орієнтації і здійснюється подальша декомпозиція завдання на дрібніші складові.

На етапі ухвалення рішення здійснюється вибір найкращого плану за певними критеріями, або у випадку наявності єдиного варіанту – приймається рішення про його виконання/невиконання.

Заключний етап циклу передбачає дію практичну реалізацію прийнятого рішення (управління системою з метою покращення результатів спостереження в наступному циклі).

Класифікацію когнітивних радіосистем можна провести за такими критеріями:

- за методами пізнання, що використовуються;
- за функціональними параметрами;
- за типом основних каналів управління (обміну інформацією);
- за ступенем використання технологій штучного інтелекту.

За методами пізнання радіо середовища системи, КР діляться на дві категорії:

- 1) системи КР з пасивним пізнанням експлуатаційного радіо середовища.
- 2) системи КР з активним пізнанням експлуатаційного радіо середовища.

Залежно від набору функціональних параметрів, які враховуються при прийнятті рішення, можна виділити такі типи когнітивних радіосистем:

- повне когнітивне радіо («радіо Мітоли»), у якому всі можливі для спостереження параметри безпроводної мережі беруться до уваги;
- когнітивне радіо на основі аналізу спектру, в якому розглядається лише один параметр – зайнятість радіочастотного спектру.

3.1.2 Принципи побудови когнітивної радіомережі на основі OFDM

При огляді когнітивного радіо, значна увага приділяється використанню технології просторового рознесення MIMO (Multiple Input Multiple Output) та технології мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing), які забезпечують підвищення інформаційної ефективності та завадозахищеності[84]. Використання систем MIMO, за рахунок паралельної передачі декількох потоків інформації з різних антен, дає змогу досягти збільшення пропускної здатності (рис.3.6).

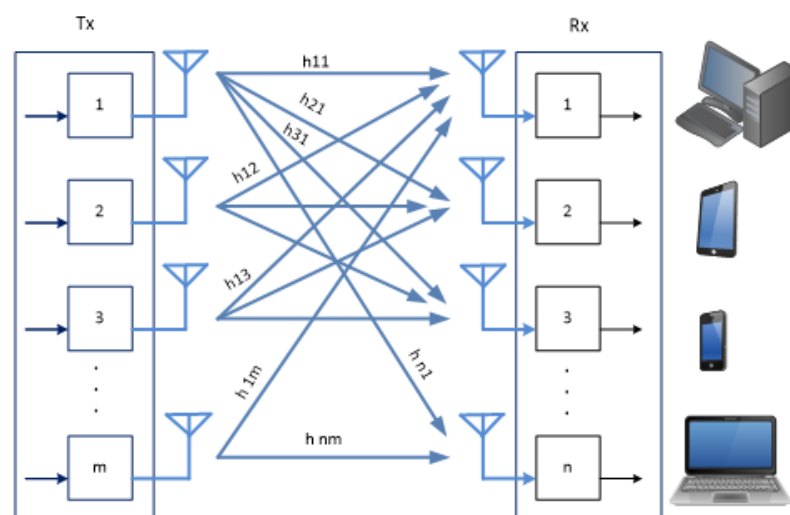


Рис.3.6. Технологія MIMO.

Технологія OFDM є методом модуляції сигналу та кодуванням цифрової інформації з використанням декількох несучих частот. Такий підхід може вирішити багато проблем, що виникають у високошвидкісних системах

комунікації. Саме для побудови когнітивної системи передавання даних пропонується використовувати OFDM-технологію [85]. Залежно від числа частот, що зайняті первинною мережею в певному місці, вона дозволяє гнучко керувати смугою пропускання сигналу, що передається, та покращити ефективність прийому даних в умовах багатопроменевого поширення[86]. OFDM визначенокращою технологією передавання для систем КР, завдяки своїм можливостям для сканування та вибору спектру, разом із гнучкістю та адаптивністю. До основних переваг використання OFDM в когнітивній радіосистемі належать:

- проста цифрова реалізація з використанням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ);
- зменшення ефекту дисперсії багатопроменевого поширення каналів, з якими стикаються системи із високими швидкостями передавання даних;
- стійкість проти вузькосмугових перешкод;
- висока спектральна ефективність завдяки майже прямокутному спектру частот для великої кількості піднесучих;
- гнучка програмна реалізація виділення спектральних піднесучих OFDM;
- можливість масштабування;
- відносна простота приймачів.

До недоліків слід віднести:

- потребу забезпечення точної часової і частотної синхронізації;
- вплив фазового шуму, викликаного недосконалістю передавача і приймача системи;
- наявність високого пік-фактору (відношення піку до середньої потужності), що вимагає застосування високолінійних підсилювачів.

Системи КР повинні мати можливість проводити вимірювання та аналіз отриманої інформації, відслідковувати значні зміни у стані навколишнього радіосередовища, швидким і ефективним способом знаходити та використовувати вільні частини спектру. Популярними алгоритмами сканування спектру є виявлення енергії, узгоджена фільтрація, спектральна

кореляція, виявлення на основі форми сигналу, які повинні забезпечити обізнаність когнітивних радіосистем [87]. Крім того, використання методу кооперативного сканування спектру може також збільшити гнучкість, скоротити час виявлення, а також вирішити проблему прихованого терміналу, затінення або багатопроменевого завмирання сигналу. Використовуючи ШПФ системи з використанням OFDM, здійснюють перетворення з часової області в частотну. Завдяки повторному використанні апаратних ядер ШПФ, всі точки в частотно-часовій площині робочого діапазону системи OFDM можуть бути відскановані без будь-яких додаткових розрахунків або апаратних засобів. Вибір доступних частин спектру для експлуатації (спектральних дір) може здійснюватися за допомогою простої перевірки гіпотез, використовуючи частотно-часову площину [88, 89, 90, 91]. У цих алгоритмах сканування спектру, наявність схеми ШПФ в системі з OFDM зменшує вимоги до обладнання. Також знижуються вимоги до обчислювальних ресурсів для алгоритму сканування спектру, оскільки приймач вже використовує ШПФ для прийнятого сигналу.

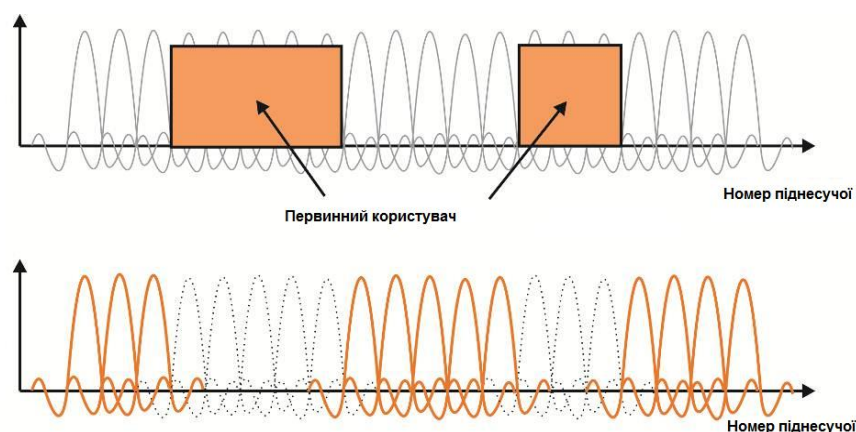


Рис.3.7. Формування спектру з використанням OFDM.

OFDM-символ – це група піднесучих, які являють собою цифровий паралельний потік бітів. Приклад виключення зайнятих частот із вибраного діапазону первинної мережі відбувається таким чином: $S(t)$ – комплексна огибаюча одного OFDM-символу, який пересилається в момент часу t_k , має вигляд [92]:

$$\dot{s}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \dot{d}_i e^{j2\pi \frac{i(t-t_k)}{T}} ; t_k \leq t \leq t_k + T, \quad (3.1)$$

де d_i – комплексне число, що представляє амплітуду і початкову фазу i -ї піднесучої OFDM-сигналу;

n – число піднесучих коливань в OFDM-символі.

Якщо відомо, які діапазони частот використовуються первинною мережею, і якщо на них неможливо передавати дані вторинної мережі, необхідно виключити передачу на тих піднесучих, що збігаються із забороненими частотами. Якщо для цього потрібно виключити передачу на i -й частоті первинної мережі, відповідно до (3.1), при формуванні OFDM-символу, d_i потрібно прирівняти до нуля. Наприклад, якщо потрібно виключити передачу на 2, 3 і 5-й частотах, тоді відповідно потрібно $d_2 = d_3 = d_5 = 0$.

Щоб уникнути втрати інформації в процесі обнулення піднесучих, оскільки загальна швидкість передавання даних вторинної мережі зменшується пропорційно кількості виключених піднесучих, потокова бітова швидкість на вході QAM-модулятора має бути узгоджена з наявними частотними ресурсами. Завдання управління бітовим потоком швидкості вирішується на транспортному рівні [93].

3.2. Імітаційна модель когнітивної радіосистеми для оцінки пропускної здатності радіоканалів.

Пропонується модель когнітивної мережі, в якій первинна (ліцензійна) мережа представляє собою одну з комірок системи LTE, де працюють декілька мобільних операторів на різних виділених частотних смугах. Дана комірка накладається з вторинною/неліцензійною мережею, що працює в таких смугах частот (рис. 3.8, 3.9) [94]:

- LTE Band 1 FDD (1920-1980 МГц і 2110-2170 МГц);
- LTE Band 3 FDD (1710-1785 МГц і 1805-1880 МГц);
- LTE Band 39 TDD (1880-1920 МГц);
- LTE Band 40 TDD (2300-2400 МГц);

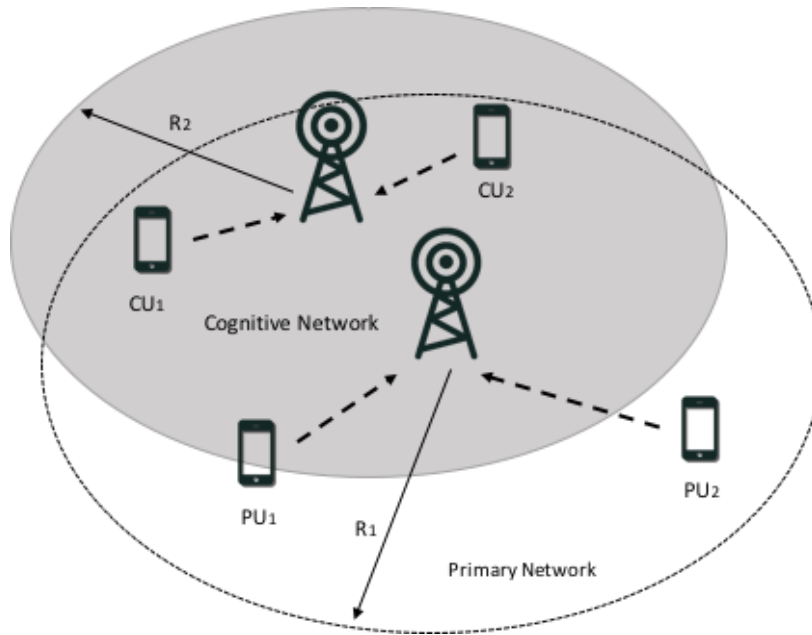


Рис. 3.8. Принцип взаємодії первинної та вторинної когнітивної мережі.

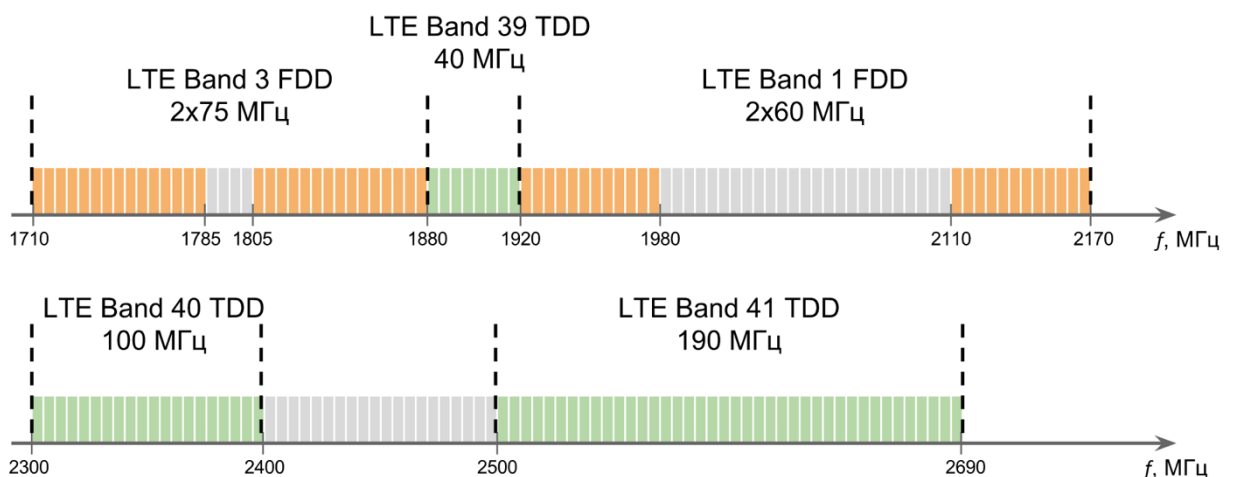


Рис. 3.9. Розподіл частотного спектру між первинною і вторинною мережами.

Структура організації даних когнітивної радіомережі, що використовує OFDM, визначається так: у часовій області дані організовані у комірки (кадри) тривалістю 10 мс, а кожна з цих комірок буде складатися з десяти суб-комірок (підкадрів) тривалістю 1 мс, які, в свою чергу, розділені на два слоти по 0,5 мс. В частотній області дані згруповані в групи по 12 частот, кожна з яких займає частотний діапазон в 15 кГц, що дає, в цілому, смугу 180 кГц. Група з дванадцяти піднесучих частот, тривалістю в один слот, називається ресурсним блоком (РБ, Resource Blocks, RB). Найменшою одиницею ресурсу є одна

піднесуча, тривалістю в один слот, яка називається ресурсним елементом (RE, resource element, RE). В залежності від типу захисного інтервалу (нормальний або розширений), ресурсний блок складається з 84 або 72 ресурсних елементів відповідно. Ресурсний елемент, в залежності від способу модуляції, може включати в себе два біти для QPSK, 4 біти для 16QAM і 6 бітів для 64QAM [95].

Згідно зі специфікаціями 3GPP, ширина каналу в мережі LTE може бути 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 МГц[96]. Доступний діапазон розбивається на ресурсні блоки. Очевидно, що швидкість передавання даних буде залежати від ширини каналу. Значення кількості доступних ресурсних блоків, в залежності від ширини каналу, наведено в табл.3.1. Для даної моделі когнітивної радіомережі використано ширину одного радіоканалу 10 МГц, що забезпечує 50 РБ.

Таблиця 3.1. Кількість ресурсних блоків в залежності від ширини каналу

	Ширина каналу, МГц					
	1.4	3	5	10	15	20
К-сть ресурсних блоків, N_b	6	15	25	50	75	100

Згідно цих даних, можна обчислити максимальну теоретичну ємність однієї базової станції CR, розташованої в первинній мережі LTE. Загальну кількість ресурсних блоків можна визначити як:

$$N_{RB} = (N_{band_1} + N_{band_3} + N_{band_39} + N_{band_40}) * N_b. \quad (3.2)$$

Таким чином, число ресурсних блоків, для даного випадку, складатиме:
 $N_{RB} = (14 + 12 + 4 + 10) * 50 = 2000$ ресурсних блоків.

Швидкість передавання даних визначається за формулою[97]:

$$C_{max} = N_{RB} * N_{RE} * n_{mod} / t_{slot}. \quad (3.3)$$

Якщо використовується 64QAM модуляція із стандартним захисним інтервалом, то кожен з 2000 РБ складається з 84 РЕ, кожен з яких містить 6 бітів інформації, а тривалість ресурсного елемента – 0,5 мс. Відповідно, швидкість складатиме: $C_{max} = 2000 * 84 * 6 / 0.5 * 10^{-3} = 1968.75$ Мбіт/с.

Фактична ефективна швидкість передавання є нижчою, оскільки дане обчислення враховує всі передані біти, в тому числі і контрольні біти корекції помилок системи (FEC), біти контролю інформації, що передані базовою станцією, і не береться до уваги число зайнятих частотних каналів первинним користувачем.

Результати наближеної оцінки пропускної здатності когнітивної радіомережі, для різних технік модуляції та різних типів корекції помилок, наведено у табл. 3.2-3.4. Крім цього, робилось припущення, що всі робочі частоти, в первинній мережі оператора LTE, постійно зайняті первинними користувачами, і не брались до уваги умови радіосередовища та вимоги користувачів CR.

Таблиця 3.2. Пропускна здатність при використанні QPSK 1/2

		C _{max} , Мбіт/с					
		Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6
Nop=1		314.58	311.94	309.3	306.65	304	301.36
Nop=2		311.94	306.65	301.36	296.08	290.79	285.5
Nop=3		309.3	301.36	293.43	285.5	277.57	269.64

Таблиця 3.3. Пропускна здатність при використанні 16QAM 3/4

		C _{max} , Мбіт/с					
		Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6
Nop=1		943.76	935.83	927.90	919.97	912.03	904.11
Nop=2		935.83	919.97	904.11	888.25	872.38	856.52
Nop=3		927.90	904.11	880.31	856.52	832.73	808.94

Таблиця 3.4. Пропускна здатність при використанні 64QAM 4/5

		C _{max} , Мбіт/с					
		Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6

Nop=1	1572.93	1559.71	1546.50	1533.28	1520.06	1506.85
Nop=2	1559.71	1533.28	1506.85	1480.41	1453.97	1427.53
Nop=3	1546.50	1506.85	1467.19	1427.53	1387.88	1348.23

Пропонується створити математичну імітаційну модель існуючої системи, щоб визначити ефективну ємність обраної системи.

Для визначення ефективної ємності пропонується математична імітаційна модель, яка імітує спільну роботу первинної і вторинної когнітивної мережі. Первинна мережа представлена однією LTE коміркою, де співпрацюють три мобільні оператори з різною кількістю робочих частот. Користувачі первинної мережі з'являються випадковим чином, згідно експоненціального розподілу, з інтенсивністю подій $\lambda = N_{\max PU} / T_{PU}$, де $N_{\max PU}$ – очікуване максимальне число первинних користувачів, T_{PU} – середня тривалість виклику. Кожен первинний користувач належить одному з трьох операторів мобільного зв'язку, займає частотний канал $N_{ch i}$ на час $T_{ac i}$ та отримує відповідні послуги.

Вторинна когнітивна мережа надає мультисервісні послуги. Новий вторинний користувач з'являється випадковим чином і належить до одного з трьох типів з відповідними параметрами якості (табл. 3.5) [98].

Таблиця 3.5. Параметри якості моделювання для різних типів послуг

Тип трафіку	Пріоритет	Ймовірність генерування $P_{tr gen}$	Сер. час передачі T_{av} , сек	Сер.швидкість передачі C_{av} , Кбіт/с
Service	1	0.5	1	64
Real-Time	2	0.15	300	2048
Best Effort	3	0.35	60	512

Блок-схема імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею наведена на рис.3.10.

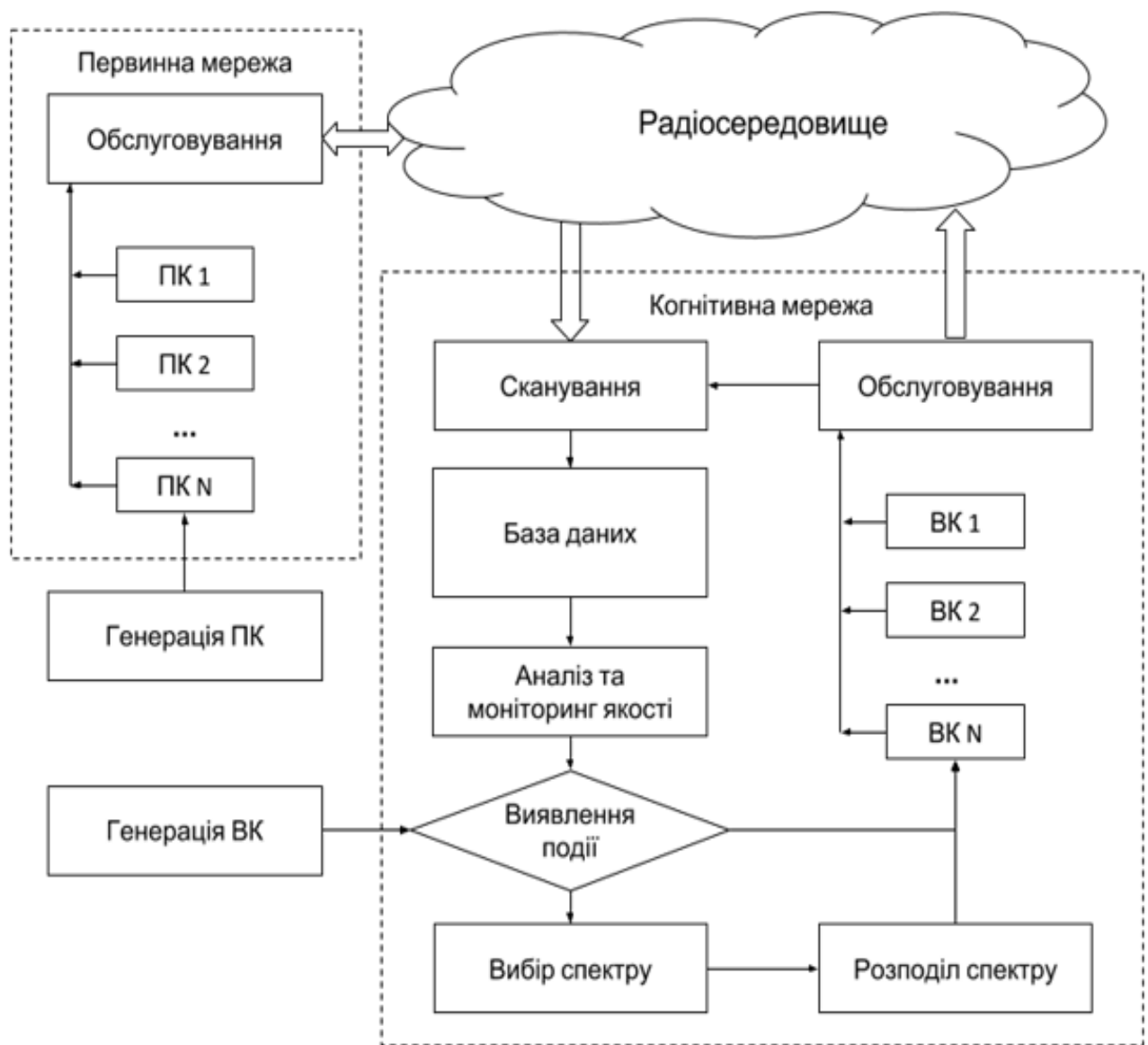


Рис. 3.10. Блок-схема імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею.

Блок-схема алгоритму реалізації моделі первинної мережі зображена на рис.3.11. Когнітивна мережа працює за алгоритмом:

1. На початковому етапі здійснюється сканування смуг спектру для виявлення доступних радіочастотних каналів і визначення їх параметрів якості. В результаті, отримується масив даних із значенням сканування для кожного частотного каналу, який передається до бази даних, де він зберігається протягом тривалого часу.

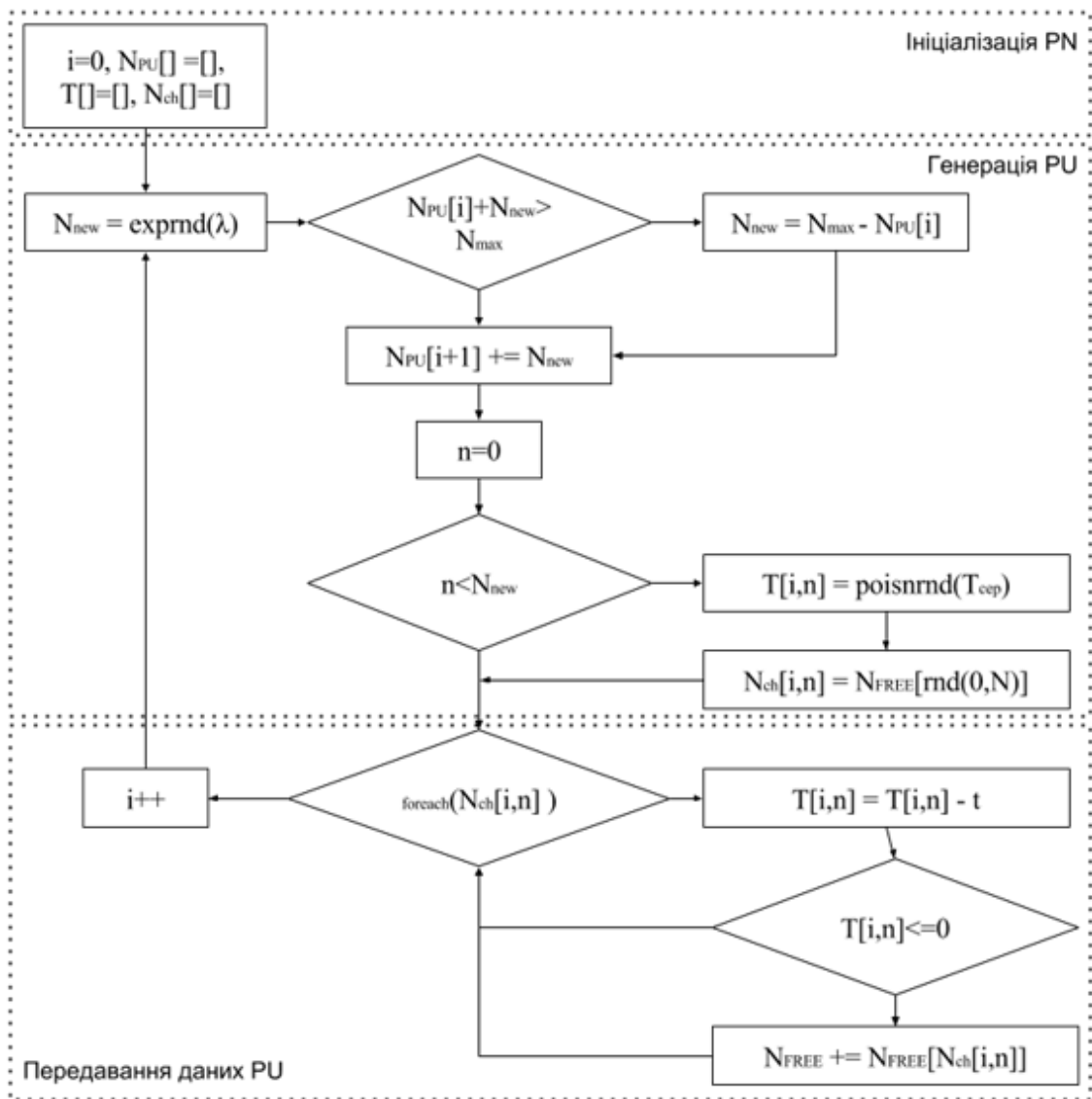


Рис. 3.11. Блок-схема алгоритму реалізації моделі первинної мережі.

2. Отримані дані аналізуються та проводиться обрахунок статистичних параметрів, моніторинг якісних параметрів та прогнозування майбутнього стану кожного частотного радіоканалу.

3. На основі проведеного моніторингу визначається присутність однієї або кількох подій:

- Поява первинного користувача: коли первинний користувач з'являється в певній смузі, всі користувачі CR, що використовували цю частину спектру, повинні переміститися до нових смуг;

- Поява CR користувача: коли новий користувач CR з'являється в мережі CR, йому має бути призначена нова смуга спектру для його наступного обслуговування;
- Погіршення якості каналу: коли стан каналу погіршується, користувач CR повинен переключитися на інший радіоканал з кращою якістю.

Звільнення радіоканалу: коли первинний або когнітивний користувач завершує передавання інформації, він звільняє канал, що використовувався. В такому випадку, даний канал може бути використаний іншим користувачем CR, якщо є потреба.

4. Коли хоча б одна подія виявлена, тоді мережа CR переналаштовує свій розподіл ресурсів для підтримки якості обслуговування. У разі короткострокових змін каналу, таких, як різке завмирання, - мережа CR перерозподілить ресурси в межах діапазону спектру, за допомогою розподілу використання спектру. Якщо основний користувач реєструється або поточна смуга спектру не може забезпечити задану якість обслуговування на довгостроковий період з урахуванням поточних умов спектру, менеджер ресурсів визначає, чи мережа CR приймає нового вхідного користувача CR, чи ні. Якщо новому користувачу CR дозволено передавати, йому присвоюються відповідні смуги спектру під час вибору каналу.

5. Відбувається передача даних користувачами CR.

Відношення сигнал/шум і рівень перешкод розраховується для кожного вторинного користувача в залежності від їхнього місця розташування. Тоді визначається техніка модуляції, тип корекції помилок (FEC) (табл. 3.6) і визначається кількість та номери частотних каналів, що призначаються кожному вторинному користувачу на момент передачі. Заключний етап - розрахунок загальної пропускної здатності для всіх користувачів.

Таблиця 3.6. Параметри якості для різних типів модуляції

Тип модуляції	FEC	SINR, дБ	IM, дБ	Dmax, км
QPSK	1/2	2	2,5	3

16QAM	3/4	12,2	3	1,4
64QAM	4/5	18,6	4	0,7

Моделювання було проведено для різної кількості частот в одному секторі з наявністю первинних користувачів одного, двох або трьох операторів мобільного зв'язку. Експериментальні результати моделювання відображаються в таблиці 3.7 і графічно на рис. 3.13.

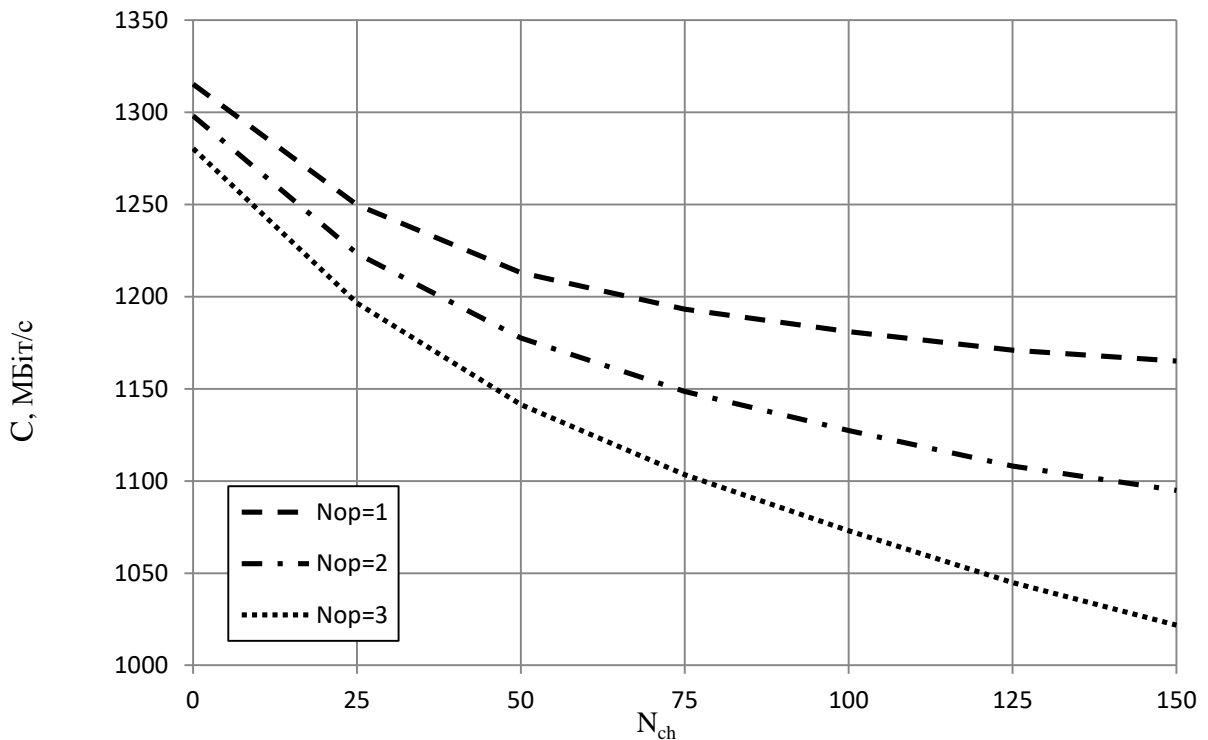


Рис. 3.13. Залежність пропускної здатності мережі (C), для різної кількості операторів мобільного зв'язку (N_{op}), від кількості робочих частот (N_{ch}).

Таблиця 3.7. Пропускна здатність при різній кількості робочих частот

NPU	Nop		
	1	2	3
0	1315.24	1298.13	1280.49
25	1249.84	1223.42	1196.49
50	1213.01	1177.50	1141.51
75	1193.14	1148.52	1103.41

	100	1181.09	1127.31	1073.06
	125	1171.00	1108.17	1044.85
	150	1165.11	1094.91	1021.83

3.3. Вибір спектру та імітаційна модель оцінювання ефективності методів вибору спектру

Когнітивні радіомережі потребують можливості проводити порівняння і приймати рішення, які з доступних в даний момент радіочастотних каналів є найкращими відповідно до вимог по якості (QoS). Цей процес являє собою надзвичайно важливу тему для дослідження в мережах КР і називається вибором спектру. Процес вибору спектру тісно пов'язаний з діяльністю первинних користувачів і характеристиками радіочастотних каналів. А також, вибір спектру залежить від активності когнітивних користувачів мережі КР.

3.3.1. Методи вибору ділянок спектру

Методи когнітивного радіо покращують ефективність використання спектру, що дозволяє низько пріоритетним вторинним користувачам тимчасово використовувати високо пріоритетні ліцензовані частини спектру первинних користувачів, які в даний момент простоюють (Рис.3.14) [99, 100, 101]. Проте, вторинні користувачі повинні звільнити займаний канал, як тільки первинні користувачі сформуvalи дані для передачі саме по цьому каналу, оскільки первинні користувачі мають вищий пріоритет доступу до каналу передачі. Для того, щоб забезпечити надійну передачу для вторинних користувачів, стартує процедура пошуку смуг спектру для обслуговування, яка повинна допомогти вторинному користувачу повернути займаний канал первинному користувачу, а самому відновити передачу на іншому каналі або на тому ж каналі, але вже після завершення передачі даних первинного користувача [102].

Вибір спектру є важливим процесом в мережах когнітивного радіо, який надає можливість вторинному користувачеві вибрати найкращий канал з

доступних в даний момент каналів-кандидатів для передачі даних (Рис.3.14). Для того, щоб рівномірно розподілити навантаження трафіку від вторинних користувачів по цих каналах-кандидатах, система прийняття рішень і вибору спектру повинна ефективно опрацьовувати статистику завантаження кожного каналу, як первинними користувачами, так і вторинними користувачами.

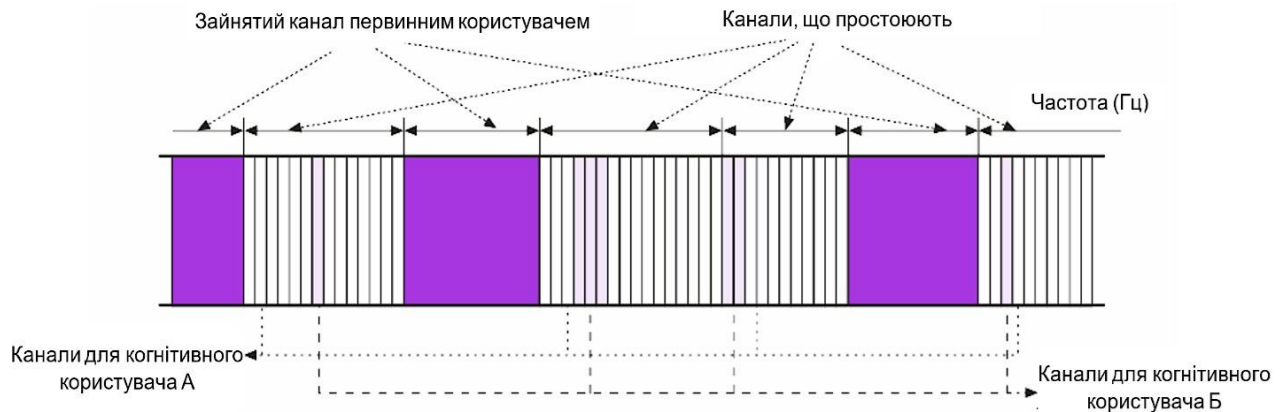


Рис. 3.14. Приклад мультиканального вибору спектру у когнітивних радіомережах.

Пропонується провести оцінювання якості для різних методів вибору спектру на основі показника тривалості прийняття системою рішення про перерозподіл каналів вторинного з'єднання. Ця тривалість визначається, як час від моменту запиту на передавання даних користувачем вторинної мережі до моменту початку передачі[103].

Тривалість перерозподілу каналів вторинного з'єднання залежить від кількості помилок сканування, таких, як помилкове виявлення або не виявлення первинного користувача, залежить від кількості створених первинними користувачами переривань, і від продуктивності самого каналу. Тому за час одного вторинного з'єднання, може здійснюватися декілька процесів передавань смуг спектру через переривання від первинних користувачів. Зрозуміло, що чим більша кількість перемикань каналу, тим більша величина тривалості перерозподілу каналів [104]. Також, коли детектор помилково повідомляє про наявність первинного користувача, виникає помилкова тривога. У такі моменти, зростає тривалість перерозподілу каналів для з'єднання

когнітивного користувача, оскільки помилково вважається, що цей канал зайнятий, тому його не можуть використовувати, навіть, якщо він неактивний насправді. А колізія даних основного користувача і вторинного користувача відбувається, коли первинного користувача помилково не виявлено, що призводить до повторної передачі і до зростання тривалості перерозподілу каналів для з'єднання вторинних користувачів. Крім того, різні канали можуть мати різну продуктивність і швидкість передачі даних, що призводить до різного часу обслуговування і прямо впливає на тривалість перерозподілу каналів для вторинних користувачів.

Загалом, методи вибору спектру можна класифікувати за двома категоріями: методи без балансування навантаження і методи з балансуванням навантаження. Методи з балансуванням навантаження можна розділити також на два варіанти: метод на основі оцінювання ймовірності зайняття та метод на основі сканування параметрів каналу.

- Вибір спектру без балансування навантаження – метод, при якому вторинний користувач може вибрати свій робочий канал, базуючись на одному або декількох параметрах каналу, наприклад: завантаженість каналу, ймовірності того, що канал перебуває в режимі простою, час очікування, час перебування в режимі простою або продуктивність каналу [105].
- Вибір спектру на оцінювання ймовірності зайняття каналу – цей метод працює з використанням балансування навантаження вторинних користувачів одразу в декількох каналах когнітивної радіомережі по параметрах ймовірності зайняття каналу, ймовірності вибору каналу, ймовірності переривання у каналі і т.д.
- Вибір спектру на основі сканування параметрів каналу – цей метод потребує попереднього сканування всіх каналів-кандидатів, щоб знайти найбільш вдалий робочий канал. У даному методі основним параметром, що впливає на тривалість системного часу, є кількість робочих каналів.

3.3.2. Управління радіочастотним спектром та імітаційна модель процесу оцінювання ефективності методів вибору спектру

Блок-схема алгоритму реалізації методу управління радіочастотним спектром в когнітивній безпроводній мережі зображена на рис.3.15.

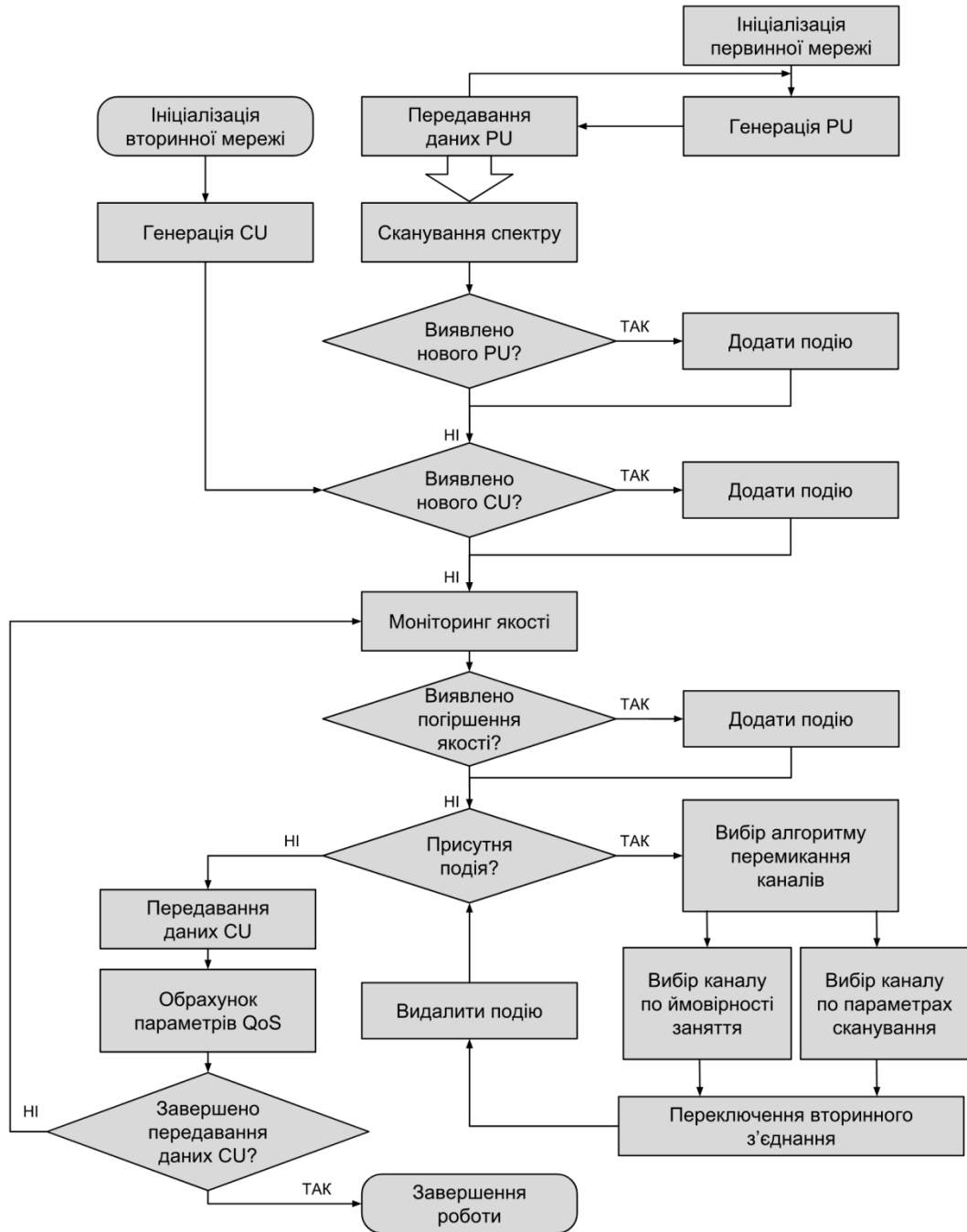


Рис. 3.15. Блок-схема алгоритму реалізації методу вибору радіочастотного каналу в когнітивній безпроводній мережі.

Спочатку, когнітивні користувачі повинні розпочати процес сканування спектру, для виявлення первинних користувачів. Когнітивний користувач може займати поточний часовий слот каналу для передачі даних, якщо він в даний момент порожній. Але, якщо канал зайнятий первинним користувачем, когнітивний користувач повинен провести новий вибір радіочастотного каналу для продовження текучої передачі [106].

На рис.3.16 наведено модель процесу оцінювання ефективності методів вибору спектру для різних алгоритмів перемикавання каналів. Запропонована модель базується на основі спрощеної загальної моделі когнітивної радіомережі, описаної вище [107, 108]. За допомогою використання цієї моделі, для різних алгоритмів перемикавання каналу, буде проведено оцінювання тривалості перерозподілу каналів для вторинного з'єднання. Кожне з'єднання, як первинне, так і вторинне, являє собою процес надходження пакетів з різною інтенсивністю, розподіленою по закону Пуассона [109]. Отже, позначимо середню інтенсивність надходження пакетів для k -го каналу первинного з'єднання як $\lambda_p^{(k)}$, а λ_s – середню інтенсивність надходження пакетів вторинного з'єднання когнітивної радіомережі. $L_p^{(k)}$ – розмір даних в бітах на пакет для k -го каналу первинного з'єднання, а відповідну функцію розподілу ймовірності $f_p^{(k)}(l)$. L_s – розмір даних для вторинного з'єднання із функцією розподілу ймовірності $f_s(l)$.

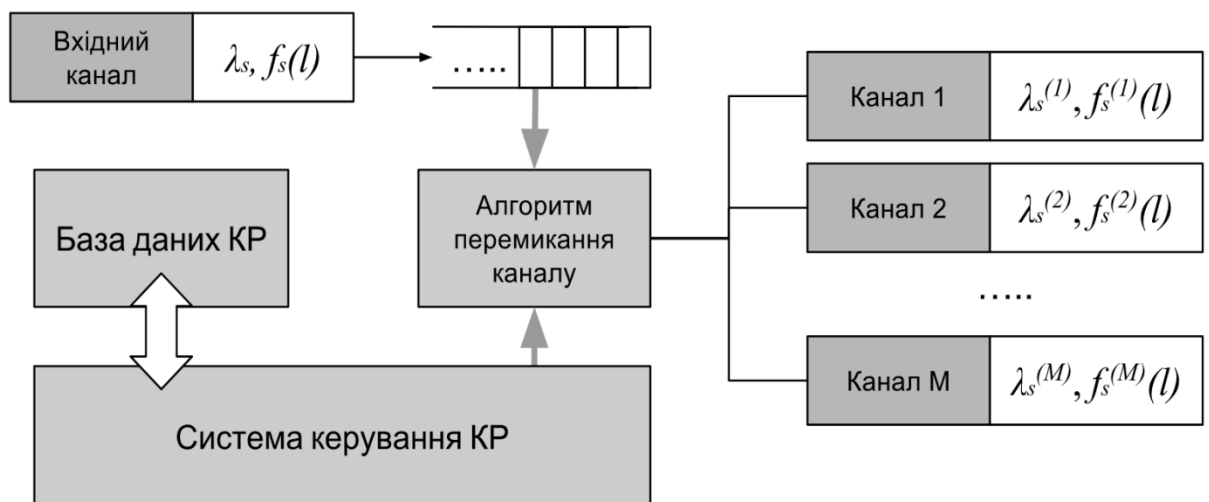


Рис.3.16. Модель процесу оцінювання ефективності методів вибору спектру для різних алгоритмів перемикавання каналу.

Тривалість перерозподілу каналів (S) є важливою метрикою якості обслуговування (QoS) для оцінки ефективності з'єднання вторинних користувачів. Він складається з тривалості очікування (W) і тривалості доставки даних (T). Таким чином [110]:

$$E[S] = E[W] + E[T], \quad (3.4)$$

де $E[x]$ є функцією математичного очікування величини x .

Тут час очікування визначаємо, як тривалість від моменту, коли запит на передачу даних надходить в систему, до моменту запуску передачі даних. Тривалість очікування залежить від алгоритму переключення каналу, що вибраний вторинними користувачами. Блок-схеми алгоритмів реалізації методу вибору частотного каналу, на основі оцінювання ймовірності зайняття каналу та на основі сканування параметрів каналу, наведені на рис. 3.17 та 3.18.

Тривалість доставки даних визначається, як тривалість від початку пересилання даних з першим часовим інтервалом, до моменту завершення передавання даних з останнім часовим інтервалом. Очевидно, що кількість подій передавання обслуговування суттєво впливає на тривалість часу доставки даних. Відповідно до (3.4), тривалість перерозподілу каналів, для алгоритму вибору каналу на основі оцінювання ймовірності зайняття визначається як:

$$E[S_{pb}] = E[W_{pb}] + E[T_{pb}]. \quad (3.5)$$

Тривалість перерозподілу каналів, для алгоритму вибору радіоканалу на основі сканування його параметрів визначається як:

$$E[S_{sb}] = E[W_{sb}] + E[T_{sb}]. \quad (3.6)$$

Завдання мінімізації тривалості перерозподілу каналів, для алгоритму вибору радіоканалу на основі оцінювання ймовірності його зайняття можна розв'язати так:

$$p = \arg \min E[S_{pb}(p_{pb})]. \quad (3.7)$$

$$0 \leq p_{pb}^{(k)} \leq 1, \quad \forall k \in \Omega,$$

де $\Omega = \{1, 2, \dots, M\}$ набір можливих каналів-кандидатів;

$E[S_{pb}]$ – тривалість перерозподілу каналів для вторинного з'єднання.

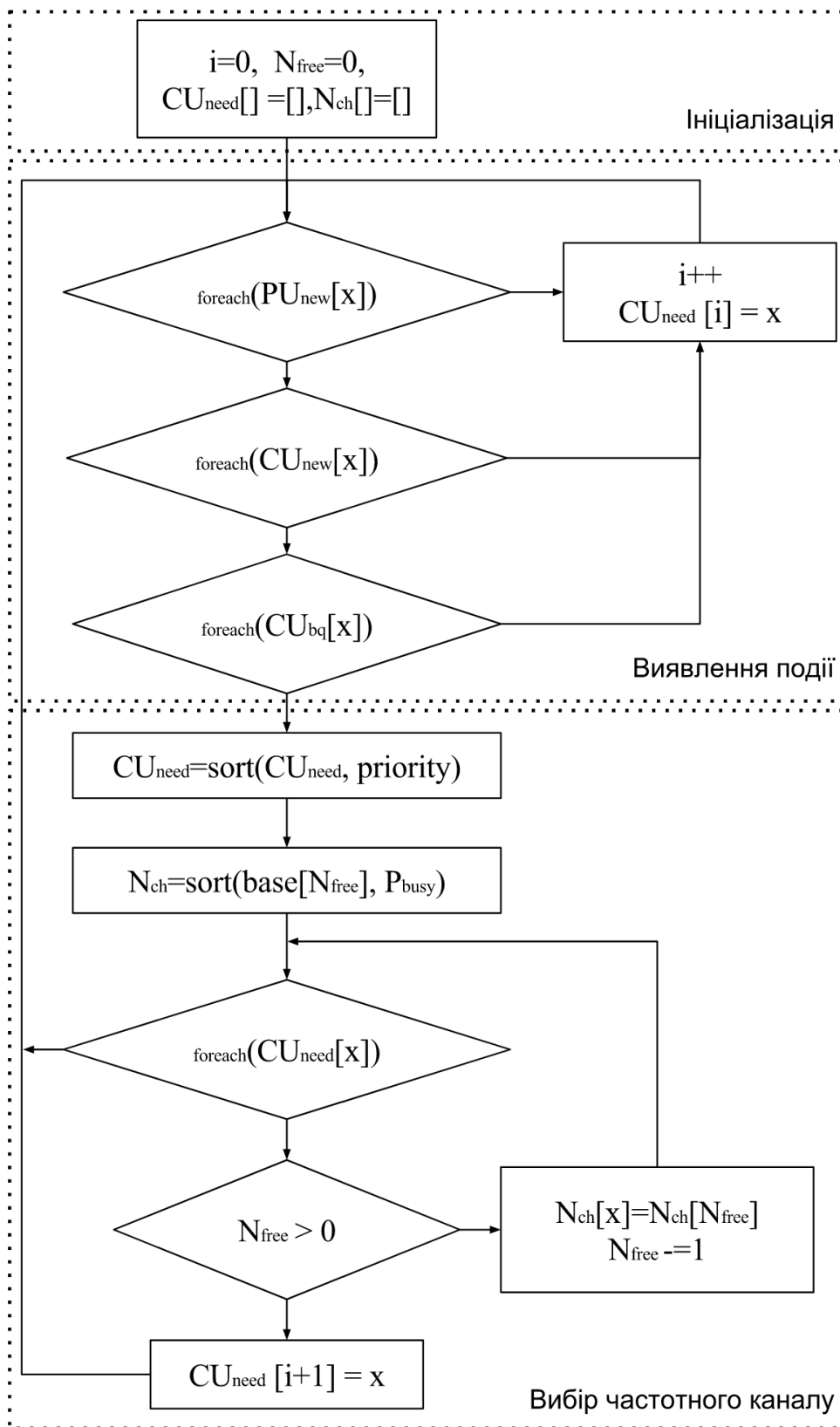


Рис.3.17. Блок-схема алгоритму реалізації методу вибору частотного каналу на основі оцінювання ймовірності зайняття каналу.

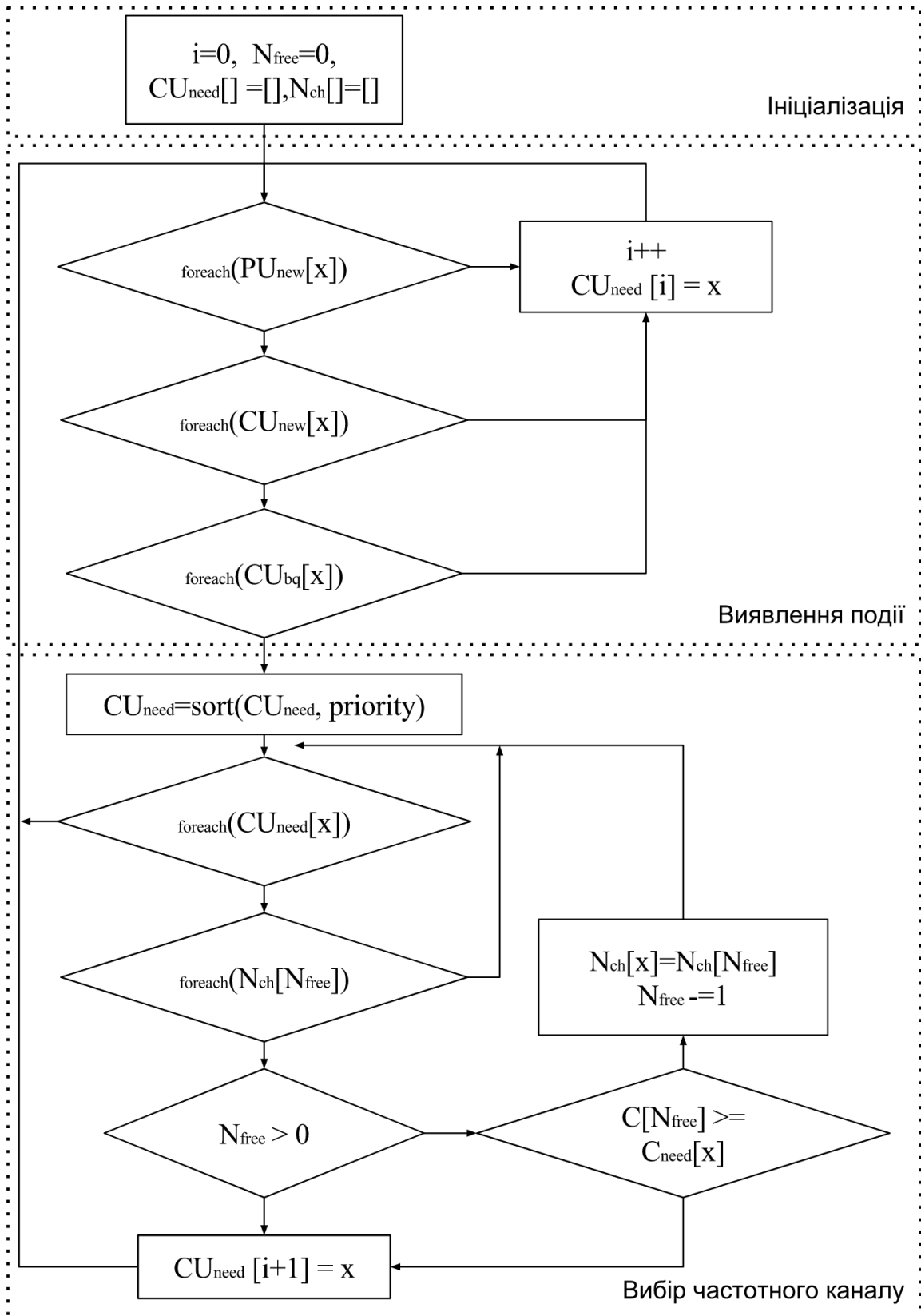


Рис.3.18. Блок-схема алгоритму реалізації методу вибору частотного каналу на основі сканування параметрів каналу.

$$\sum_{k \in \Omega} p_{pb}^{(k)} = \sum_{k=1}^M p_{pb}^{(k)} = 1, \quad (3.8)$$

$$p^{(k)} = p_p^{(k)} + p_s^{(k)} < 1, \quad (3.9)$$

де $p_p^{(k)}$ – це ймовірність зайняття k -го каналу первинним користувачем;

$p_s^{(k)}$ – це ймовірність зайняття k -го каналу вторинним користувачем;

$p^{(k)}$ – це ймовірність зайнятості k -го каналу [111]:

$$p_p^{(k)} = \lambda_p^{(k)} E[X_p^{(k)}], \quad (3.10)$$

$$p_s^{(k)} = \lambda_s^{(k)} E[X_s^{(k)}], \quad (3.11)$$

Тривалість доставки даних вторинним користувачем для k -го каналу позначимо, як $T^{(k)}$ [112].

$$E[T^{(k)}] = E[X_s^{(k)}] + E[N^{(k)}]E[Y_p^{(k)}], \quad (3.12)$$

де

$$E[N^{(k)}] = \lambda_p^{(k)} E[X_p^{(k)}]. \quad (3.13)$$

$$E[Y_p^{(k)}] = \frac{E[X_p^{(k)}]}{1 - \lambda_p^{(k)} E[X_p^{(k)}]}. \quad (3.14)$$

Для алгоритму вибору каналу, на основі оцінювання ймовірності його зайняття, середню тривалість доставки даних можна розрахувати, як:

$$E[T_{pb}] = \sum_{k=1}^M p_{pb}^{(k)} E[T^{(k)}]. \quad (3.15)$$

$$E[W_{pb}^{(k)}] = \frac{E[R^{(k)}]}{(1 - p_p^{(k)})(1 - p_p^{(k)} - p_s^{(k)})}, \quad (3.16)$$

де $E[R^{(k)}]$ – це тривалість простою системи після завершення з'єднання в k -му каналі. Базуючись на [113]:

$$E[R^{(k)}] = \frac{1}{2} \lambda_p^{(k)} E[(X_p^{(k)})^2] + \frac{1}{2} p_{pb}^{(k)} \lambda_s E[(X_s^{(k)})^2]. \quad (3.17)$$

Середній час доставки даних для алгоритму вибору каналу на основі сканування його параметрів, становить [114]:

$$E[T_{sb}] = \sum_{k=1}^M p_{sb}^{(k)} E[T^{(k)}]. \quad (3.18)$$

$$E[W_{sb}] = n\tau + \Pr\{\varepsilon^c\} \times E[W_{sb}'], \quad (3.19)$$

де ε – подія, коли хоча б один з каналів простоює в даний момент, а ε^c – комплементарне значення цієї події, τ – час сканування одного з n каналів.

$$\Pr\{\varepsilon\} = \sum_{k=1}^n [\Pr\{\varepsilon \mid k_{idle}\} \times \Pr\{k_{idle}\}] = \quad (3.20)$$

$$= \sum_{k=1}^n [(1 - (P_F)^k) \times \sum_{\mathfrak{S} \subseteq \Omega, |\mathfrak{S}|=k} \left[\prod_{i \in \mathfrak{S}} (1 - p^{(i)}) \prod_{j \in \Omega - \mathfrak{S}} p^{(i)} \right]], \quad (3.21)$$

де $p^{(k)} = p_p^{(k)} + p_i^{(k)}$ ймовірність помилкової тривоги.

$$\Pr\{\varepsilon^c\} = 1 - \Pr\{\varepsilon\}. \quad (3.22)$$

Ймовірність того, що вторинний користувач може використати певний канал, рівна $1/n$, якщо всі канали знаходяться в зайнятому стані [115].

3.3.3. Оцінка ефективності алгоритмів вибору радіочастотних каналів

На основі запропонованої моделі, проведемо порівняння алгоритмів без балансування навантаження, із запропонованими алгоритмами вибору радіочастотних каналів, на основі оцінювання ймовірності зайняття каналів та на основі сканування їх параметрів. Порівняння проведемо по показнику тривалості перерозподілу каналів для кожного з алгоритмів, в залежності від інтенсивності вхідного навантаження, для різних значень параметру тривалості сканування одного каналу τ . Результати моделювання залежності тривалості

перерозподілу каналів $E[S]$ від інтенсивності вхідного навантаження λ_s графічно представлені на рис. 3.19-3.20.

З наведених залежностей можна провести порівняння для трьох різних алгоритмів переключення каналів: алгоритм без балансування навантаження, алгоритм на основі оцінювання ймовірності зайняття каналу і алгоритм на основі сканування параметрів каналу. Оскільки в алгоритмі без балансування навантаження всім вторинним з'єднанням обирається канал з найменшою ймовірністю зайняття, то, порівнюючи його з двома іншими алгоритмами (з балансуванням вхідного навантаження), можна визначити, що для алгоритму вибору каналів на основі його сканування, тривалість перерозподілу є найменшою, навіть, при високих навантаженнях, коли τ є невеликим, оскільки за допомогою широкосмугового сканування даний алгоритм може досить істотно скоротити тривалість вибору каналів.

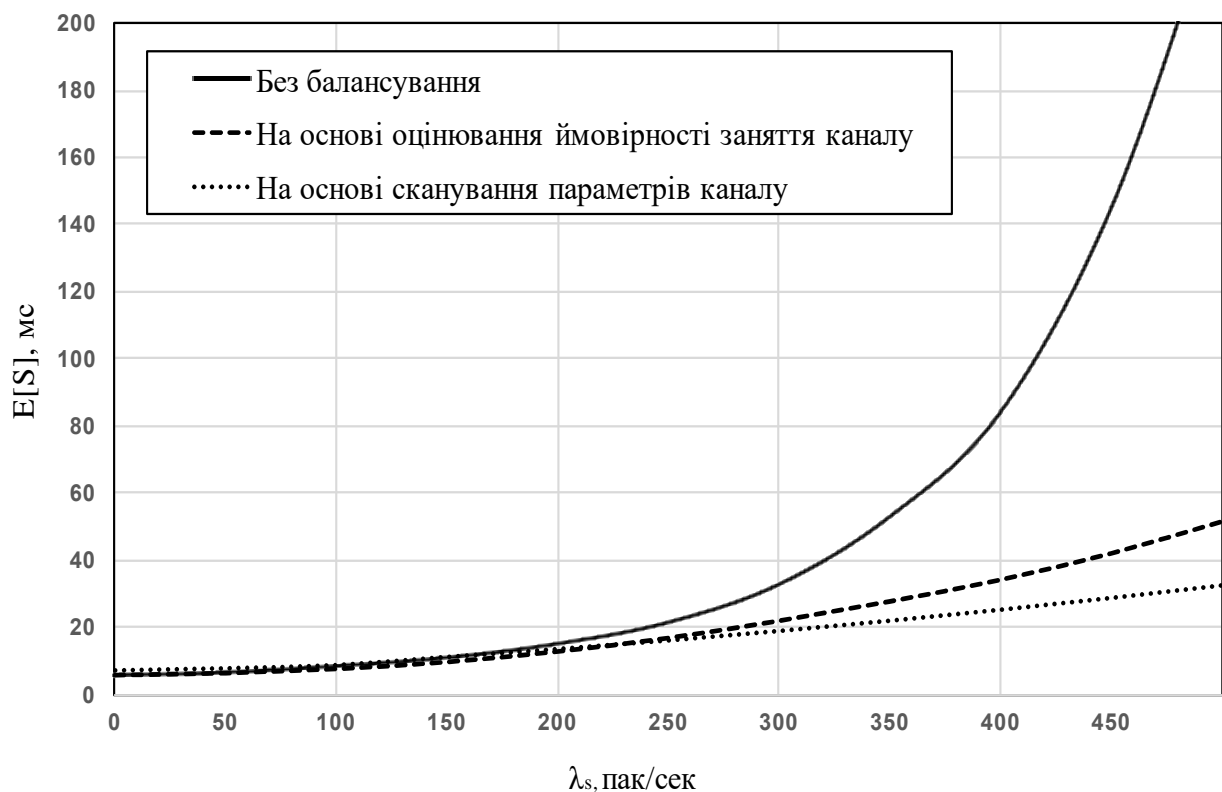


Рис. 3.19. Залежність тривалості перерозподілу каналів від інтенсивності вхідного навантаження для $\tau=4$, $P_M=0.05$, $P_F=0.05$, $E[X_s]=10$.

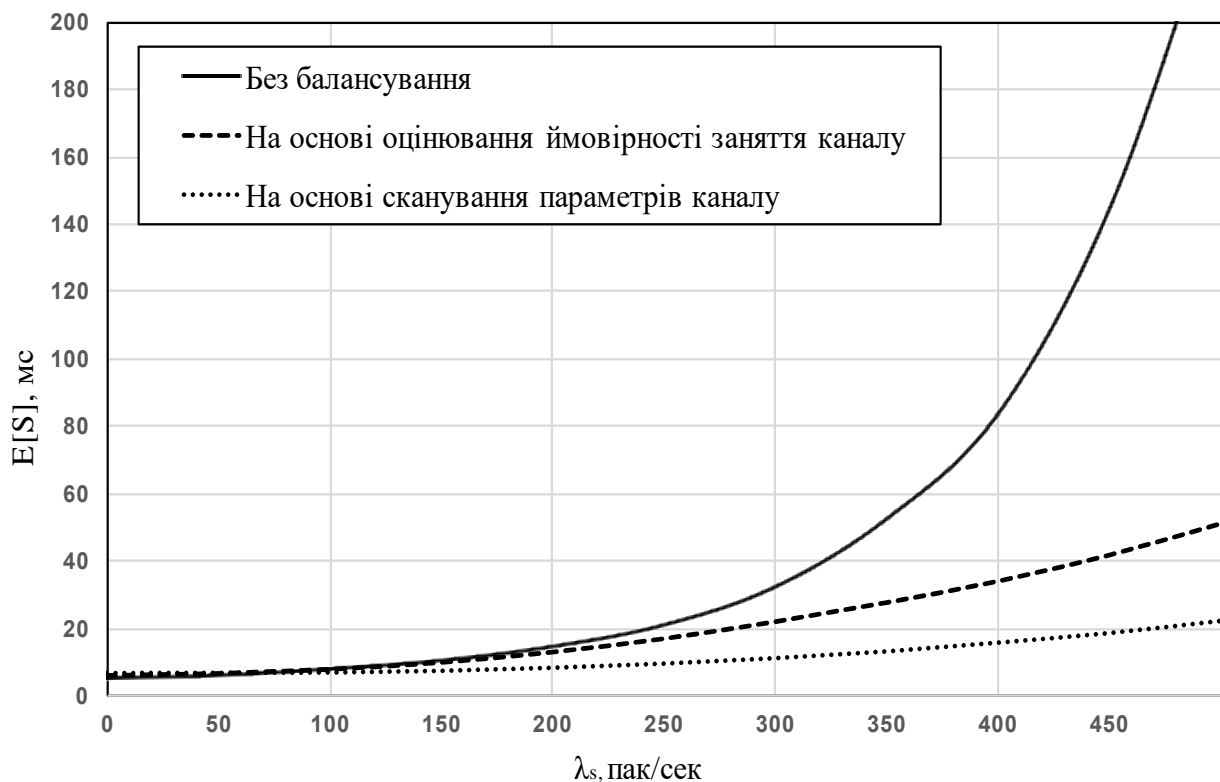


Рис. 3.20. Залежність тривалості перерозподілу каналів від інтенсивності вхідного навантаження для $\tau=2$, $P_M=0.05$, $P_F=0.05$, $E[X_s]=10$.

Проте, коли параметр τ збільшується, а інтенсивність не перевищує $\lambda_s < 250$, то найкращу тривалість перерозподілу каналів показує алгоритм, на основі оцінювання ймовірності зайняття каналу, так як він може вибрати канал з найменшою ймовірністю зайняття і не потребує сканування всіх каналів. Таким чином, з використанням методів балансування навантаження, можна мінімізувати тривалості перерозподілу каналів на 25% при не високому вхідному навантаженні і більше, ніж на 50% - при високому вхідному навантаженні.

3.3.4. Математична модель OFDM сигналу

Потік інформаційних біт u_i кодується завадостійким кодом (згідно з рекомендацією LTE 3GPP TS 36.211 [116] використовуються згорткові турбокоди з базовою швидкістю 1/3), перемежується і демультимплексується на N_T паралельних підпотоків, відповідно до кількості передавальних антен. Далі послідовність розбивається на Q -бітні вектори $d = [d_0 \dots d_{Q-1}]$, кожному з яких

відповідає комплексне значення символу, що належить сигнальному сузір'ю QAM-модуляції [117].

Модуляційні символи доповнюються пілотними символами (ПС) і надходять на блок зворотного перетворення Фур'є (ЗПФ). OFDM-символ з виходу блоку ЗПФ передається на N піднесучих, число яких визначається базою перетворення Фур'є. Після додавання циклічного префіксу (ЦП) і цифро-аналогового перетворення, сигнал, у часовій області, відповідний n -му звіту m -го OFDM-символу, переданого з u -ї антени, може бути представлений виразом:

$$x_m^u(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_{k,m}^u e^{j2\pi kn/N}, \quad (3.23)$$

де $n = -N_g \dots N - 1$; N_g - розмір ЦП; k - індекс піднесучої; $X_{k,m}^u$ - комплексне значення символу; A - сигнальне сузір'я 2^Q QAM-модуляції.

Для кожної пари u -ї передавальної і v -ї приймальної антени, імпульсна характеристика каналу (ІХК) $h^{u,v}(t,\tau)$ відображає спотворення, викликані частотною і часовою вибірковістю каналу (завмирання сигналу), а також шумами фільтрації в тракті:

$$h^{u,v}(t,\tau) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l^{u,v}(t)\sigma(\tau - \tau_l), \quad (3.24)$$

де $h_l^{u,v}(t)$ – коефіцієнт послаблення сигналу;

$l \in [0, L-1]$; L – число променів поширення сигналу (довжина імпульсного відгуку).

Передавальна функція каналу являє собою перетворення Фур'є з $h^{u,v}(t,\tau)$. Визначимо τ_{\max} і f_{\max} , як максимальні значення затримки поширення і доплерівського зсуву відповідно, при цьому для $|f| > f_{\max}$ або $|\tau| > \tau_{\max}$ виконується умова:

$$|H^{u,v}(f,\tau)| \approx 0. \quad (3.25)$$

Розглянемо комплексну експоненційну модель передавальної функції каналу, що враховує особливості поширення сигналу в квазістаціонарному

каналі з релієвським або райсівським (узагальненим релієвським) розподілом завмирання на інтервалі спостереження (послідовність OFDM-символів, обмежена передачею ПС).

Для послідовності з M OFDM-символів, враховуючи тривалість одного символу $N_s = N_g + N$, загальний інтервал становить MN_sT секунд. ІХК $h^{u,v}(t,\tau)$ для вибраної послідовності може бути представлена вектором з $Q+1$ коефіцієнтами передачі каналу, постійним на інтервалі спостереження, при цьому розмір бази перетворення Фур'є, також рівний $Q + 1$, забезпечує врахування часової вибіркості каналу для всіх пакетів OFDM-символів. Як результат, ІХК в часовій області, для l -го променя поширення між u -ю передавальною і v -ю приймальною антенами m -го OFDM-символу, може бути представлена послідовністю звітів:

$$h_{l,m}^{u,v}(n) = \sum_{q=0}^Q h_{q,l}^{u,v} b_q(n), \quad (3.26)$$

де $n \in [0, N-1]$; $l \in [0, L-1]$; $L = \lceil \tau_{\max} / T \rceil$ - довжина імпульсного відгуку;

$Q = 2 \lceil f_{\max} MN_s T \rceil$ - розмір базису розкладу;

T - тривалість відліку з виходу блоку ЗПФ;

$h_{q,l}^{u,v}$ - коефіцієнти передавання каналу;

b_q - q -та базисна функція, що має вигляд:

$$b_q(n) = e^{j\omega_q((m-1)N_s + N_g + n)}, \quad (3.27)$$

де $\omega_q = 2\pi (q - Q/2)/(MN_s)$.

Так, як значення τ_{\max} і f_{\max} визначаються априорно, виходячи з тривалості ЦП, що використовується, і максимальної швидкості абонента, в представленій моделі використовується припущення: параметри τ_{\max} , f_{\max} і, як наслідок, L і Q обмежені, відомі і задовольняють умові:

$$2f_{\max} \tau_{\max} < 1. \quad (3.28)$$

Необхідно відзначити, що умова (8) є обмеженням числа ступенів свободи імпульсної характеристики каналу зв'язку в процесі її оцінювання.

Умова багатопроменевого поширення сигналу, коли кожен промінь є композицією великого числа компонент [118], і відсутність лінії прямої видимості дозволяє сформулювати припущення, засноване на центральній граничній теоремі: коефіцієнти передавання каналу $h_{q,l}^{u,v}$ представляють собою комплексні значення, що розподілені за гаусівським законом і мають нульове середнє значення.

У приймачі, після видалення ЦП і дискретизації сигналу по часу, n -й відлік m -го OFDM-символу, прийнятого з v -ї антени може бути представлений виразом:

$$y_m^v(n) = e^{j\frac{2\pi\varepsilon}{N}(n+N_g+(m-1)N_s)} \sum_{u=0}^{N_T} \sum_{l=0}^{L-1} h_{l,m}^{u,v}(n) x_m^u(n-l) + w_m^v(n), \quad (3.29)$$

де $\varepsilon = (\Delta f / f)(NTf) = \Delta f NT$ – нормалізоване значення зміщення несучої частоти; Δf і f – абсолютні значення зсуву і несучої частоти;

w_m^v – відліки адитивного білого гаусівського шуму в часовій області; $n = 0 \dots N-1$.

Після виконання прямого перетворення Фур'є (ППФ), сигнал в частотній області на k -й піднесучій визначається, як:

$$Y_m^v(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} y_m^v e^{-j2\pi kn/N}. \quad (3.30)$$

Виконавши ряд математичних перетворень, з представленого виразу (8) з урахуванням (7) отримуємо:

$$Y_m^v(k) = e^{j\frac{2\pi\varepsilon N_m}{N}} \sum_{u=0}^{N_T} \sum_{i=0}^{N-1} H_{m,i}^{u,v}(k) X_{i,m}^u + W_m^v(k), \quad (3.31)$$

де $H_{m,i}^{u,v}(k) = \sum_{q=0}^Q H_{q,i}^{u,v}(k) e^{j\omega_q N_m} \rho_{q,i}(k)$; $N_m = N_g + (m-1)N_s$;

$$H_{q,i}^{u,v} = \sum_{l=0}^{L-1} h_{q,l}^{u,v} e^{-j2\pi il/N}; \quad \rho_{q,i}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{\frac{j2\pi n}{N}(\varepsilon + \varepsilon_k + i + k)};$$

$$\varepsilon_q = \frac{\omega_q N}{2\pi}; W_m^v(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} w_{n,m}^v e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}.$$

Сигнал m -го OFDM-символу, що відповідає k -й піднесучій у векторній формі має вигляд:

$$Y_m(k) = e^{j \frac{2\pi}{N} N_m \varepsilon} H_m(k) X_m(k) + W_m(k), \quad (3.32)$$

де

$$Y_m(k) = [Y_m^1(k) \dots Y_m^{N_R}(k)]^T;$$

$$X_m(k) = [X_{k,m}^1(k) \dots X_{k,m}^{N_T}(k)]^T;$$

$$W_m(k) = [X_{k,m}^1(k) \dots X_{k,m}^{N_T}(k)]^T;$$

$$H_m(k) = \begin{bmatrix} H_{k,m}^{1,1}(k) & \dots & H_{k,m}^{N_T,1}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{k,m}^{1,N_R}(k) & \dots & H_{k,m}^{N_T,N_R}(k) \end{bmatrix}^T.$$

Модель дозволяє знизити складність розрахунку оцінок коефіцієнтів передачі каналу OFDM сигналу та враховує частотну і часову вибірковість каналу, в умовах багатопроменевого поширення сигналу.

3.4. Дослідження ефективності роботи алгоритмів вибору та спільного використання радіочастотного спектру за допомогою програмного комплексу.

Розроблений програмний комплекс базується на основі імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею і являє собою комп'ютерну реалізацію цієї моделі у вигляді сукупності алгоритмів, написаних на мові програмування C#, призначеної для оцінки дослідження ефективності роботи алгоритмів сканування, вибору, спільного використання та забезпечення мобільності спектру (фрагмент коду програми наведено в Додатку В).

Програмний комплекс дає змогу проводити дослідження та порівняння ефективності роботи алгоритмів сканування, вибору, спільного використання та забезпечення мобільності спектру, і складається з таких основних компонентів (рис.3.21):



Рис 3.21. Блок-схема роботи комп'ютерної моделі.

- робоче радіосередовище;
- менеджер радіочастот;
- менеджер первинної мережі;
- менеджер когнітивної мережі;
- система управління роботою когнітивного радіо.

Основним завданням менеджера радіочастот є створення програмної моделі умовного радіосередовища, для гнучкого налаштування його параметрів та управління доступом користувачів, як первинної, так і вторинної мереж. Менеджер радіочастот являє собою програмний клас, що містить змінні та функції:

- channelsNum – загальна кількість каналів;
- FrequencyRange – вибраний діапазон частот радіосередовища;
- channelWidth – ширина одного каналу в МГц;
- channels – список усіх наявних частотних каналів;

- `Init()` – ініціює створення програмного радіосередовища з вибраними параметрами;
- `OnStop()` – зупиняє роботу програмного радіосередовища;
- `GetFrequencies(range)` – дозволяє отримати список частотних каналів заданих діапазоном частот;

Менеджер радіочастот, при ініціації, будує програмну модель радіосередовища, у вигляді сукупності радіочастотних каналів, на основі заданих стартових параметрів. Кожен радіочастотний канал являє собою клас, що містить такі змінні:

- `is_free` – прапорець, що визначає зайнятість частотного каналу будь-яким користувачем;
- `is_working` – прапорець, що визначає загальну доступність до роботи частотного каналу;
- `num` – номер частотного каналу;
- `range` – діапазон частот, що займає даний канал;
- `user` – визначає користувача, який в даний момент займає частотний канал. Якщо канал вільний, змінна встановлюється як `null`;
- `network` – визначає ліцензійну мережу, до якої належить даний частотний канал.

Розроблений програмний комплекс дозволяє легко і гнучко налаштувати параметри радіосередовища та отримати повний доступ до них за допомогою менеджера радіоресурсів. Після старту програми, першочерговим є налаштування робочих діапазонів та стартових параметрів генерації користувачів для первинної мережі та когнітивної мережі. На рис. 3.22 зображено системне вікно початкових налаштувань та інформації про когнітивну радіомережу.



Рис 3.22. Налаштування робочого діапазону та початкових параметрів генерації користувачів для КР.

Наступним етапом є початкове налаштування системи керування когнітивною радіомережею. У відповідному системному вікні (рис. 3.23) можна здійснити вибір відповідних алгоритмів, для застосування у системі керування когнітивною радіомережею при моделюванні, а також налаштування додаткових параметрів.

Особливістю даного програмного комплексу є можливість створення нового або модифікація існуючого алгоритмів, для дослідження та порівняння ефективності їх роботи. Налаштуванню параметрів та алгоритмів підлягають такі компоненти:

- модуль сканування спектру;
- модуль моніторингу і аналізу;
- модуль виявлення подій;
- модуль вибору спектру;
- менеджер ресурсів.

Після проведення всіх необхідних початкових налаштувань менеджера радіочастот, первинної та когнітивної радіомереж, а також вибору бажаних алгоритмів системи керування когнітивною радіомережею, для їх дослідження та порівняння ефективності, потрібно запустити процес моделювання.

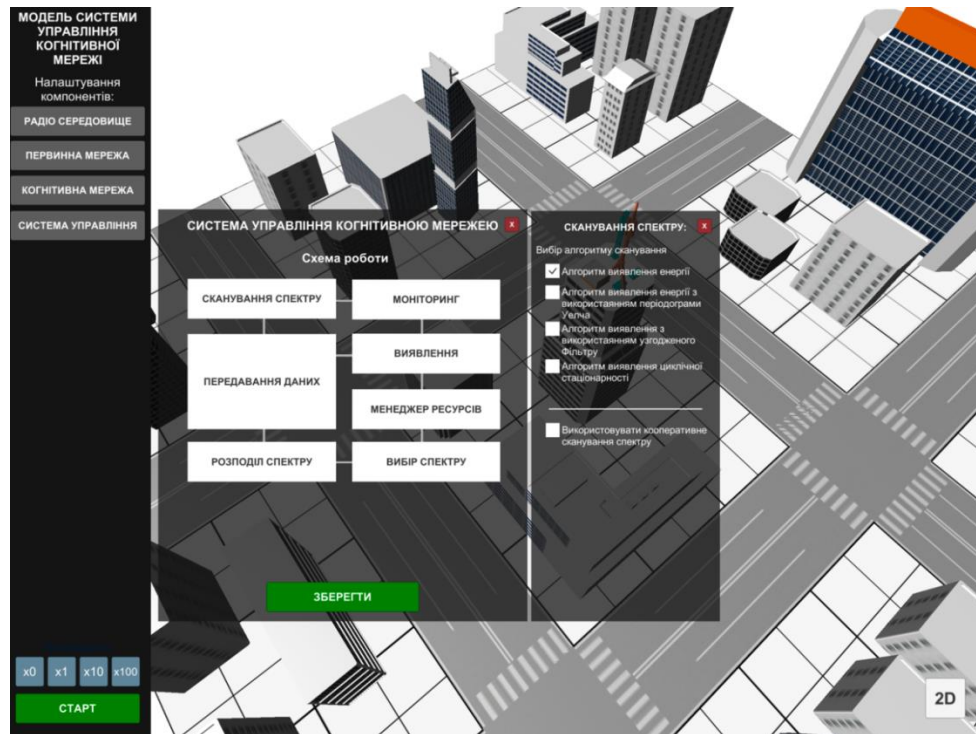


Рис 3.23. Налаштування модуля сканування спектру системи керування КР.

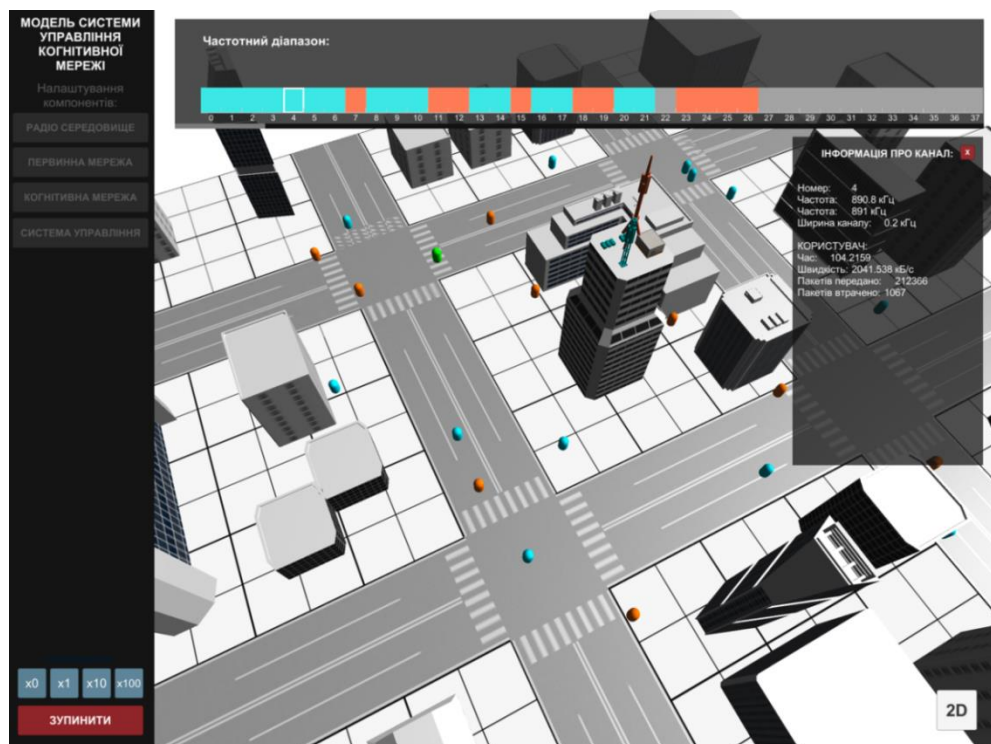


Рис 3.24. Процес моделювання комп'ютерної моделі системи керування КР.

На рис 3.24 зображено процес моделювання, де можна отримати інформацію про параметри якості для кожного користувача та всіх радіочастотних каналів.

Робота комплексу починається з ініціації параметрів кожного компоненту та старту генерації користувачів для кожної радіомережі. Моделювання відбувається у реальному часі з можливістю пришвидшити процес до 100 разів, а також призупинити у потрібний момент.

Результатом моделювання є отримання масиву даних по вибраних параметрах якості, на основі яких можна проводити подальше дослідження та порівняння ефективності роботи алгоритмів.

3.5. Комплексне управління використанням спектральних ресурсів для гетерогенних мереж LTE

Згідно прогнозу [119], річний обсяг IP-трафіку до 2021р. може досягти 3,3 зеттабайт, а 73% інтернет-трафіку будуть генерувати пристрої, підключені за допомогою безпроводних технологій (Wi-Fi, 4G LTE, 5G).

Збільшення пропускної здатності мобільних мереж зараз є одним з найскладніших завдань. Причинами цього є стрімкий розвиток Інтернету речей (IoT) [120], швидке зростання обсягів трафіку та дефіцит частотного спектру. Використання неліцензійної смуги Wi-Fi у діапазоні 5 ГГц для мобільної передачі відкриває нові перспективи для агрегації значного обсягу спектру, що дасть змогу збільшити швидкість передачі даних для кінцевих користувачів, шляхом об'єднання пропускних здатностей декількох діапазонів, навіть, якщо вони фізично не розташовані поряд [121, 122].

На сьогодні запропоновано ряд рішень для забезпечення мобільної передачі даних в неліцензованій смузі без створення перешкод для існуючих користувачів Wi-Fi. На відміну від існуючих рішень, пропонується новий підхід для агрегації частот у ліцензованій та неліцензованій смузі для мереж 5G, який дозволяє кільком операторам опосередковано використовувати неліцензований спектр, якщо він, в даний час, не використовується Wi-Fi або іншими

операторами мобільної мережі [123]. Результати моделювання показують, що обидва оператори можуть досягти високої ефективності агрегації носіїв під час використання запропонованого підходу.

Різке зростання мобільного трафіку призвело до проблеми дефіциту спектру. Крім того, збільшення пропускної здатності мережі вимагає додаткових ресурсів спектру. Провідні телекомоператори почали вивчати нові можливості використання неліцензійного діапазону 5 ГГц, що на даний момент використовується Wi-Fi технологією, для стільникової передачі на основі технології Long Term Evolution (LTE). Технологія використання неліцензійного спектру отримала назву LTE-Unlicensed (LTE-U). Дослідження показують, що мережа LTE має переваги над мережею Wi-Fi, при використанні неліцензійних діапазонів [124], та може забезпечити додатковий діапазон 400 МГц, що, в свою чергу, відкриває нові перспективи для LTE (4G) та 5G мереж. Спільні тестові випробування 5G технології, проведені компанією SK Telecom та Nokia, показали, що продуктивність 19,1 Гбіт/с може бути досягнута за допомогою 256-QAM модуляції та технології MIMO 8x8. [125].

Незважаючи на те, що технологія LTE-U є привабливим стандартом для майбутніх мобільних мереж, для її реалізації залишається багато проблем, оскільки даний діапазон використовується користувачами Wi-Fi, а розгортання LTE-U може спричинити серйозні перешкоди та знизити продуктивність мережі. Дослідження показують, що пропускна здатність Wi-Fi зазвичай зменшується, тоді, як LTE-U збільшується, коли обидва рішення спільно використовують неліцензований діапазон. Але перехід на LTE, для отримання кращої якості обслуговування, вимагатиме оновлення абонентського обладнання на пристрої, що здатні працювати в мережах LTE-U. Крім того, наявні мережі Wi-Fi всеодно перешкоджають користувачам LTE-U, що вимагає вирішення завдання взаємовигідного співіснування Wi-Fi та LTE у неліцензованій смузі 5 ГГц. Ще одним питанням є розподіл цього діапазону між кількома операторами. Додаткова складність полягає в тому, що Wi-Fi використовує множинний доступ, із розпізнаванням носія та уникненням

колізій (CSMA/CA), який відрізняється від детермінованого доступу в мережі LTE-U.

Wi-Fi не дозволяє уникнути перешкод мобільним користувачам, оскільки Wi-Fi вибирає випадковий час передачі, тоді, як час передачі в LTE чітко визначений. Wi-Fi користувачі працюють на каналах 20 МГц, в той час як LTE використовує ресурсні блоки по 180 кГц. Таким чином, навіть один користувач Wi-Fi буде перешкоджати декільком користувачам LTE-U. І, хоча для співіснування Wi-Fi та LTE запропоновано ряд підходів (вдосконалені технології фільтрації в приймачах, передача незадіяних кадрів, прослуховування середовища перед передаванням та ін.), все ще існує проблема спільного використання неліцензованої смуги [126]. Однією з особливостей гетерогенних мереж є різноманітність розподілу каналів. Тому, необхідні нові рішення для покращення управління радіоресурсами в мультиоператорських гетерогенних мережах, що лежать в основі LTE-U [127].

Основна функція управління радіоресурсами полягає в тому, щоб максимально збільшити ємність мережі при обмежених спектральних ресурсах.

Пропонується новий підхід до управління радіоресурсами на основі комплексного моніторингу мережі та програмного планування, що дозволяє вирішити вище згадану проблему.

Запропонований підхід передбачає, що контролер програмно-конфігурованої мережі (Software-defined Network SDN) (рис.3.25), містить відповідну інформацію про навантаження та розподіл спектру для кожної комірки, про потужність прийнятого сигналу кожного користувача, по низхідній лінії зв'язку, та кожну базову станцію на висхідній лінії, геоінформацію про місцезнаходження, траєкторію та швидкість руху користувачів, розміри комірок.

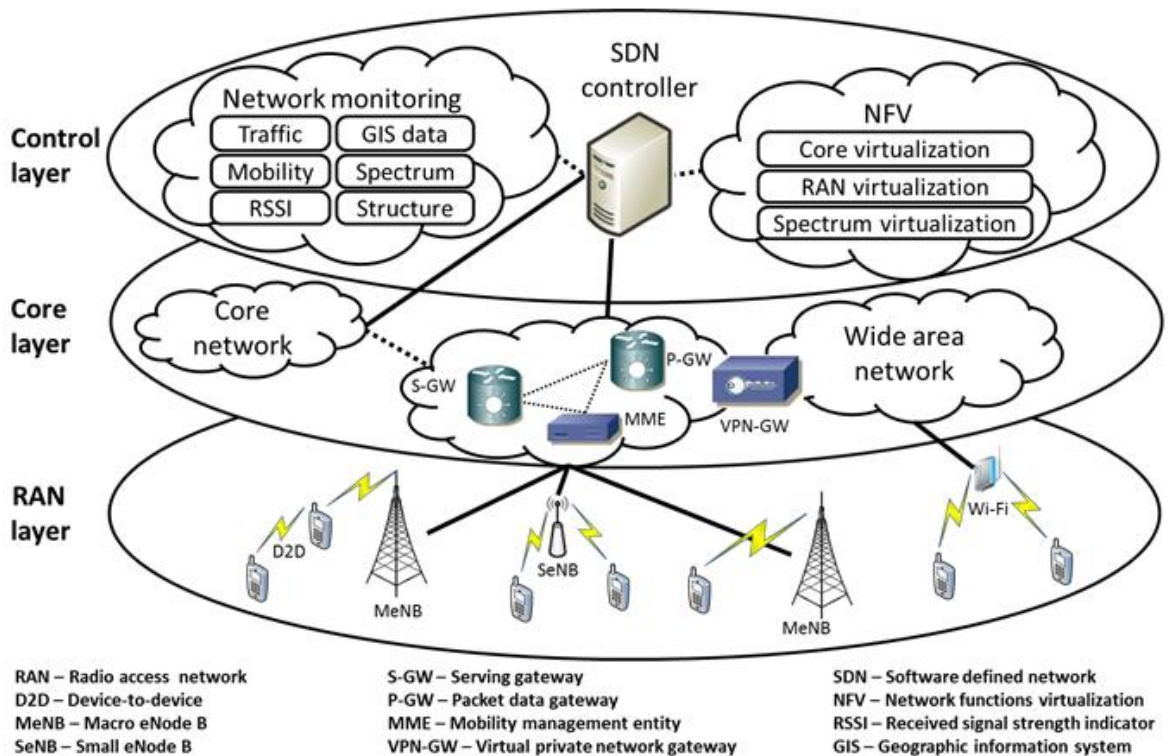


Рис 3.25. Спрощена архітектура гетерогенних мобільних мереж на основі технологій SDN і NFV.

Складність співіснування технологій Wi-Fi та LTE пов'язана з істотними відмінностями в безпроводних інтерфейсах та методах доступу до середовища передачі. Використання неліцензійних смуг для передачі LTE призводить до значного зниження показників QoE, через наявність інтерференційних завад. Використання неліцензованої смуги з агрегацією каналів, що використовується в LTE, забезпечить кращу продуктивність, порівняно з традиційним використанням неліцензованого спектру.

Запропоновано підхід для одночасного об'єднання пропускної здатності радіоканалів у ліцензійних та неліцензійних смугах. Дані, що вимагають низької кількості помилок, такі, як: дані сигналізації та голосові дані, як і раніше, передаються по ліцензованій смузі спектру, тоді, як неліцензійна смуга використовується з метою збільшення пропускної здатності для програм, які використовують дані, що допускають втрати пакетів. Пропонований метод полягає у використанні подвійного підкадру (dual-subframe) – один субкадр передається через ліцензовану смугу (L-subframe), тоді, як інший кадр

передається по неліцензованій смузі (U-subframe). Розподіл субкадрів здійснюється за допомогою контролера SDN, щоб уникнути перешкод для мереж Wi-Fi. Припускається, що мережі Wi-Fi не заважають LTE-U, через відстеження каналів перед передачею, за рахунок використання протоколу доступу до середовища CSMA. Пропонується метод доступу до середовища, який називається CASLUA (carrier sense LTE unlicensed access). CASLUA може бути реалізований, як з використанням традиційних рішень, так і за допомогою SDN (відповідно, S-CASLUA та SDN-CASLUA) [128]. Результати моделювання показують, що використання CASLUA може забезпечити збільшення середньої швидкості передавання даних користувачів до 40% (рис.3.26).

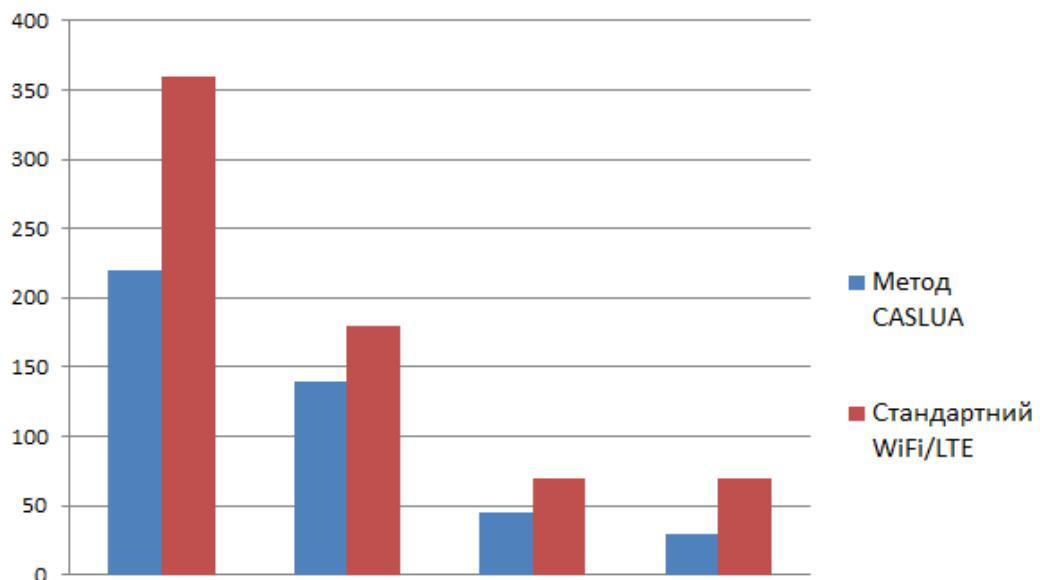


Рис 3.26. Середня швидкість передачі Wi-Fi/LTE користувачів в неліцензованому діапазоні.

Алгоритм може бути реалізований програмно, як окремо, так і у якості частини програмно-визначеної мобільної мережі.

3.6. Висновки до 3-го розділу.

1. Проведено аналіз, класифікацію і порівняння традиційних радіосистем, радіосистем з програмованими параметрами і систем з використанням технології когнітивного радіо, відмінною особливістю яких є наявність інтелектуального (когнітивного) модуля. Основними властивостями технології когнітивного радіо є: моніторинг спектру, аналіз і оцінка параметрів

радіоканалу, прогнозування зміни каналу зв'язку, можливість гнучкої і швидкої реконфігурації відповідно до змін радіосередовища.

2. Розроблено імітаційну модель системи керування когнітивною мережею із можливістю широкого і гнучкого налаштування множини вхідних параметрів, вибору методів управління радіочастотним спектром, а також із можливістю подальшого удосконалення та масштабування. Використання технології передачі OFDM дозволяє гнучко керувати смугою пропускання сигналу, що передається, покращити ефективність прийому даних, в умовах багатопроменевого поширення, в залежності від числа частот, що зайняті первинною мережею в певному місці, та покращити швидкості передавання даних і ефективність використання вибраних діапазонів частот мережі LTE. Здійснено моделювання когнітивної радіомережі для визначення пропускну здатності, при роботі системи в умовах, наближених до реальних. На основі результатів моделювання визначено, що, навіть, при максимальній завантаженості абонентами первинної мережі, середня сумарна пропускну здатність когнітивної радіомережі зростає в середньому на 10%.

3. Розроблено імітаційну модель процесу оцінювання ефективності методів вибору спектру на основі введеного показника продуктивності – тривалості прийняття системою рішення про перерозподіл каналів для алгоритмів балансування вхідного навантаження, з урахуванням ймовірності зайняття радіоканалу і на основі моніторингу його параметрів, що забезпечує підвищення швидкодії системи керування когнітивною радіомережею. За результатами моделювання визначено, що, алгоритм, на основі оцінювання ймовірності зайняття каналу, зменшує тривалість перерозподілу каналів до 25% при низькому навантаженні вторинних користувачів, а при високому навантаженні, алгоритм переключення каналів, на основі сканування параметрів каналу, зменшує тривалість перерозподілу каналів більше, ніж на 50%.

4. На основі імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею розроблений програмний комплекс для дослідження та

оцінювання ефективності роботи алгоритмів сканування, спільного використання та забезпечення мобільності спектру.

5. Запропоновано новий підхід до управління радіоресурсами на основі комплексного моніторингу мережі та програмного планування, для агрегації декількох смуг на різних частотах у ліцензійному та неліцензійному діапазоні в один канал, для мультиоператорського доступу в мережах 4G/5G. Проведене моделювання, для оцінювання ефективності запропонованого підходу у випадку двох конкуруючих операторів, показало, що обидва оператори можуть досягти високої ефективності агрегації носіїв під час використання запропонованого підходу та збільшити середню швидкість передачі даних для користувачів до 40%.

РОЗДІЛ 4

Розроблення методів управління навантаженням в мережах розповсюдження контенту.

4.1. Дослідження архітектури та механізмів управління навантаженням в CDN мережах

У 2014 році відеоконтент складав 64% світового інтернет-трафіку і з кожним роком його доля в загальному трафіку зростає. Відеосервіси та передача відеоконтенту не тільки збережуть своє домінуюче становище в світовому IP-трафіку, а й посилять його. Відповідно до прогнозу Cisco, до 2019 року онлайн-відео складе чотири п'ятих світового інтернет-трафіку (80%) [119].

4.1.1. Аналіз технологій і методів доставки інформації

Розвиток технологій і методів доставки інформації, в першу чергу, спрямований на зменшення часу доставки інформації користувачам і оптимізації передавання в мережах. Еволюційно, застосовувались такі технології, як: використання проксі-серверів, використання реплікацій даних та використання мереж доставки контенту CDN (рис.4.1).

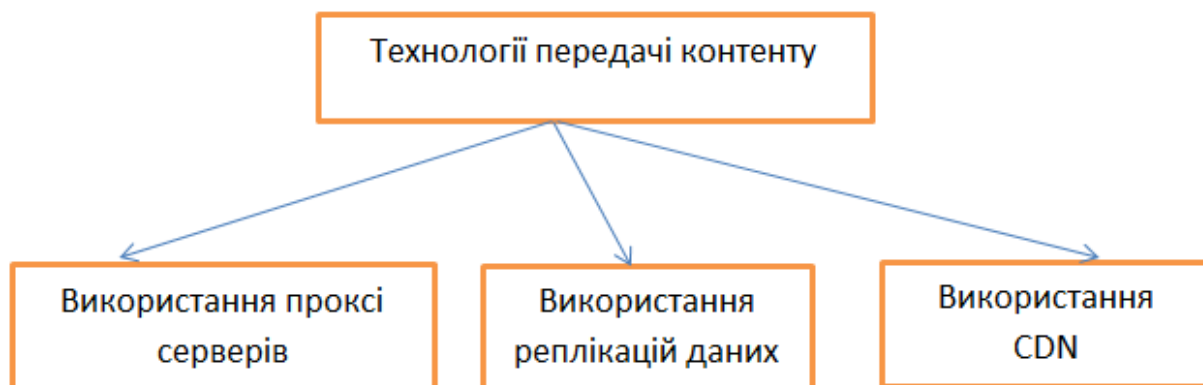


Рис.4.1. Технології та методи передавання даних в інфокомунікаційних системах.

Одним з перших таких спроб стало застосування систем кешування даних (проксі-серверів) постачальниками послуг Інтернет. У той час, як WEB-браузери зберігають тільки недавно запитувані ними об'єкти на локальному

диску або в оперативній пам'яті, проксі-сервери виступають в ролі спільного кеша, який можуть використовувати безліч браузерів.

Використання проксі серверів дає ряд переваг, а саме:

- скоротити обсяг трафіку, що передається мережею і, тим самим, зменшити вимоги до пропускної здатності каналів;
- зменшити час очікування користувачів, які звертаються за файлами, що знаходяться у кеші;
- пришвидшити час доставки некешованих даних, завдяки зменшенню навантаження на мережу і сервер – джерело контенту.

Окрім лише технічних причин, що обмежують можливості технології кешування при її використанні в проксі-серверах, існує інший важливий чинник – відсутність у постачальників контенту можливості контролю над її розповсюдженням. Можливість неправомірного доступу до інформації, порушення її достовірності і недоступність повноцінної статистики - все це змушує постачальників контенту забороняти кешування своїх даних. Таким чином, значна частина запитів часто буде оминати кеш-системи і досягати серверів походження. Очевидно, що в такій ситуації потрібно застосування принципово інших методів доставки інформації до кінцевих користувачів.

Одним із таких методів є реплікація. Реплікація підвищує доступність інформації, за рахунок збільшення числа її джерел. Хоча і кешування, і реплікація створюють додаткові копії інформації, принципова різниця між ними полягає в наступному: кешування здійснюється і контролюється споживачем контенту, тоді, як за реплікацію відповідає постачальник контенту, що володіє повним контролем над усіма її копіями (репліками). З огляду на те, що теоретично можливо реплікувати будь-які типи інформації, реплікація долає всі обмеження кешування. Однак і тут існують свої недоліки. Основним недоліком реплікації є її значна ресурсомісткість. На відміну від проксі-серверів, розміщених провайдерами або великими компаніями незалежно, система реплікації повинна бути створена самим постачальником інформації. При цьому створення і обслуговування повномасштабної системи прозорої

динамічної реплікації, найбільш ефективною з точки зору якості доставки інформації, може зажадати від постачальника інформації надмірних витрат. Очевидною була необхідність розробки і застосування такого методу доставки інформації, який поєднує в собі переваги вище розглянутих методів.

Головною задачею, яка ставиться перед сучасними провайдерами послуг та контенту, є можливість масштабування мережевої інфраструктури, в умовах постійного зростання трафіку, та розподіл навантаження по різних локаціях. Для вирішення такого роду задач використовуються різні технології. Однією з них є створення мережі CDN, яка дозволяє зменшити навантаження, посилити захист від DDoS і прискорити завантаження сайту у віддалених локаціях [129].

4.1.2. Архітектура та переваги використання CDN мереж

4.1.2.1. Базова архітектура CDN мережі

Мережа розповсюдження контенту, представляє собою географічно розподілену мережу передавання даних, яка містить велику кількість серверів обробки та трансляції контенту і мережевих маршрутів (рис.4.2).



Рис. 4.2. Узагальнена схема географічно рознесеної мережі CDN.

Основна задача такої мережі – забезпечення якісної доставки інформації до кінцевого користувача. Як правило, мережа складається із головного сервера, на якому знаходиться контент, та кешуючих серверів, які розташовані в різних географічних точках. Коли користувач відправляє запит до головного сервера, цей запит буде перенаправлений до найближчого кешуючого сервера, оскільки, у більшості випадків, основним критерієм, що впливає на затримку, є фізична відстань між клієнтом та сервером. Основною задачею CDN є зменшення цієї відстані. Завдяки цьому, маршрут між кінцевим користувачем та сервером трансляції контенту суттєво скорочується і клієнт має змогу отримати ресурс з більшою надійністю (рис. 4.3).

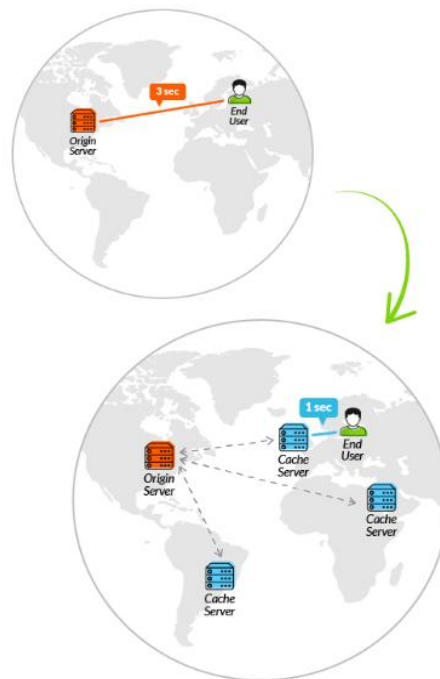


Рис. 4.3 Використання кешуючих серверів.

Базова архітектура системи CDN представлена на рис. 4.4 та включає чотири основні компоненти:

- доставки контенту – складається з сервера походження та набору серверів-реплік (сурогатних серверів), які постачають копії контенту користувачам;
- маршрутизації запитів – відповідає за спрямування запитів клієнтів до відповідних серверів та для взаємодії з компонентом розподілу, для оновлення вмісту контенту, який зберігається в кеші на

сурогатних серверах;

- розподілу – який переміщує контент із сервера походження до сурогатних CDN серверів і забезпечує узгодженість контенту в кешах;
- білінговий – який надає доступу клієнтів та проводить записи використання серверів CDN. Ця інформація використовується для розрахунків за використаний трафік.

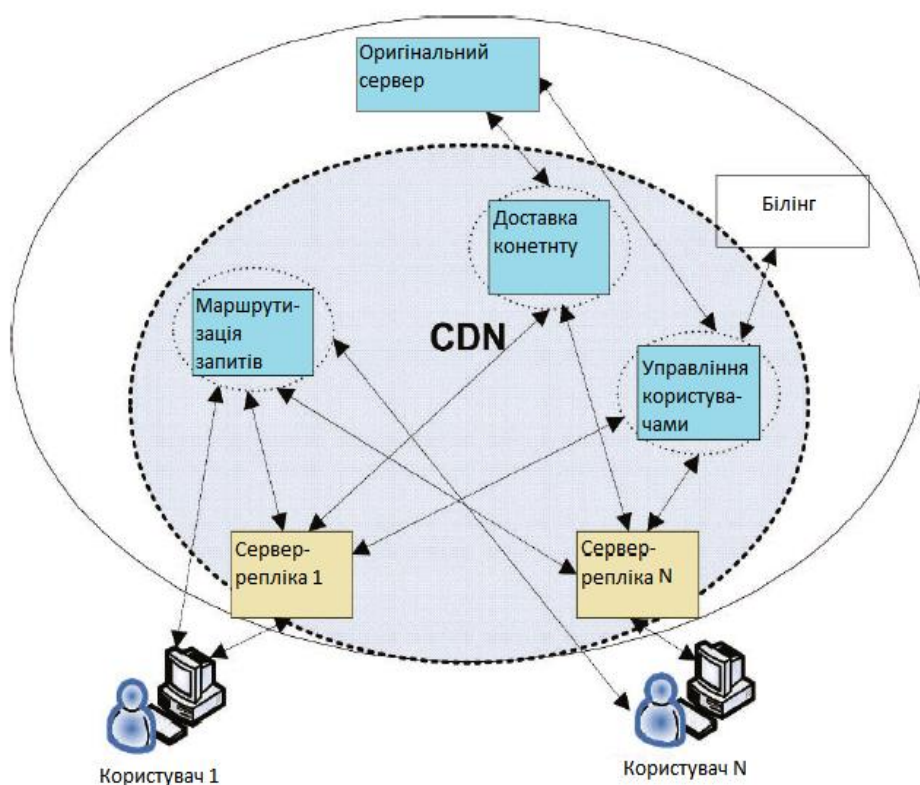


Рис.4.4 Архітектура компонентів CDN мережі.

4.1.2.2. Переваги використання CDN мереж

Основними перевагами використання CDN є:

- зростання швидкості розповсюдження та доставки контенту – користувачі із цілого світу мають змогу отримати контент з найближчого сервера, по оптимальному мережевому маршруту, із мінімальною затримкою;
- зменшення обсягів трафіку, що передається магістральними каналами мережі;

- зниження навантаження на основний сервер – всі статичні дані будуть зберігатись на кешуючих серверах і всі запити будуть опрацьовуватись, як правило, ними. На основному сервері буде залишатись тільки динамічний контент. Для прикладу, якщо мережа CDN використовується для трансляції відеоконтенту, в такому разі контент, який йде в реальному часі, буде транслюватись із основного сервера, а записаний буде віддаватись кешуючими серверами;
- використання файлових обмінників для передачі даних – багато користувачів використовують сховища даних (storage) для обміну даними. Як правило, туди зберігаються великі файли відео, аудіо та фото. Завдяки використанню CDN, ці файли можуть бути завантажені на високій швидкості з будь-якої точки світу.

Загалом, мережа CDN складається з великої кількості серверів, пов'язаних власними або орендованими високошвидкісними каналами зв'язку і розташованими якнайближче до споживачів контенту. CDN є накладеною мережею, яка функціонує на верхніх рівнях, використовуючи стандартні протоколи для передачі даних. Така мережа має централізоване управління і в ній можливе використання будь-яких технологій і протоколів, в тому числі приватних, що дає переваги в порівнянні з публічною мережею Інтернет.

В технологічному розвитку методів і технологій, що використовуються при доставці інформації в CDN, можна виділити три основні етапи:

- 1) доставка тільки статичної інформації;
- 2) доставка мультимедіа інформації, в тому числі потокової;
- 3) перехід до доставки динамічної інформації.

Шлях розвитку CDN мереж формувався під впливом ринку, в тому числі нових тенденцій в області споживання контенту і величезних досягнень у збільшенні швидкості каналів передачі. Останнє стало можливим завдяки появі волоконно-оптичних мереж та інших нових комунікаційних технологій. В цілому, еволюцію CDN можна розділити на три покоління (статичні CDN,

динамічні CDN, багатофункційні CDN, кожне з яких впроваджує нові можливості, технології і концепції мережевої архітектури.

Власне доставка мультимедійної інформації, стала основним рушієм розвитку CDN мереж, оскільки така інформація дуже чутлива до затримок та втрат. І важливим питанням є забезпечення належної якості обслуговування QoS в такій мережі.

4.1.3. Надання послуг IPTV/OTT

Найчастіше, технології CDN використовуються для передачі відеоконтенту через Інтернет для надання IPTV (Internet Protocol Television) та OTT (Over the Top) послуг, та дозволяють розширювати їх набір. Доставка контенту до абонентських пристроїв (STB – set-top-box, SmartTV, комп'ютер, мобільний телефон та ін.) здійснюється, або по керованій широкосмуговій IP-мережі оператора/провайдера (IPTV) з використанням технології multicast чи unicast (IPTV), або по некерованій мережі Інтернет (OTT).

Internet Protocol Television (IPTV) представляє собою систему, через яку телевізійні послуги надаються з використанням стеку IP протоколів через мережі з комутацією пакетів, а не доставляються за допомогою традиційних наземних, супутникових сигналів, і кабельних телевізійних форматів.

Послуги IPTV можна розділити на три основні групи:

- телебачення в реальному часі, з або без інтерактивності, пов'язаної з поточною телевізійною передачею;
- телебачення зі зсувом у часі: catch-up TV (відтворює ТВ-шоу, що транслювалося кілька годин або днів тому), start-over TV (повтори поточних ТВ-шоу спочатку);
- відео за запитом (VOD): дозволяє переглянути каталог відео, що не належить до ТВ-програм.

Основною відмінністю між OTT та IPTV є те, що хоча обидва використовують Інтернет, OTT потоково доставляється через відкритий

некерований Інтернет, в той час як IPTV використовує виділені, керовані мережі.

Мережа Інтернет є однією з найбільших інформаційно-комунікаційних мереж. Її розвиток і якість наданих нею послуг мають найважливіше значення, як для економіки, так і для соціальної сфери. У той же час, технології обробки та передачі інформації, які лягли в основу мережі на початковому етапі її розвитку, не зовсім відповідають сучасним вимогам, і цей розрив продовжує збільшуватися. Найчастіше якість послуг Інтернет є незадовільною, а відсутність у постачальників інформації контролю над її розповсюдженням стає стримуючим фактором у розвитку мережі. Для підвищення якості обслуговування користувачів і ефективності використання мережевих ресурсів, а також для забезпечення необхідних додаткових послуг постачальникам інформації, потрібне застосування нових методів доставки інформації.

Для вирішення цих задач постійно розроблялися різні технології (кешування, попереднє завантаження документів, різні види реплікації та ін). Однак, ці технології лише частково вирішують згадані завдання. Щоб забезпечити постачальникам інформації контроль над її розповсюдженням і набір необхідних додаткових послуг, а також для підвищення якості обслуговування користувачів і зниження навантаження на мережу, були розроблені технології CDN.

Висока інтенсивність зростання трафіку в мережі Інтернет призводить до збільшення кількості запитів до популярних ресурсів, що досить часто створює трафік, який далеко виходить за межі можливостей одного сервера. У зв'язку з цим, можуть бути присутні затримки при доступі користувачів до мережевих додатків. Зміна інфраструктури сайту, чи будь якого іншого серверного додатку на локальний кластер, не забезпечує повного вирішення даної проблеми, оскільки канал між кластером і глобальною мережею може стати вузьким місцем даної інфраструктури. Більш ефективним рішенням є розподіл серверів географічно, так, щоб вони розташовувалися в окремих мережах. При використанні такої архітектури, роль балансування навантаження суттєво

зростає. Це зумовлено тим, що об'єкт, який розподіляє запити, може здійснювати перенаправлення, як на основі завантаження мережі і серверів, так і на основі відстані між клієнтом і серверами, і, за рахунок покращення роботи алгоритмів балансування навантаження, можна досягти покращення якості обслуговування в мережах розповсюдження контенту CDN.

4.2. Метод передавання та балансування навантаження в CDN мережах для забезпечення заданої якості сервісу

4.2.1. Метод передавання мультисервісного контенту через мережу CDN

Мережа доставки (розподілу) контенту (Content Delivery Network або Content Distribution Network, CDN) – географічно розподілена мережева інфраструктура, що дозволяє оптимізувати доставку і розподіл контенту кінцевим користувачам в мережі Інтернет. Використання контент-провайдерів CDN мереж сприяє збільшенню швидкості завантаження інтернет-користувачами аудіо-, відео-програмного, ігрового та інших видів цифрового контенту в точках присутності мережі CDN. Основною задачею CDN є максимальне наближення контенту до кінцевого користувача [130].

Технологія CDN передбачає використання великої кількості серверів, пов'язаних власними або орендованими високошвидкісними каналами зв'язку і розміщених, по можливості, якнайближче до кінцевих споживачів інформації. Технологія CDN функціонує на верхніх рівнях мережі, використовуючи стандартні протоколи Інтернет для передачі даних. Вона має централізоване управління і в ній можливе використання будь-яких інших технологій та протоколів, в тому числі приватних, що дозволяє домогтися більшої ефективності, в порівнянні з публічною мережею. В основі CDN лежать два принципи:

1. Переміщення інформації на найближчі до кінцевих споживачів вузли.
2. Спільне використання кешуючих серверів CDN.

Мережі, на основі технології CDN, забезпечують доставку інформації в інтересах та під контролем її постачальника і поєднують технології кешування

та реплікації. Саме тому, а також завдяки централізованому контролю і можливості застосування всередині CDN будь-яких спеціалізованих технологій, CDN дозволяє підвищити якість обслуговування користувачів і краще використовувати мережеві ресурси. Крім того, спільне використання CDN багатьма постачальниками контенту дозволяє їм скоротити свої витрати. Таким чином, мережі CDN дозволяють поєднувати переваги реплікації і кешування та практично позбавлені їх недоліків. Аналіз розвитку CDN показує, що сучасні мережі такого типу здатні ефективно доставляти будь-які типи інформації і забезпечувати постачальників інформації всіма необхідними послугами із забезпеченням якості надання послуг.

Щодо використання технології CDN, то тут варто зазначити про типи інформації, яка кешується. В основному, інформація може бути статичною та динамічною. Також, варто врахувати такий тип інформації, як трансляція відео в реальному часі (Live Streaming). В залежності від типу інформації, принцип передавання та кешування буде відрізнятись.

Алгоритм роботи методу передавання інформації, в залежності від її типу, представлений на рисунку 4.5.

Для передавання статичних даних, а це, як правило, зображення різних форматів, які змінюються досить рідко, використовуються правила стандартного кешування. Це означає, що файл поміщується в кеш на кешуючому (граничному, edge) сервері, зберігається там на фіксований час та вже з цього сервера буде здійснюватись передача до кінцевого користувача.

Приклад такої передачі:

```
[edgeserver@user1 ~]$ curl -I http://mysite.com/assets/img/access-  
platform.png  
HTTP/1.1 200 OK  
Server: nginx  
Date: Thu, 26 Jun 2014 12:10:56 GMT  
Content-Type: image/png  
Content-Length: 123842  
Connection: keep-alive  
Last-Modified: Tue, 12 Nov 2013 12:18:34 GMT  
Cache-Control: max-age=2592000, public
```

Expires: Sat, 26 Jul 2014 12:10:47 GMT
X-Age: 936
X-Edge-IP: 37.220.34.247
X-Edge-Location: Amsterdam, NL
X-Cache: HIT
Accept-Ranges: bytes

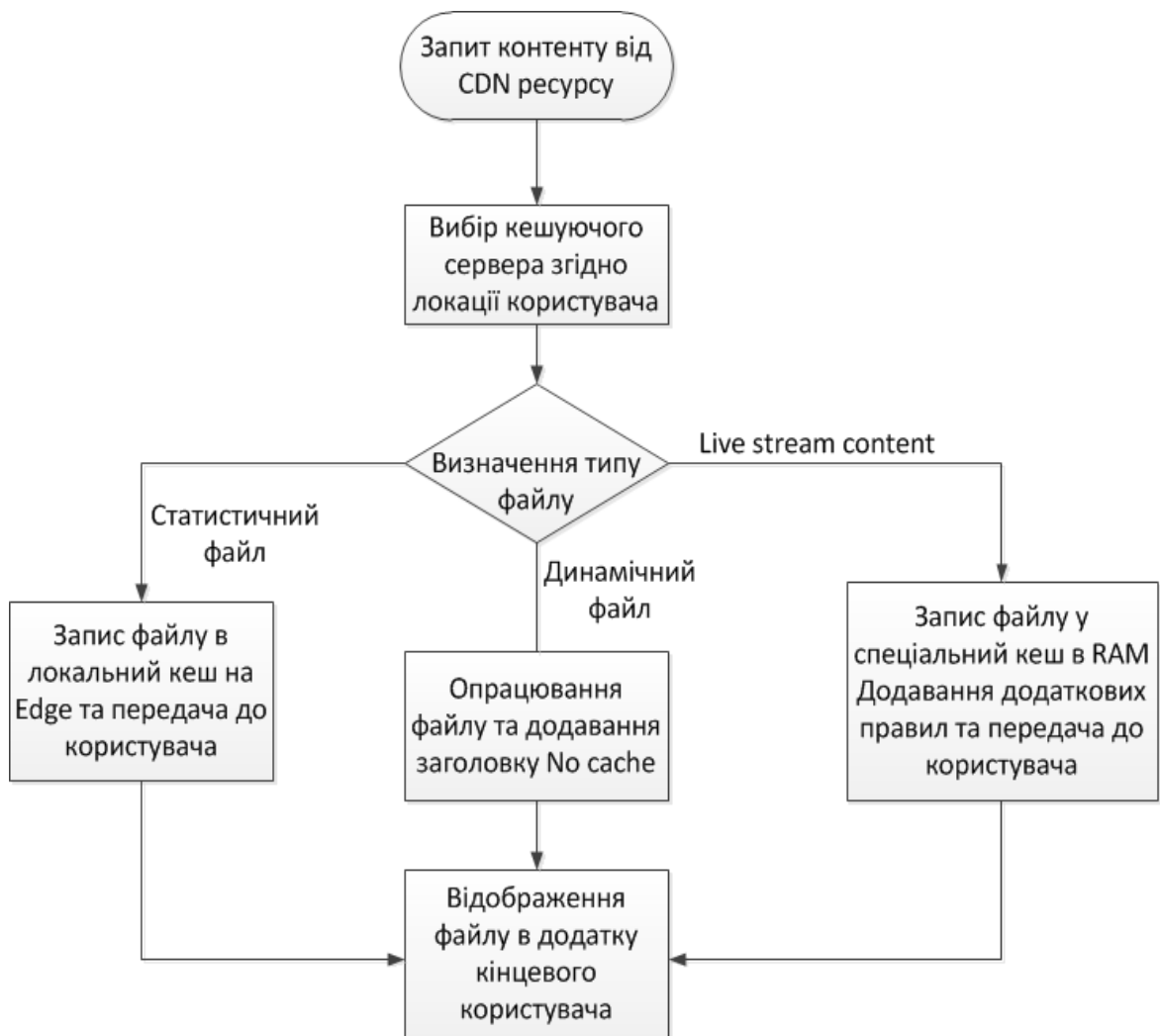


Рис. 4.5. Алгоритм роботи методу передавання мультисервісного контенту через мережу CDN.

Із прикладу зрозуміло, що файл є дозволеним для кешування та знаходиться в кеші. Про це свідчать заголовки:

Cache-Control: max-age=2592000, public – максимально допустимий час кешування файлу та дозвіл на кешування.

X-Age: 936 – час збереження файлу в кеші на кешуючому сервері.

Інший підхід використовується при передаванні динамічних файлів. Це можуть бути, наприклад, файли баз даних, або ж інші файли, які часто

змінюються. Кешування таких файлів не є рекомендованим, оскільки в них завжди знаходяться найсвіжіші копії даних, які не потрібно кешувати. Цілком очевидно, що для кінцевого клієнта завжди має бути доступна остання робоча версія файлу. Приклад передачі такого файлу через мережу доставки контенту:

```
[edgeserver@ user1 ~]$ curl -I http://mysite.com/assets/img/dynamic.db
HTTP/1.1 200 OK
Server: nginx
Date: Thu, 26 Jun 2014 12::47 GMT
Content-Type: database
Content-Length: 123842
Connection: keep-alive
Last-Modified: Tue, 12 Nov 2013 12:18:34 GMT
Cache-Control: no-cache
Expires: Sat, 26 Jul 2014 12:10:47 GMT
X-Edge-IP: 37.220.34.247
X-Edge-Location: Amsterdam, NL
X-Cache: MISS
Accept-Ranges: bytes
```

Cache-Control: no-cache – заголовок, який забороняє кешувати всі файли даного типу.

X-Cache: MISS – це свідчить про те, що файл було отримано з кешуючого сервера, а кешуючий сервер отримав його з серверу походження, без збереження в локальному кеші.

Ще одним прикладом контенту, що передається по мережах доставки контенту, є прямі трансляції Live Streaming. Для такого типу контенту використовується RAM пам'ять, для пришвидшеного доступу до даних, а також спеціальні правила для кешування. Приклад таких правил для кешування:

IF extension is m3u8 THEN force edge to cache 1 second, AND

IF extension is ts THEN force edge to cache 1 hour

Наведені вище способи передавання та кешування трафіку, дають нам можливість зрозуміти, що для кожного із типів повинен використовуватись конкретний механізм передачі та спосіб кешування.

4.2.2. Визначення цільової функції та механізми балансування навантаження в CDN мережах.

Розглянемо архітектуру та механізм роботи CDN мережі (рис.4.6). Всі запити, що надходять від користувачів, направляються до найближчого, або ж найменш завантаженого сервера для отримання швидкої відповіді. Як правило, механізм роботи CDN полягає у виборі сервера віддачі контенту для кожного користувача. Найбільш поширеними методами вибору є:

- вибір сервера, найближчого до користувача, на основі служби доменних імен DNS;
- визначення завантаженості кожного сервера, та вибір найменш завантаженого;
- вибір сервера, який забезпечує мінімальне значення затримки при передаванні даних на шляху до кінцевого користувача.

Всі ці методи є необхідними для забезпечення ефективного використання ресурсів мережі та вузлів доставки контенту [131].



Рис. 4.6. Типова архітектура мережі CDN.

Для забезпечення задовільної якості обслуговування, введемо поняття цільової функції. Основна її умова – це забезпечення заданої якості сервісу в CDN мережі. Цільова функція буде представлена таким чином:

$$F = \min(t_i, l_i, p_i), \quad (4.1)$$

де t_i – час затримки передавання даних від i -го кешуючого сервера до кінцевого користувача;

l_i – завантаженість i -го кешуючого сервера;

P_i – ймовірність того, що пакет буде втрачений на шляху передачі від i -го кешуючого сервера до кінцевого користувача.

Значення часу затримки, навантаження на сервер та ймовірності втрати пакетів, на шляху передавання, повинні відповідати певним вимогам, а саме:

$$t_i < T_i, l_i < L_i, p_i < P_i, \quad (4.2)$$

де T_i – максимально дозволене значення часу затримки передачі даних;

L_i – максимально дозволене значення завантаженості сервера;

P_i – максимально допустиме значення ймовірності втрати пакетів при передачі даних.

Таким чином, використання цільової функції дає змогу вибрати оптимальний кешуючий сервер, який буде опрацьовувати запити користувачів.

В процесі зростання навантаження на кешуючі сервери, виникає потреба у підвищенні їхньої продуктивності, або ж збільшення їх кількості. При використанні другого принципу, навантаження між серверами можна рівномірно розподіляти, використовуючи технологію балансування навантаження. Технологія балансування навантаження є одним з основних елементів в CDN [132]. Використання цієї технології може гарантувати, що запити користувачів будуть направлені до найближчого кешуючого сервера з мінімальним навантаженням в мережі, таким чином ефективно розподіляючи та використовуючи ресурси CDN. На рис. 4.7 представлено схему балансування навантаження у мережі CDN, яка містить n серверів.

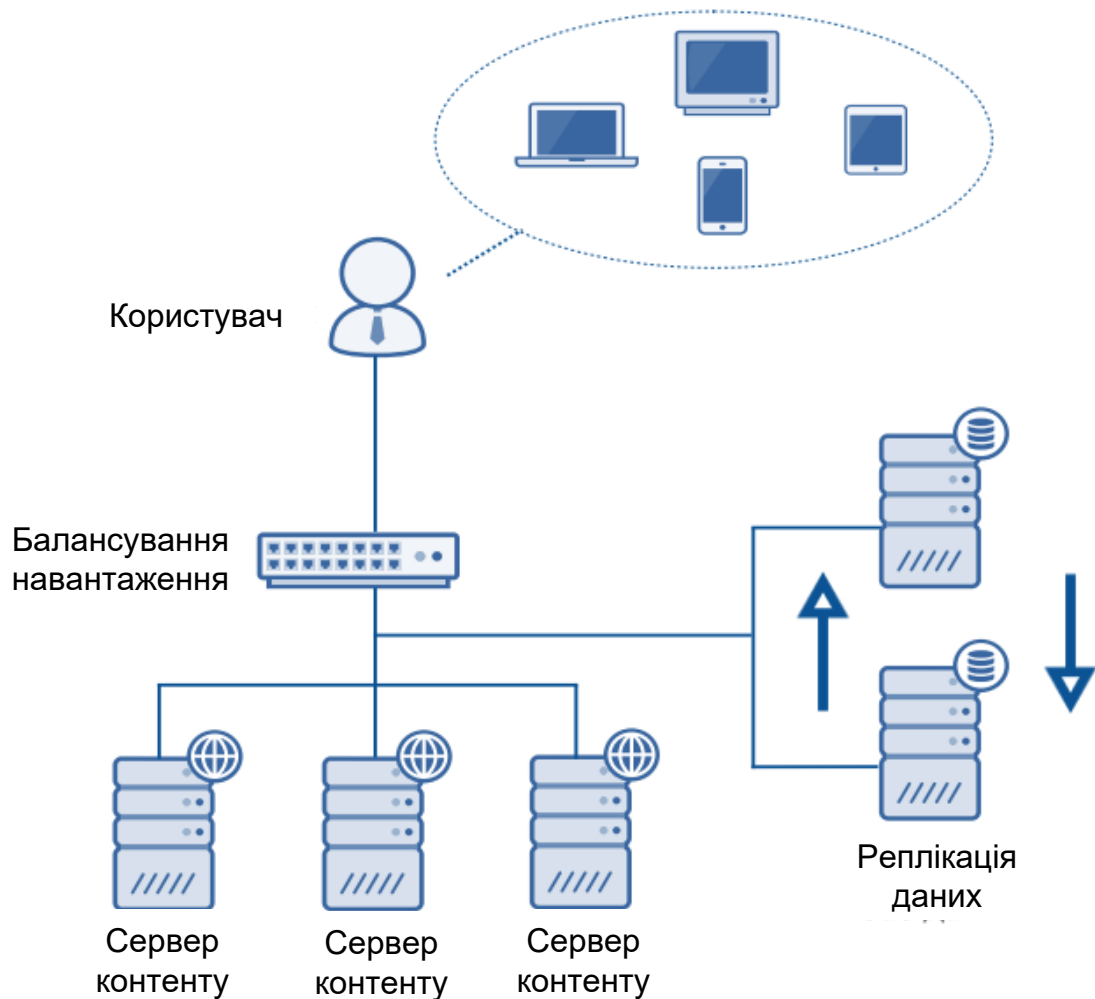


Рис. 4.7. Схема балансування навантаження у CDN мережі.

Будемо вважати, що λ_i , $i = 1 \dots n$ – це інтенсивність надходження пакетів на вузол i в момент часу t . В такому випадку, сумарна інтенсивність у мережі буде визначатись, як:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.3)$$

Варто зазначити, що, окрім власних запитів, кожен кешуючий сервер може також отримувати запити від інших серверів. Очевидно, що відсоток завантаженості серверних ресурсів, які виділяються на опрацювання запитів від інших серверів, буде залежати від багатьох факторів. Таким чином, інтенсивність запитів, які надходять від інших серверів, буде визначатись за формулою:

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \omega_{ji}, \quad (4.4)$$

де ω_{ji} – частина потоку λ_j , яка перенаправляється від сервера j до сервера i . В результаті, середня інтенсивність вхідного навантаження, що надходить на вузол i , в конкретний період часу, може бути визначена за формулою:

$$\alpha_i = \lambda_i - \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \omega_{ij} + \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \omega_{ji}. \quad (4.5)$$

Перший доданок визначає частину навантаження, яке вузол i переадресовує до інших вузлів, наступний – частину навантаження, яке було отримано вузлом i від інших серверів. Інтенсивність обробки пакетів μ_i у вузлі i має бути більшою, ніж інтенсивність приймання пакетів λ_i в режимі нормальної роботи.

Коли мова йде про дослідження якості обслуговування в мережах доставки контенту, чи про методи оптимізації та розподілу навантаження між вузлами мережі, важливе значення має середній час затримки передачі даних до кінцевого користувача. Будемо вважати, що потік заявок, які надходять на вузол обслуговування, є Пуассонівським. Кожен вузол розглянемо, як систему масового обслуговування типу M/M/1 [133- 135]. В такому випадку, середній час затримки буде визначатись, як:

$$T = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot T_i = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i}{\mu_i - a_i} \right). \quad (4.6)$$

Враховуючи затримку при передаванні даних між обслуговуючими пристроями, інтенсивність обробки пакетів та інтенсивність надходження до вузла, середня затримка може бути визначена так:

$$T = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i}{C_i - F_i} + T_{Fi} \right), \quad (4.7)$$

де T_{Fi} – затримка передачі між кешуючими серверами, C_i – інтенсивність обслуговування вузла обробки контенту, яка в даному випадку визначатиметься

пропускною здатністю, F_i – інтенсивність надходження пакетів на вузол обслуговування. Із формули 4.7 очевидно, що затримка зростатиме, коли вузол перевантажений обробкою запитів. Однією з проблем розподілу ресурсів в системі доставки контенту є вибір оптимальної структури мережі вузлів [136, 137]. Для мінімізації затримки потрібно зменшити навантаження на кожен із серверів та прокласти оптимальні маршрути між серверами обробки контенту. Представимо графічні залежності часу затримки від кількості кешуючих серверів та інтенсивності потоку, який опрацьовується ними.

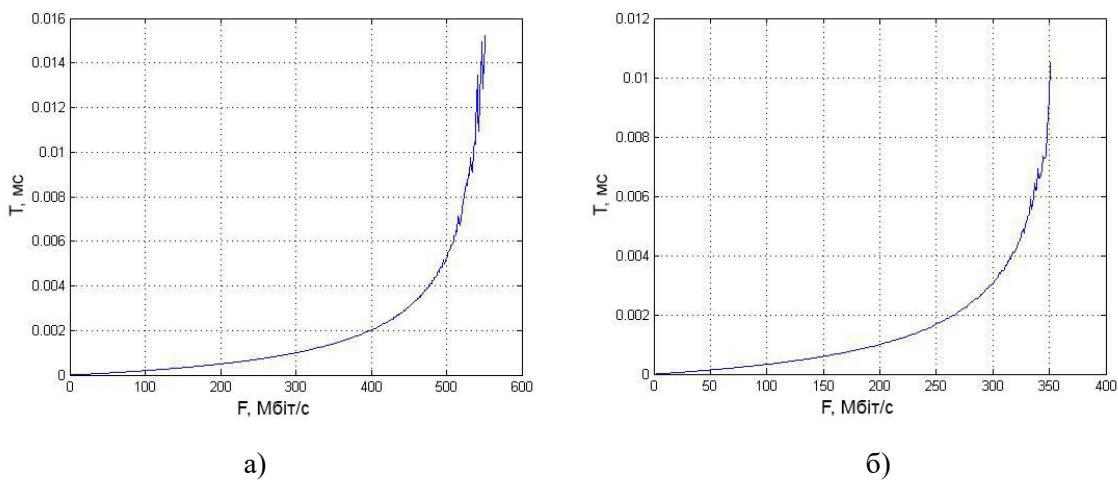


Рис. 4.8. Залежність часу затримки обслуговування на кешуючому сервері від інтенсивності надходження запитів користувачів, при різних значеннях інтенсивності обслуговування: а) $C_i = 600\text{Мбіт/с}$, б) $C_i = 400\text{Мбіт/с}$.

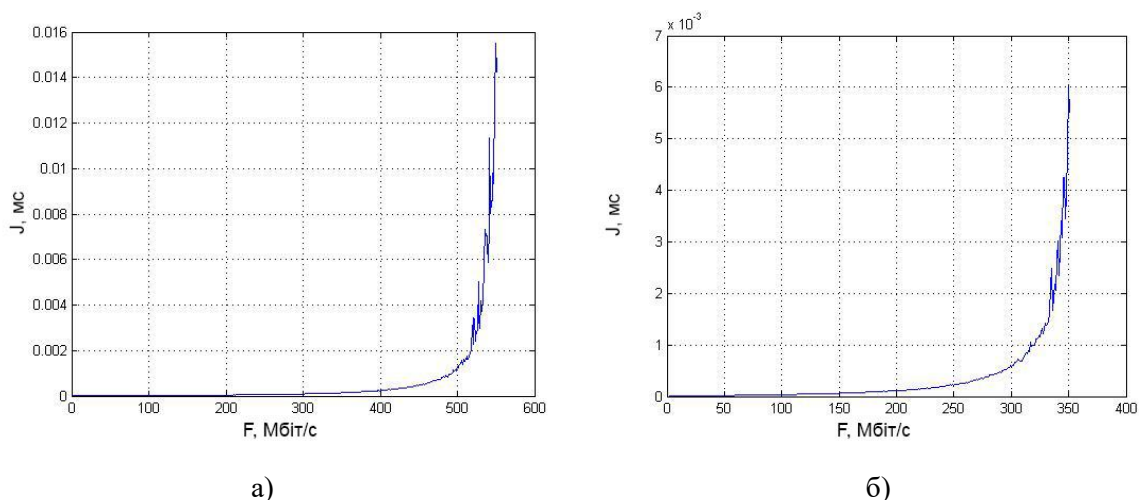


Рис. 4.9. Залежність джитера від інтенсивності надходження запитів користувачів, при різних значеннях інтенсивності обслуговування: а) $C_i=600\text{Мбіт/с}$, б) $C_i = 400\text{Мбіт/с}$.

Як бачимо із рисунків 4.8, 4.9, затримка та джитер збільшується із зростанням інтенсивності вхідного потоку. Для того, щоб мінімізувати це значення, потрібно збільшити продуктивність обслуговуючих пристроїв або ж мінімізувати затримки між кешуючими серверами. Оскільки, не завжди доцільним є нарощення ресурсів обслуговуючих пристроїв, то варіантом зменшення завантаженості серверів обробки запитів кінцевих користувачів є використання балансування навантаження між серверами CDN мережі [138]. Механізм балансування навантаження дасть змогу більш раціонально перенаправляти запити до серверів, які зможуть надати сервіс із кращою якістю, а саме: меншою затримкою та джитером, що є критичними для послуг реального часу.

4.3. Дослідження механізмів забезпечення якості передачі інформації в мережах доставки контенту.

4.3.1. Експертна оцінка якості послуг

Інтеграція операторами та провайдерами нових мультимедійних послуг, таких, як: відео за запитом (VoD) та цифрового телебачення (IPTV) в наявну мережеву інфраструктуру, та підтримка існуючих із заданою якістю обслуговування (QoS), вимагає збільшення відповідних мережевих ресурсів та їх ефективного використання, для забезпечення відповідного рівня якості обслуговування. За допомогою таких параметрів, як: пропускна здатність, втрата пакетів і затримки та джиттер, здійснюються вимірювання параметрів QoS. Проте, варто зауважити, що найкращим критерієм для оцінки якості відео є людське око, але потрібно враховувати, що такий метод оцінки є вельми суб'єктивним, в той час, як QoS параметри простіше та швидше піддаються виміру. Належне забезпечення QoS буде сприяти тому, що відеопотоки передаватимуться від сервера до кінцевого абонентського пристрою належним чином. Провайдерам послуг необхідно відстежувати, як користувачі сприймають якість послуг відеотрансляції. Роль суб'єктивних оцінок, при цьому, збільшується настільки, що потрібні нові метрики якості. Власне, для

того, щоб забезпечити краще відображення сприйняття якості споживачами, було запропоновано термін QoE [139], який використовується для опису сприйняття користувачем якості мультимедійних послуг. QoE охоплює безліч різних аспектів, серед яких якість мультимедіа (відео та аудіо), затримка запити відео, взаємодія з сервісом або пристроєм відображення (затримки перемикання каналів, дистанційне керування, електронний програмний гід), контенту (індивідуальні інтереси глядача, популярність матеріалу), надійність (доступність, послідовність), очікувана глядачем якість (від художнього фільму, показаного у кінотеатрі та на мобільному пристрої), відеодосвід глядача, який також визначає очікувану глядачем якість (важко переглядати відео в звичайній якості після перегляду контенту високої роздільної здатності), тип та характеристики монітора або телевізора (розмір, роздільна здатність, яскравість, контрастність, колір, час реакції), безпека (вміст контенту, конфіденційність). QoE параметри складніші, потребують тривалого періоду вимірювання, не призначені для моніторингу. Загалом якість сприйняття відео можна розглядати з двох різних поглядів:

1. Суб'єктивного сприйняття якості. У суб'єктивному дослідженні, експертам (кількістю 15 або більше) пропонується переглядати фрагменти відео та оцінювати їх якість. Середній бал усіх експертів за дане відео відомий як «середня експертна оцінка» (MOS). Також слід пам'ятати про те, що існують різні суб'єктивні методи тестування. Хоча основним недоліком є потреба у великій кількості експертів, що обмежує кількість відеоматеріалу, який може бути оцінений в прийнятні терміни, суб'єктивні оцінювання є еталоном для будь-яких об'єктивних вимірювань [140].
2. Об'єктивної оцінки якості (чисельної). Об'єктивними параметрами є категорії метрик, які можуть передбачити якість сприйняття відео автоматично і можуть бути поділені на три категорії: full-reference (FR), reduced-reference (RR) та no-reference (NR) метрики.

Завдяки своїй простоті, найпоширенішими об'єктивними FR-метриками оцінки якості відео є середньоквадратична помилка (MSE) та пікове співвідношення сигнал/шум (PSNR). Хоча їх значення не зовсім точно відповідають сприйняттю якості через нелінійну поведінку людської системи зору. Вони визначаються як:

$$MSE = \frac{1}{w \cdot h} \cdot \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h (x_{i,j} - y_{i,j})^2. \quad (4.8)$$

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{I_{\max}^2}{MSE}, \quad (4.9)$$

де I_{\max} – максимально можлива величина пікселів;

x, y – пікселі оригінального і відтвореного зображення;

w, h – розмір зображення.

RR метрики вимірюють якість зображення на основі часткової інформації про зображення, якої достатньо для оцінки якості. Оцінка якості здійснюється на основі порівняння часткової інформації про вихідне зображення з отриманим в контрольній точці.

NR метрики для вимірювання потребують лише доступу до відеопотоку і мають прийнятну продуктивність, за умови наявності відомостей про тип викривлення зображення та компонент системи передачі. RR та NR метрики гнучкіші за FR метрики, про те є складнішими.

Загалом, можна вважати, що QoS є важливою для операторів, а QoE важливіша для користувачів. Однією з основних вимог досягнення високого рівня задоволеності споживачів є впровадження системи вимірювань QoE, для моніторингу послуг цифрового телебачення та відео на замовлення. Зрозуміло, що термін QoE пов'язаний не лише з якістю відео, але може також охоплювати інші сфери. Більш глибоке розуміння провайдерами послуг QoE має вирішальне значення для забезпечення ефективної роботи системи IPTV та дасть змогу розкрити потенціал технології IPTV.

4.3.2. Дослідження впливу параметрів кодеку H264 на якість відеосигналу

Очевидно, що успішне впровадження послуг трансляції відеопотоків вимагає відмінної якості відео. Запорукою успіху надання IPTV послуг є забезпечення якості сприйняття QoE, яка оцінюється кінцевим користувачем. Тестування медіа потоків, що передаються у конвергентних мережах, є досить складною задачею. Можемо розглядати два основних підходи до вимірювань QoE [141]. Один з них передбачає контроль параметрів якості мережі. Найпоширеніший показник – Media Delivery Index, MDI – включає в себе дані про втрачені і помилкові пакети, джитер і затримки. Оцінці піддаються значення, отримані у довільний короткий проміжок часу. Втрата IP пакету призводить до помітних спотворень на екрані. 0,5% втрачених пакетів будуть помітні оком. Якщо ж втрати сягнуть 5%, динамічні сцени будуть настільки пошкоджені, що перегляд доведеться припинити. Крім того, втрачений пакет здатний істотно збільшити час перемикання каналу.

Другий підхід базується безпосередньо на оцінці якості відео. Тут використовується механізм з виявлення таких спотворень, які помітні глядачеві – «розсіпання» зображення, завмирання, порушення кольору, наявність «артефактів» і т.п.

QoE тестування IPTV має охоплювати як рівень обслуговування, так і рівень передачі, для найбільш точного результату [142]. Для найточніших результатів, необхідно провести дослідження впливу параметрів кодування та надійності мережі на якість відеопотоків, які передаються в режимі реального часу. Слід зазначити, що параметри кодера слід вибирати найбільш оптимально, оскільки кодування буде здійснюватись в режимі реального часу.

Розглянемо мережеву архітектуру, в якій буде проводитись дослідження IPTV відео потоків реального часу, та визначимо ключові вимоги до неї. Протоколи та стандарти, для доставки послуг IPTV, визначені в [143 - 145].

Одним із вузьких місць в існуючих мережах може бути обмеження пропускної здатності зі сторони провайдера [146]. На рис. 4.10 зображено

зразок IPTV архітектури мережевої топології. Зображена мережева архітектура буде володіти властивістю масштабування із збільшенням числа абонентів.

Питання вибору компонентів IPTV інфраструктури (головної станції, транспортних протоколів, абонентських приставок) вирішується провайдером в кожному окремому випадку. Функціональна блок-схема OTT/IPTV платформи наведена на рис. 4.11.

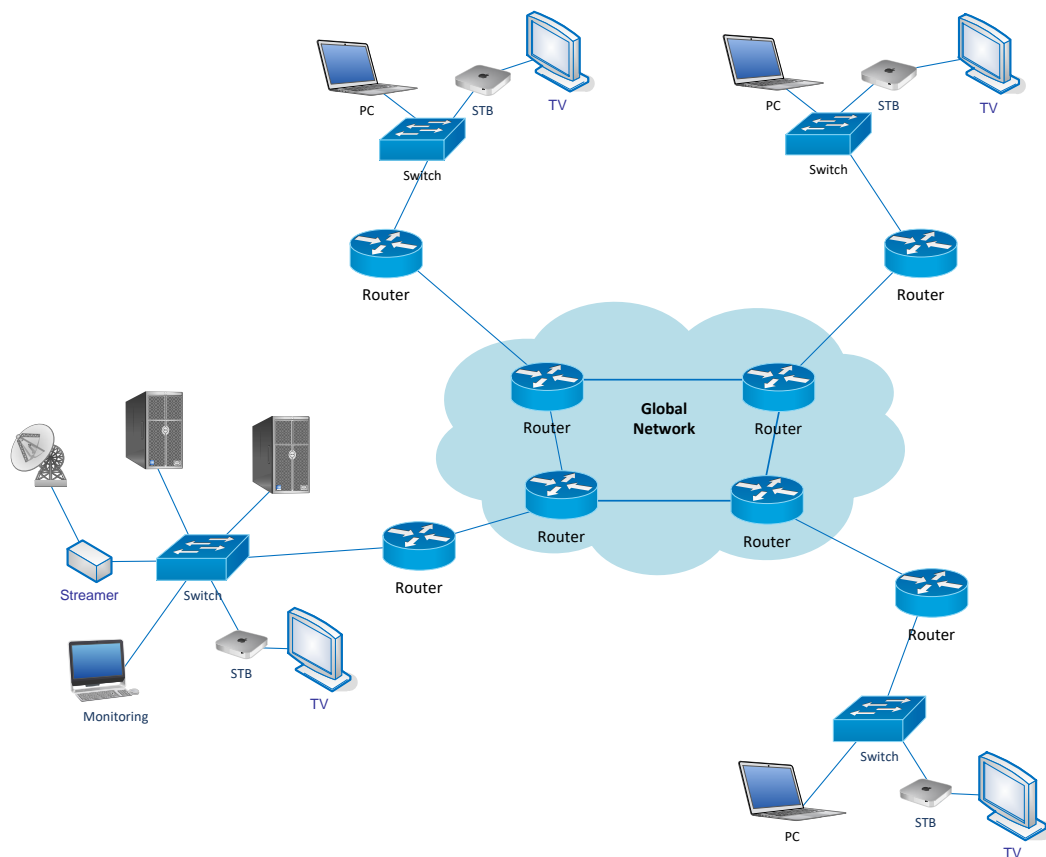


Рис. 4.10. Мережева архітектура IPTV/OTT мережі.

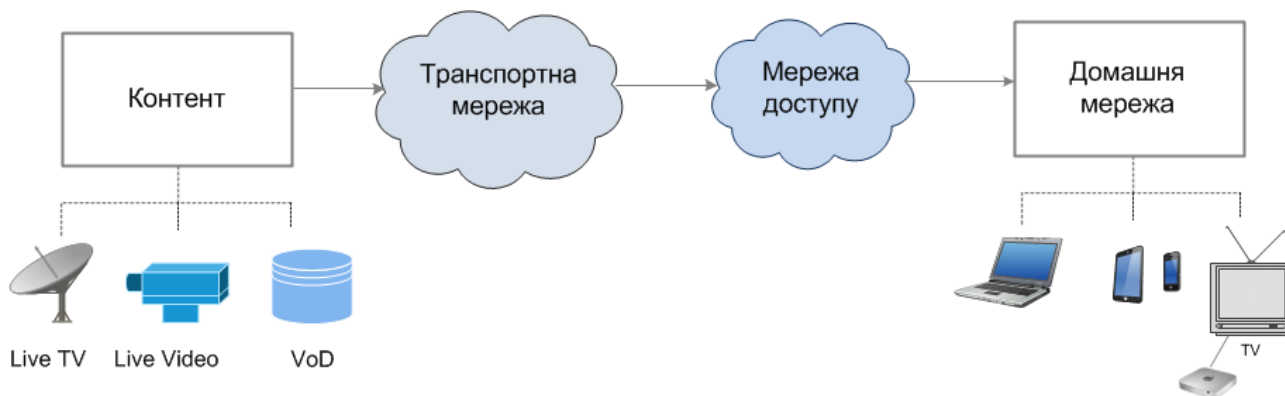


Рис. 4.11. Функціональна блок-схема OTT/IPTV платформи.

Перш, ніж передавати відеопотоки через мережу, в більшості випадків, їх компресують та закоднують, з метою пониження бітрейту, щоб знизити вимоги до пропускної здатності каналу передачі даних. Кодування проводиться з формату MPEG-2 в MPEG-4. Є дуже велика кількість параметрів кодеку, які впливають на якість та ступінь компресії відеопотоку. В даному дослідженні було вибрано параметри відеокодека h264, що використовуються найчастіше, серед яких варто зазначити такі:

```
{vcodec=h264,threads=2,fps=25,highpriority=yes,venc=x264{me=hex,merange=8,s  
ubme=3,analyse=none,profile=baseline,direct=spatial,partitions=«p8x8,b8x8,i8x8,i  
4x4»,pbratio=1.5,bframes=1,ref=1,mixed-refs=off,weightb=on,vbv-maxrate=1000,  
vbvbufsize=1500,ratetol=1500.0,scenecut=50},vb=1000,deinterlace=yes,nohurry-  
up,acodec=mp4a,ab=128,channels=1,audio-sync}.
```

Найважливішими з цих параметрів є:

- *Threads* – дозволяє проводити паралельне кодування потоків на декількох CPU.
- *Fps* – кількість кадрів за секунду, які будуть відображатись на екрані телевізора чи монітора (fps=25 вважається достатнім для того, щоб зображення виглядало неперервним).
- *me* – використовується для вибору методу оцінки руху. Зміна цієї опції чинить прямий вплив на співвідношення швидкість/якість. Значення *me = hex* - розумний вибір між швидкістю і якістю.
- *partitions* – задіює використання сегментів у передбачених макроблоках. Її включення призведе до досить постійної (10% -15%) втрати швидкості. Ця опція є практично непотрібною для вихідного матеріалу, що містить невелику кількість динамічних сцен.
- *bframes* – використання В-кадрів зазвичай прискорює другий прохід, а також може пришвидшити кодування з одним проходом, якщо відключено адаптивне прийняття рішення про В-кадри. З відключеним адаптивним прийняттям рішення про В-кадри, оптимальне значення цієї опції звичайно не перевищує *bframes = 1*.
- *vbv-maxrate* – ця опція вказує на максимально можливе значення

бітрейту вихідного відео потоку.

- *vbv-buFSIZE* - опція, яка задає розмір буфера. Розмір буфера слід вибирати таким чином, щоб можна було зменшити вплив затримок при передачі сигналу мережею, а також затримок, які виникають при кодуванні вхідного відео та аудіо сигналу.
- *vb* – це дійсне значення бітрейту, з яким буде транслюватись вихідний відеопотік.

В наступних кількох опціях задаються параметри для кодування аудіо потоків, а саме: *acodec* – задає яким кодеком буде закодовано аудіо потік, та параметр *ab* – задає значення бітрейту для вихідного аудіопотоку [147].

З представлених опцій бачимо, що окремо можна задавати параметри, як для аудіо потоків, так і для відео. При цьому не слід забувати, що будь який потік (аудіо чи відео) можна передавати в оригіналі без перекодування, а інший, при цьому, перекодувати в реальному часі.

При проведенні досліджень, на вхід подавався цифровий IPTV канал у форматі MPEG2, бітрейт якого в середньому становить 3-4 Мбіт/с. Для дослідження було використано різні значення вихідного бітрейту саме для відео потоку (бітрейт аудіо потоку залишався стабільним, 128Кбіт/с). Декодований потік аналізувався за допомогою Elicard Stream Analyzer протягом трьох хвилин. В результаті підраховувались значення помилкових чи втрачених пакетів. Спочатку встановлювалось мінімальне значення бітрейту, при якому ще якість вихідного сигналу була задовільною, пізніше значення бітрейту збільшувалось до тих пір, поки кількість помилкових чи втрачених пакетів стала рівною 0. Результати досліджень представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Результати досліджень.

Кількість втрачених чи помилкових пакетів, N.	Значення вихідного бітрейту. В, Кбіт/с
58	256
28	500
17	750
11	1000

6	1300
2	1500
0	1750

За результатами досліджень на рис.4.12 представлено графічну залежність кількості помилково прийнятих пакетів від значення бітрейту вихідного потоку.



Рис. 4.12. Залежність кількості втрачених пакетів від значення бітрейту вихідного потоку.

Далі представлено ще кілька залежностей, які показують, як залежить середня завантаженість сервера, на якому проводиться кодування вхідного потоку, від значень вихідного бітрейту. Представимо графічні залежності для трьох випадків, при відсутності вхідного потоку (робота машини без виконання кодування), при мінімальному значенні бітрейту, тобто 256Кбіт/с та максимальному значенні 1750Кбіт/с (рис. 4.13-4.15).

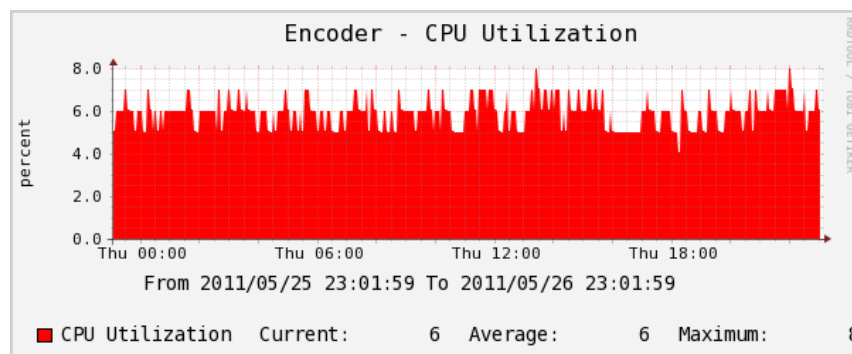


Рис.4.13. Завантаженість процесора при відсутності кодування.

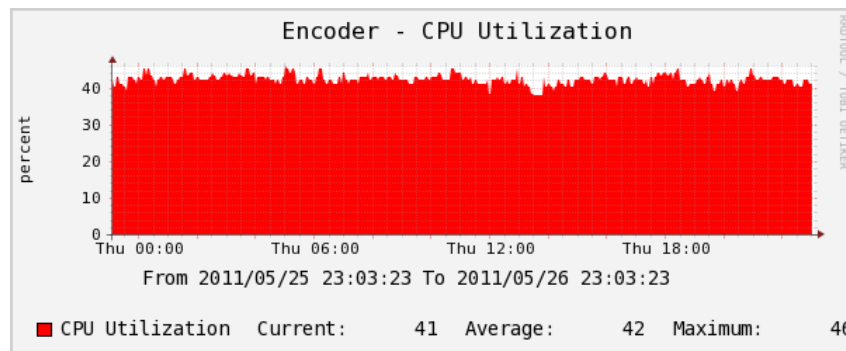


Рис.4.14. Завантаженість процесора при кодуванні відео потоку з вихідним бітрейтом 256 Кбіт/с.

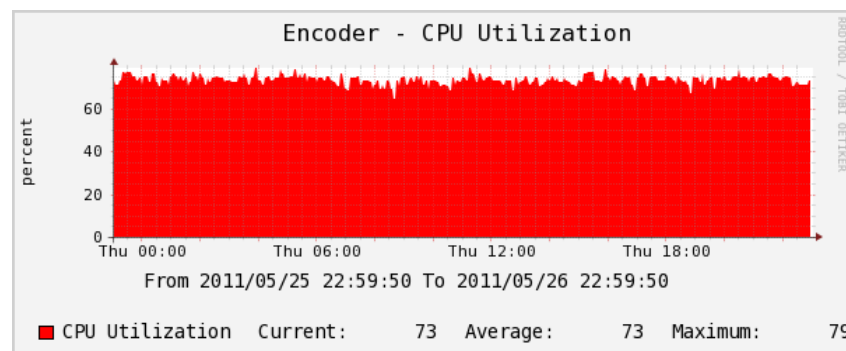


Рис.4.15. Завантаженість процесора при кодуванні відеопотоку з вихідним бітрейтом 1750 Кбіт/с.

Із представлених графіків бачимо, що завантаженість процесора при нормальній роботі системи та відсутності кодування, становить в середньому 6%, при кодуванні відеопотоку з вихідним бітрейтом 256 Кбіт/с це значення є рівним 40%, а для останнього випадку, тобто максимального вихідного бітрейту, завантаженість становить 70%. При значенні вихідного бітрейту 256 Кбіт/с, завантаженість процесора була невисока, однак кількість втрачених пакетів досить висока. Також можна зауважити, що, при таких параметрах, якість сигналу була незадовільною – це можна було побачити наочно – проявлялись підмерзання та розсіпання зображення. При вихідному бітрейті 1800 Кбіт/с, якість вихідного сигналу була досить хорошою, втрачених пакетів не було зовсім, проте завантаженість процесора була досить значною.

Базуючись на існуючих підходах оцінки якості цифрового телебачення, було вибрано метод, який дав змогу оцінити вплив параметрів кодера на якість відеосигналу та завантаженість машини, на якій проводиться кодування. Проаналізувавши проведені дослідження, можна стверджувати, що найбільш

оптимальними є параметри кодера із значенням вихідного бітрейту 1500 Кбіт/с, при якому втрати пакету практично непомітні, а якість відео сигналу є задовільною для сприйняття. Проведене дослідження дає змогу ефективно підбирати параметри для проведення ефективного кодування, які позначаються на якості цифрового телебачення, та зможуть забезпечити надійний і якісний сервіс для кінцевих користувачів, що є однією із найважливіших вимог будь-якого провайдера послуг [148].

4.4. Експериментальні дослідження втрат відеотрафіку без пріоритетизації та ефективність застосування механізму диференціювання трафіку.

Зростання обсягів надання мультимедійних послуг, таких, як: передача голосу, відео за запитом та цифрового телебачення в IP мережах та забезпечення відповідної якості, підтверджують актуальність розробки і дослідження методів аналізу та кількісної оцінки якості сучасних телекомунікаційних послуг згідно вимог та стандартів. В угоді про рівень обслуговування (SLA), як правило, зазначаються певні параметри якості обслуговування. Основними параметри якості є смуга пропускання, затримка, джитер (коливання затримки), втрата пакетів та помилкові пакети. Для оцінки якості мультимедійних послуг потрібно враховувати зв'язок цих параметрів з об'єктивними та суб'єктивними оцінками якості послуг користувачами.

4.4.1. Дослідження найпоширеніших проблем QoS та QoE

Метою досліджень було експериментальне відтворення найпоширеніших проблем при передаванні відеоконтенту через мережу. Статистичні дані знімаються з інтерфейсів комутатора Cisco Catalyst 3750, який забезпечує підтримку якості обслуговування (QoS) шляхом класифікації трафіку, за допомогою полів DSCP [149]. Для проведення дослідження використовувався програмний продукт IxChariot компанії Ixia призначений для вимірювання основних характеристик мереж, шляхом передачі реальних відеопотоків [150].

На рис.4.16 наведено візуальні ефекти від трьох найпоширеніших проблем (втрати пакетів, джитер та неправильна послідовність доставки пакетів), пов'язаних з якістю відео, що безпосередньо впливають на якість сприйняття користувачем QoE. Для візуального відтворення впливу різного типу завад на якість зображення використовувалась функція симулювання продукту IxChariot. Для дослідження використано фрагменти фільму «2012»).

На рис. 4.17 продемонстровано ефект візуального сприйняття при зростанні величини втрат пакетів, шляхом симулювання втрат пакетів і відображення цього на екрані при показі відео.

4.4.2. Дослідження ефективності використання механізму диференціювання відеотрафіку

Проведено експериментальні дослідження величини втрат відеотрафіку без пріорітезації та ефективності застосування механізму диференціювання відеотрафіку. Мультимедійний трафік передавався з відеосервера до кінцевого абонента, підключеного до порту комутатора, зі швидкістю 100Мбіт/с (рис.4.18). Вимірювання необхідних параметрів здійснювались за допомогою програми IxChariot.

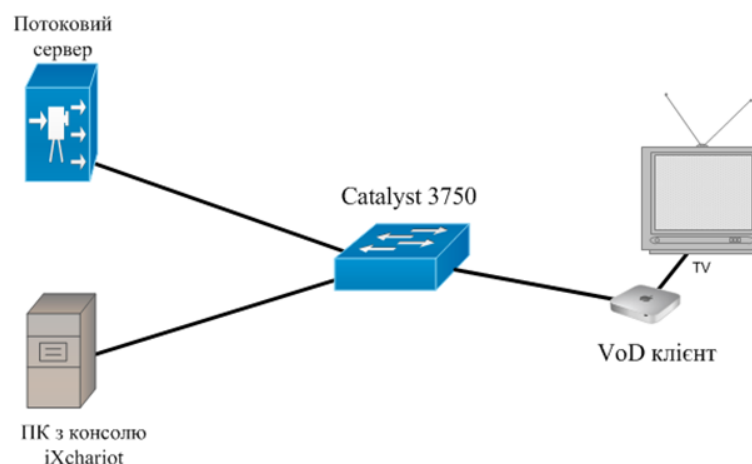
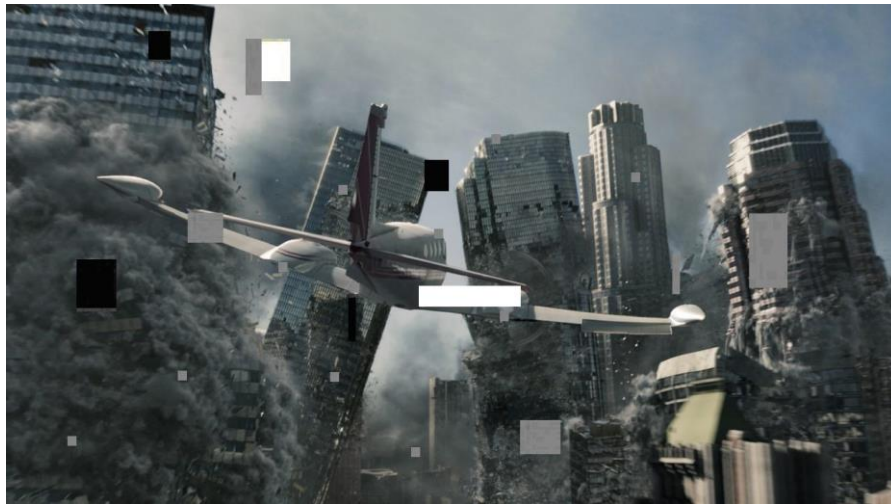
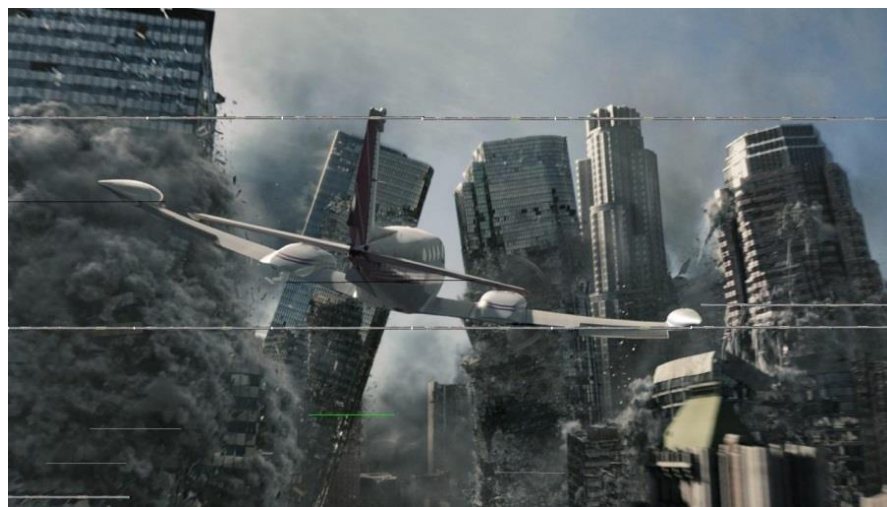


Рисунок 4.18. Схема проведення експериментальних досліджень.

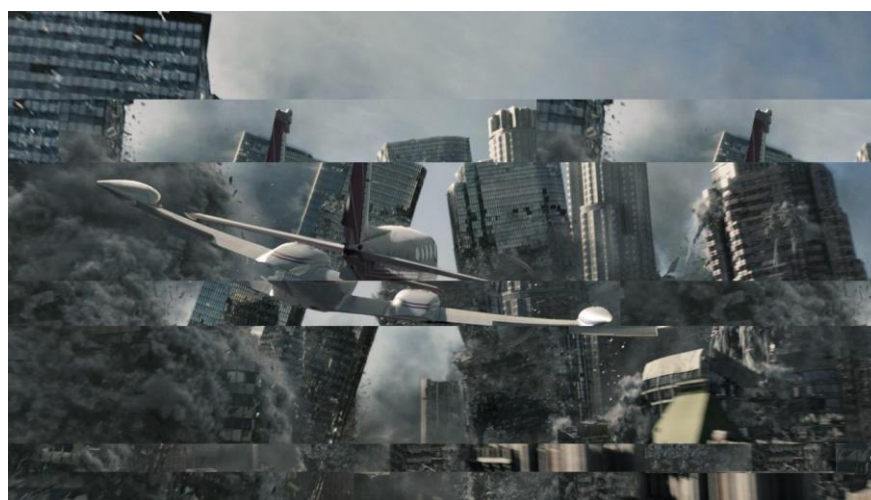
Для тестування використовувались два відеофрагменти фільмів «2012» та «Prestige», тривалістю 150 сек. кожен, зі змінним бітрейтом (рис. 4.19).



а). Втрата пакетів (Packet Loss Effect)



б). Ефект затримки (jitter effect)



в). Невірна послідовність пакетів (Out-of-Order Effect)

Рис. 4.16. Візуальні прояви найбільш поширених проблем QoS (а) джиттер; б) втрата пакетів; в) прибуття пакетів в неправильному порядку).



а). Втрати пакетів 0%.



б). Втрати пакетів 0.5%.



в). Втрати пакетів 5%.

Рис. 4.17. Візуальний ефект сприйняття збільшення втрат пакетів(а) втрати пакетів 0%; б) втрати пакетів 0.5%; в) втрати пакетів 5%.

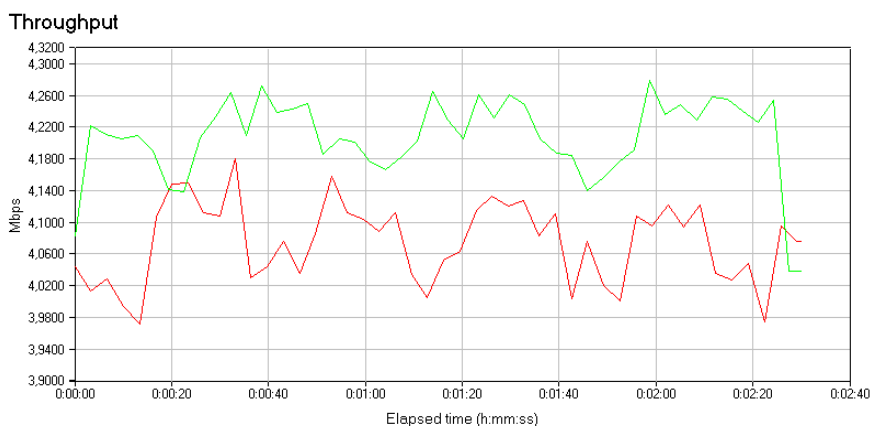
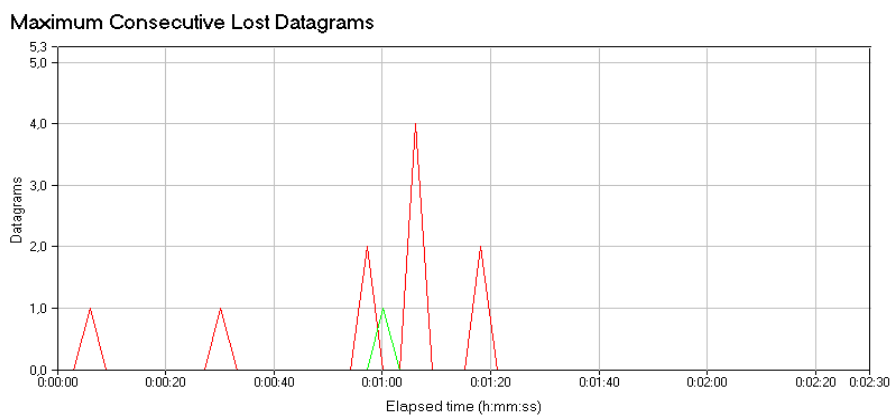


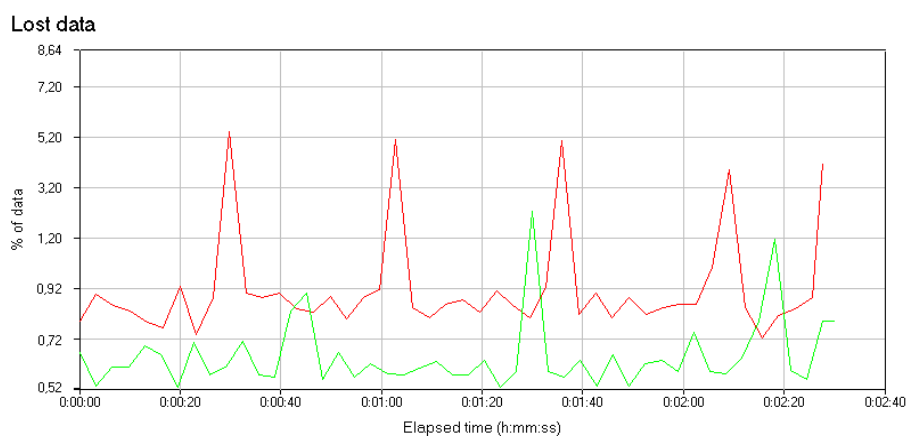
Рисунок 4.19. Характер зміни бітрейту тестових відеофрагментів.

На графіках (рис.4.20, 4.21) наведено залежності втрат послідовностей датаграм, що спричинені пульсацією (вибуховістю) трафіку та відсоток втрат даних для режимів звичайної та пріоритетної передачі.



- - трафік без пріоритезації
- - трафік з заданими значеннями DSCP

Рисунок 4.20. Максимальна послідовність втрачених датаграм.



- - трафік без пріоритезації
- - трафік з заданими значеннями DSCP

Рис. 4.21. Дослідження втрат пакетів.

Результати дослідження підтверджують необхідність застосування механізмів забезпечення належної якості надання послуг, за умови постійного зростання обсягів мультимедійної інформації в сучасних мережах, впровадження нових послуг та підтримки вже існуючих, особливо для таких сервісів, як передача голосу та інтерактивне відео. З наведених залежностей, можна зробити висновок про ефективність використання механізму диференціювання трафіку для забезпечення належної якості передачі відеотрафіку та забезпечення прийняттого сприйняття зображення кінцевим користувачем.

4.4.3. Аналіз особливостей трафіку в мережі доставки контенту CDN

Проведено дослідження трафіку, який був представлений у вигляді одноадресних та багатоадресних потоків, що пересилалися через мережу доставки контенту CDN. Простежувався весь трафік, який проходив між серверами протягом двох днів. Пізніше було проведено аналіз характеристик досліджуваного трафіку та отримана інформація, яка включала протоколи, що використовуються, розмір пакету і бітрейт [151]. Було виявлено, що понад 90% пакетів IPTV CDN – це пакети UDP. Ці багатоадресні потоки використовуються для передачі трансляції відео / аудіо в реальному часі. Решта медіа-потоків для додатків відео за запитом і сигнальних повідомлень здійснюється за одноадресною UDP і TCP трансляцією.

Трафік, в мережі CDN, містить різні потоки, які ідентифікуються номерами портів [152]. Основні типи потоків, що проходять в мережі CDN (рис.4.22):

- Багатоадресні потоки (Multicast) – це потік від сервера трансляції для абонентських приставок і інших серверів, трансляція прямого ефіру.
- Одноадресні потоки (Unicast) – це медіа потоки, що проходять між серверами трансляції.
- Потоки RTSP – це потоки, за допомогою яких здійснюється взаємодія між STB та медіа серверами.
- Потоки HTTP – здійснюють управління програмами.

Таблиця 4.2 показує загальне число байтів, швидкість передачі пакетів, середній розмір пакету кожного типу. Попередній аналіз показує, що передаються в основному пакети розміром близько 1300 байт/пакет. Для порівняння пакети було поділено на три категорії:

- більше 1024 байт;
- між 512 та 1023 байт;
- менше, ніж 511 байт.

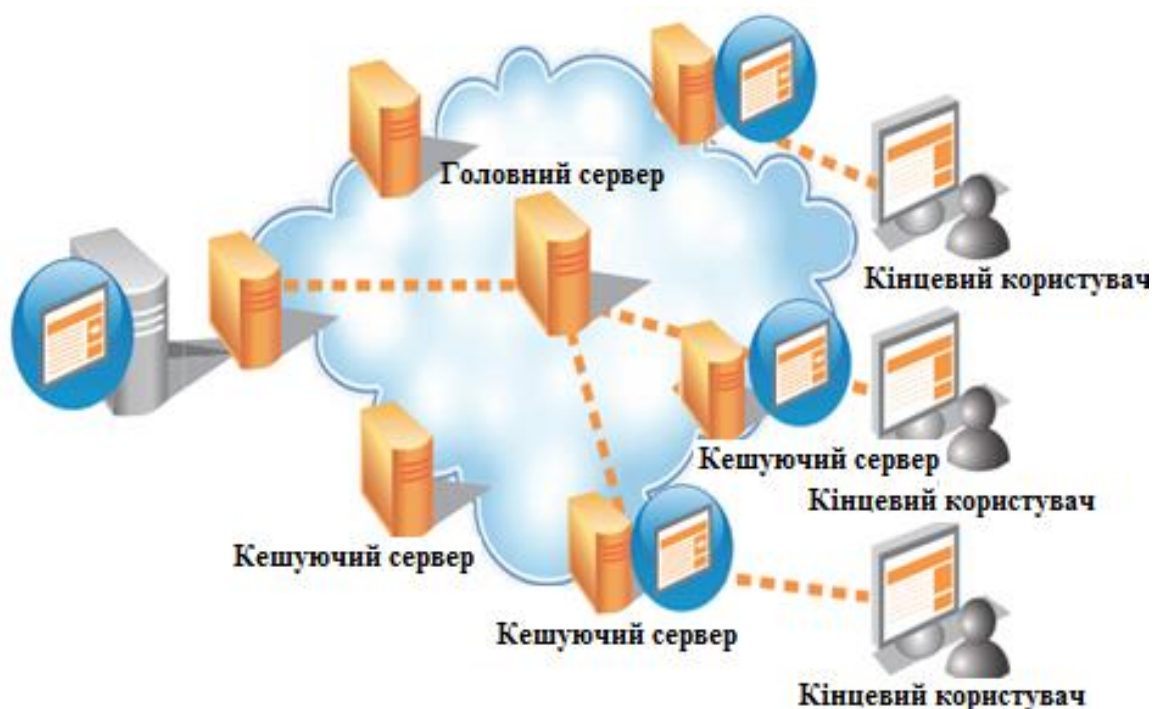


Рис.4.22. Сценарій проходження трафіку згідно моделі CDN.

Таблиця 4.2.Обсяг трафіку, що проходить в мережі CDN

Назва потоку	Обсяг переданих даних (GB)	Швидкість передачі, пакетів/с	Середній розмір пакету, В, байт
Multicast_stream	47,340	300	1299.73
Unicast_stream	27,675	150	1304.15
RTSP_stream	6,140	32	1286
http_stream	7,167	62	668.37

Пакети першої категорії займають 90%, пакети другої категорії – 6%, а пакети, розмір яких менший 511 байт, займають лише 4% від загального трафіку, що передається в мережі.

Подальше дослідження показує, що пакети першої категорії (90%) є UDP та TCP пакети, які використовуються для транспортування відео та аудіо контенту. Решта 6% і 4% від загального числа пакетів – TCP пакети, що використовуються для передачі EPG, сигналізації, контролю, управління, автентифікації.

4.4.4. Експериментальне дослідження методів балансування навантаження в CDN мережах для забезпечення заданої якості сервісу

Проведено експериментальні дослідження доставки відеоконтенту в CDN мережі. Основна увага була акцентована на основний (Origin) сервер трансляції відеоконтенту та один із кешуючих (Edge) серверів. Інтенсивність надходження трафіку на основний сервер та від нього представлено на рис. 4.23.

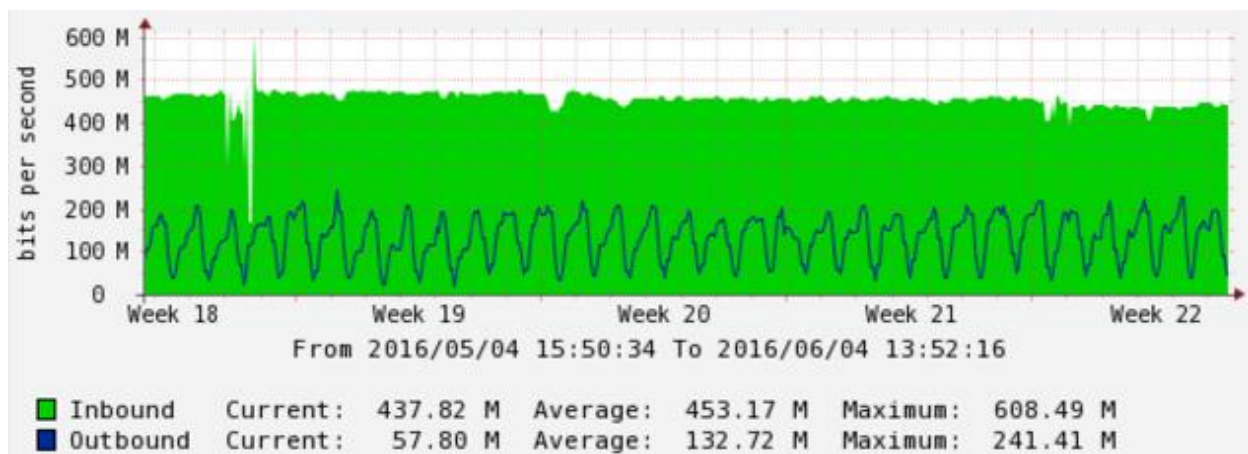


Рис. 4.23. Інтенсивність трафіку на основному сервері CDN мережі.

Як бачимо із рис. 4.23, на основний сервер надходить потік даних досить високої інтенсивності (Inbound), який являє собою відеоконтент для кінцевих користувачів. Вихідний потік із основного сервера, це дані, які передаються кінцевим користувачам через кешуючі сервери (Outbund). Як бачимо із графіку, середня інтенсивність вхідного потоку становить 453Мбіт/с, середня інтенсивність вихідного – 132Мбіт/с.

На рис.4.24 представлено трафік, який опрацьовує кешуючий сервер.

З даного рисунка бачимо, що на кешуючий сервер потрапляє динамічний трафік із основного сервера, а також статичний контент є закешованим і потрапляє до користувачів сервісу прямо з керуючого сервера. Вхідний трафік на кешуючому сервері є частиною вихідного трафіку із основного сервера (див. рис. 4.23, Outbound traffic), який віддає контент також й іншим кешуючим серверам. Вихідний трафік переважає вхідний і, в середньому, його інтенсивність становить 156-200 Мбіт/с. Весь цей трафік генерують запити на контент від кінцевих користувачів сервісу, який надається даною CDN мережею.

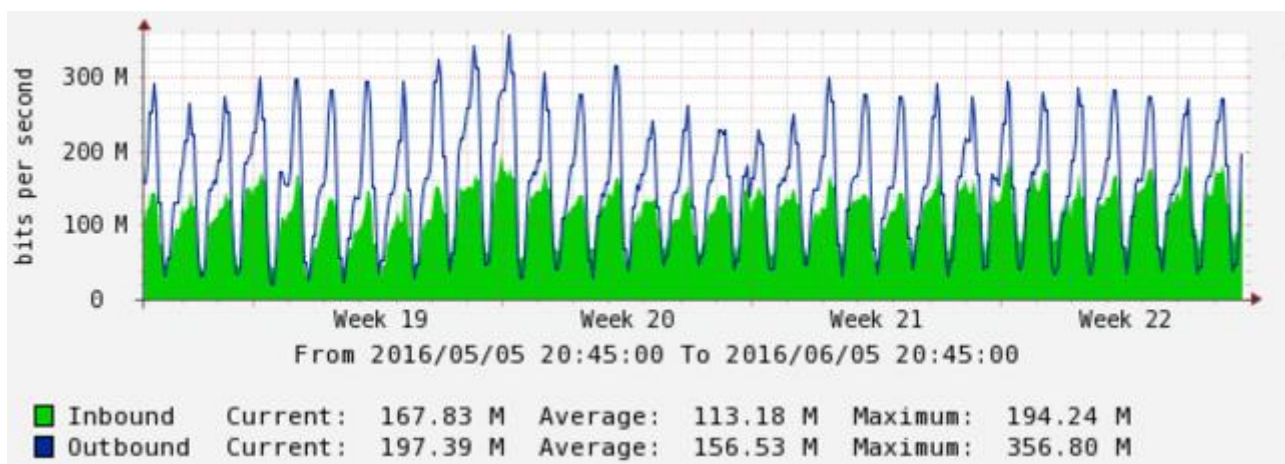


Рис. 4.26. Інтенсивність трафіку на кешуючому сервері CDN мережі.

Проаналізувавши результати експериментальних досліджень, можна сказати, що використання кешуючих серверів дає можливість суттєво зменшити завантаженість основного сервера, знизити затримку, яку отримує кінцевий користувач при отриманні контенту, а також знизити ймовірність втрати даних на шляху передавання. Всі ці переваги відповідають критеріям цільової функції (4.1) і забезпечують покращення якості сервісу у мережах передавання даних.

4.5. Висновки до 4-го розділу.

1. Розглянуто концепцію та архітектуру мережі доставки контенту CDN та основні принципи балансування навантаження між серверами. Запропоновано механізми управління контентом для вибору оптимального маршруту і сервера обробки запитів користувачів, на основі цільової функції. Основними

критеріями цільової функції були взяті час затримки, навантаження на сервер і ймовірність втрати пакетів. Побудовано залежності часу затримки та джитера від інтенсивності надходження даних на кешуючі сервери при різних значеннях інтенсивності обслуговування.

2. В процесі зростання навантаження на керуючі сервери, виникає потреба у підвищенні продуктивності, або ж збільшенні їх кількості. Як альтернативу, запропоновано метод балансування навантаження між серверами роздачі контенту, що дає змогу раціонально розподілити навантаження між серверами мережі і покращити якість обслуговування, за рахунок зменшення затримки та джитера, що є особливо критичними для послуг реального часу. Використання балансування навантаження є одним з основних елементів в CDN, що дозволяє перенаправляти запити користувачів до найближчих для них кешуючих серверів з мінімальним навантаженням в мережі, забезпечуючи таким чином, ефективний розподіл та використання ресурсів CDN.

3. Обґрунтовано доцільність використання експертної оцінки сприйняття якості послуг споживачами (QoE), що використовується для опису сприйняття користувачем якості мультимедійних послуг. На відміну від параметрів QoS, параметри QoE складніші та потребують тривалого періоду вимірювання, при цьому варто зазначити, що вони не призначені для моніторингу.

4. Досліджено вплив параметрів кодера на якість вихідного сигналу та залежність кількості помилкових пакетів від величини вихідного бітрейту. Базуючись на існуючих підходах оцінки якості цифрового телебачення, в даній роботі було вибрано метод, який дав змогу оцінити вплив параметрів кодера на якість відеосигналу та завантаженість сервера, на якому проводилося кодування. Слід зазначити, що запропонований метод не враховує проблем, які можуть виникати в середовищі передачі. Проведене дослідження дає змогу ефективно підбирати параметри для здійснення ефективного кодування, які позначаються на якості цифрового телебачення, та зможуть забезпечити надійний та якісний сервіс для кінцевих користувачів.

5. Проведено експериментальні відтворення найбільш поширених проблем якості сприйняття послуг QoE (затримка, джитер, втрата пакетів, невірна послідовність пакетів) та дослідження величини втрат відеотрафіку без пріоритезації і ефективність застосування механізму диференціювання відеотрафіку, які підтверджують зв'язок параметрів якості обслуговування з об'єктивними та суб'єктивними оцінками якості послуг користувачами.

6. Проведено експериментальні дослідження ефективності застосування механізму диференціювання відеотрафіку. Отримані залежності підтверджують ефективність використання механізму диференціювання трафіку для забезпечення належної якості передачі відеотрафіку та забезпечення належного сприйняття зображення кінцевим користувачем. Проведено експериментальне дослідження методів балансування навантаження в CDN мережах, яке підтвердило ефективність використання запропонованого методу балансування навантаження, для забезпечення заданої якості сервісу в інфокомунікаційних мультисервісних мережах.

РОЗДІЛ 5

Дослідження процесів обслуговування та управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах

5.1. Розробка моделі та алгоритму обслуговування черг при передачі контенту в безпроводних мережах

Зростання швидкостей передачі даних та розширення спектру послуг, які можуть надаватись у безпроводних мережах різко підвищили попит та вимоги до послуг реального часу, таких, як: VoIP, відеоконференцзв'язок та інтерактивне телебачення IPTV. Питання, що стосуються якості обслуговування QoS та управління мережевими ресурсами безпроводних мереж, стають все більш актуальними. У провідних мережах є достатньо велика кількість алгоритмів обслуговування черг, які можуть забезпечити справедливе обслуговування і допустиме значення затримки при передачі пакетів [153 - 157]. Відповідний рівень якості обслуговування QoS забезпечується поєднанням механізмів резервування ресурсів та справедливого їх розподілу при передачі пакетів. Проте, ці механізми не можуть безпосередньо бути застосовані для безпроводних мереж.

5.1.1. Алгоритми обслуговування черг в провідних мережах

Концепція справедливого обслуговування черг спочатку була розроблена для обслуговуючих пристроїв (маршрутизаторів), які зазвичай підтримують одну загальну чергу для вхідного порту, і застосовують алгоритм FIFO для обслуговування черг (рис. 5.1a). Основним недоліком дисципліни обслуговування черг FIFO є несправедливе обслуговування. Потік високої інтенсивності може генерувати велику кількість пакетів і відповідно займатиме всю чергу, таким чином блокуватиме можливість передачі інших потоків. Іншими словами, більшість послуг будуть недоступні за рахунок зростання інтенсивності одного з потоків. Щоб подолати цю проблему, більшість алгоритмів зваженого обслуговування намагаються підтримувати окрему чергу

для кожного потоку (рис. 5.1б), при цьому кожен вхідний пакет поміщується у відповідну чергу.

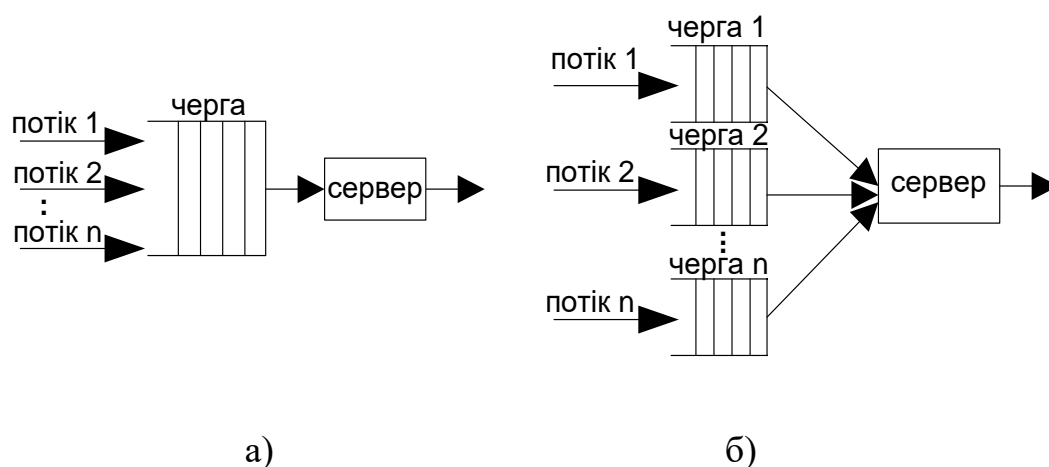


Рис. 5.1. Моделі обслуговування черг. (а) модель FIFO. (б) модель справедливого обслуговування.

Система обслуговує ці черги в циклічному порядку, взявши чітко визначену кількість пакетів із кожної непорожньої черги. Порожні черги пропускаються. В загальному це справедливо, оскільки кожен зайнятий потік може відправити тільки наперед визначену кількість пакетів в кожному циклі. Одним із найбільш поширених, є алгоритм зваженого справедливого обслуговування WFQ [158]. Зважене справедливе обслуговування (Weighted Fair Queuing, WFQ) – це комбінований механізм обслуговування черг, що поєднує пріоритетне обслуговування зі зваженим. Цей алгоритм своїми властивостями наслідує алгоритм GPS (Generalized Processor Sharing), який насправді не може застосовуватись в реальних умовах на рівні пакетів [159].

Найбільш поширена схема передбачає існування однієї особливої черги, яка обслуговується за пріоритетною схемою – завжди в першу чергу і до тих пір, поки всі заявки з неї не будуть виконані. Ця черга призначена для системних повідомлень, повідомлень управління мережею і, можливо, пакетів найбільш критичних і вимогливих додатків. У всякому разі, передбачається, що її трафік має невисоку інтенсивність. Решта черг пристрій переглядає послідовно, відповідно до алгоритму зваженого обслуговування.

На сьогоднішній день існує велика кількість механізмів обробки черг. Найбільш поширеними серед них є:

- алгоритм FIFO;
- пріоритетне обслуговування (Priority Queuing, PQ);
- справедливе обслуговування (Fair Queuing, FQ);
- обслуговування на основі класу (Class Based Queuing, CBQ);
- зважене справедливе обслуговування (Weighted Fair Queuing, WFQ);
- зважене справедливе обслуговування на основі класу обслуговування (Class Based WFQ, CBWFQ);
- обслуговування з малою затримкою (Low Latency Queuing, LLQ).

Ознаками, за якими той або інший вид трафіку може бути віднесений до певного класу і йому призначатиметься відповідний пріоритет обслуговування, можуть бути:

- IP-адреса призначення або джерела;
- значення поля IPP/ToS/DSCP в заголовку IP;
- значення полів Port в заголовках протоколів UDP або TCP;
- значення поля Ether Type в заголовку Ethernet.

5.1.1.1. Черги з абсолютним пріоритетом

Алгоритм обслуговування черг з абсолютним пріоритетом PQ передбачає наявність черг з високим, середнім, нормальним та низьким пріоритетом. Обробка черг ведеться послідовно, тобто починається з високо пріоритетної, далі, після її повного очищення, відбувається перехід до черг з нижчим пріоритетом. Що стосується некласифікованого трафіку, то він, за замовчуванням, потрапляє в чергу із нормальним пріоритетом. Для правильної організації обробки всіх пакетів, потрібно правильно вибрати довжини черг з різними пріоритетами. Такий алгоритм обслуговування забезпечує високу якість обслуговування пакетів, які знаходяться в черзі із високим пріоритетом. Значення затримок для високопріоритетного трафіку буде мінімальним. Зрозумілим є те, що для інших класів пріоритетів, якість обслуговування буде

нижчою. Пріоритетне обслуговування, зазвичай, застосовується, коли в мережі присутній один клас трафіку, чуттєвий до затримок, але із невеликою інтенсивністю, так, що його обслуговування не надто знижує якість передавання пакетів інших класів.

Отже, головною перевагою пріоритетного обслуговування є відносна простота в реалізації і висока якість обслуговування трафіку з найвищим пріоритетом. Недолік цієї дисципліни полягає в тому, що, якщо в пакетах, які надходять, присутній інтенсивний трафік реального часу (наприклад, відео чи аудіо), то можлива монополізація каналу високопріоритетними чергами та існує висока ймовірність того, що решта складових трафіку буде блокована.

5.1.1.2. Зважені черги, що налаштовуються

Механізм зважених черг, що налаштовуються CQ (Custom Queuing) дає можливість мережевому адміністраторові налаштувати розподіл ресурсів, без блокування низькопріоритетних потоків. Почергово обробляється кожна непорожня черга. При кожному зверненні передається певна кількість пакетів, яка окремо налаштовується. Підтримується до 6 черг, але існує також додаткова нульова черга, яка призначена виключно для пакетів управління з'єднанням. Принцип роботи системи пріоритезації трафіку та формування черг обслуговування представлено на рис. 5.2.

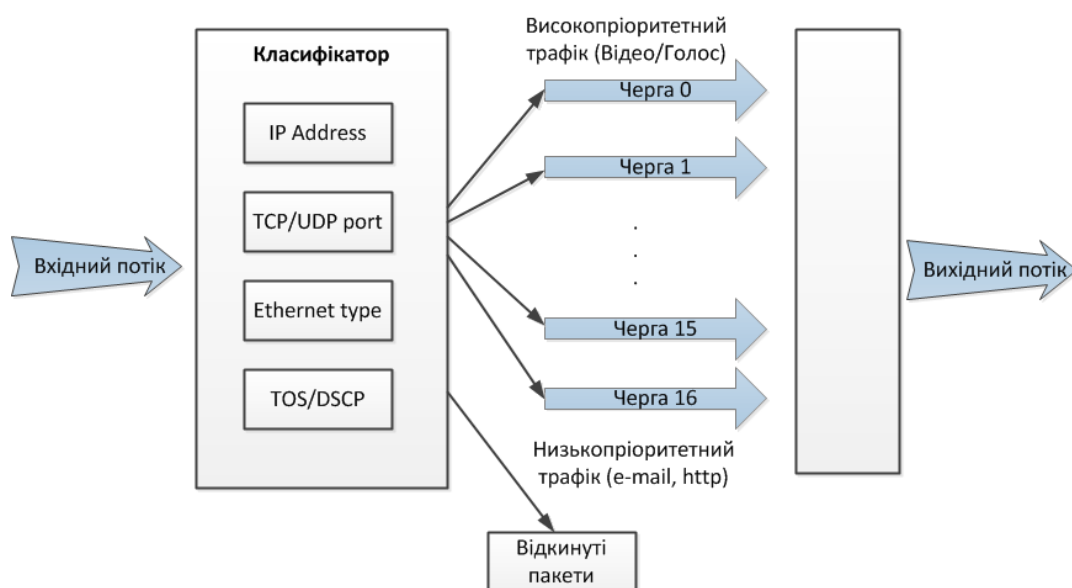


Рис.5.2. Пріоритезація трафіку та формування черг.

Даний механізм передбачає наявність лічильника байтів, який визначає, яка кількість пакетів має бути передана із цієї черги перш, ніж перейти до наступної. Пакети з черги передаються доти, поки значення лічильника байт не перевищить допустимого, або черга не виявиться порожньою. Після цього, система переходить до наступної непорожньої черги. Відзначимо, що, якщо значення лічильника байт було перевищено, пакет, який передається в поточний момент часу, буде передаватися повністю. Основною задачею реалізації такого способу обробки черг є визначення конкретного значення лічильника байт для кожної черги.

Формулювання завдання пріоритезації зводиться до забезпечення цільової функції, яка задовольнятиме певним початковим умовам. Цільова функція буде представлена так:

$$F = \min(t_i, \Delta t_i, p_i), \quad (5.1)$$

де t_i – затримка пакетів i -го класу трафіку в мультисервісній мережі передачі даних (при передачі від вузла-відправника до вузла-одержувача);

Δt_i – джитер пакетів i -го класу трафіку в мультисервісній мережі;

p_i – ймовірність втрат пакетів i -го класу трафіку у мультисервісній мережі передачі даних.

Значення часу затримки пакетів, джитера та ймовірності втрат повинні відповідати певним вимогам, а саме:

$$t_i < T_i, \Delta t_i < \Delta T_i, p_i < P_i, \quad (5.2)$$

де T_i – гранично допустиме значення затримки для i -го класу трафіку в мультисервісній мережі;

ΔT_i – гранично допустиме значення джитера для i -го класу трафіку в мультисервісній мережі;

P_i – гранично допустиме значення ймовірності втрат пакетів для i -го класу трафіку в мультисервісній мережі;

Розв'язок завдання пріоритезації дасть змогу гарантовано забезпечити задовільні параметри якості обслуговування кожному класові трафіку, що передається в мультисервісній телекомунікаційній мережі. Для правильного

планування та розподілу буферного простору, необхідно зважати на розмір буфера для конкретного класу трафіку, та розміщення цього буфера в загальній черзі на обслуговування, та в буфері на нижчих рівнях мережевої моделі [160]. Слід також пам'ятати і про неперіоритетний трафік. Довжина черги для неперіоритетного трафіку буде визначатись різницею загального розміру буфера та сумою розмірів для кожної пріоритетної черги [161]. Це стосується черг рівня TCP/IP мережевої моделі, де й відбувається пріоритезація трафіку.

5.1.2. Модель процесу обслуговування в безпроводних мережах

Проблема розподілу ресурсів в безпроводних мережах є складнішою, оскільки канал постійно перебуває під впливом додаткових факторів, які механізми планування обслуговування в безпроводному середовищі повинні приймати до уваги [162, 163]. До цих факторів можна віднести:

- поява помилок в залежності від місця розташування;
- висока ймовірність появи помилок при передачі;
- інтерференція між сусідніми радіоканалами.

Розглядаючи питання справедливого обслуговування в безпроводному середовищі, матимемо справу із базовою станцією, яка відповідає за розподіл вихідного і вхідного трафіку між мобільною і, власне, базовою станцією. У безпроводному середовищі станції можуть сприймати різні перешкоди та спотворення сигналу, тому помилки напряду залежатимуть від відстані між базовою станцією та мобільною. В безпроводних каналах можуть також виникати помилки, пов'язані із пульсуючим характером передачі даних.

Основні категорії алгоритмів планування обслуговування в безпроводних мережах [164] використовують два типи систем – ідеальна та реальна. В ідеальній системі помилки відсутні і працює алгоритм справедливого планування FQ для провідної мережі. В реальній системі помилки впливають на якісну передачу інформації та працює алгоритм справедливого планування для безпроводних мереж. Таким чином, можна спостерігати різницю між ресурсами, які користувач повинен отримати, якщо б у каналі ніколи не

зустрічались помилки і ресурсами, які він фактично отримує, коли на стан каналу, іноді. впливають помилки, інтенсивність яких залежить від розташування відносно базової станції.

В результаті такого факту, всіх користувачів можна поділити на три категорії, в залежності від ресурсів які для них виділяються:

- користувачі із перевагами – коли користувач отримує більше ресурсів, ніж отримав би в ідеальній системі;
- задоволені користувачі – отримані ресурси є однакові для обох систем;
- незадоволені користувачі – якщо він отримує менше ресурсів, ніж отримав би в ідеальній системі.

Моделлю безпровідного каналу, що зазвичай використовується при дослідженні алгоритмів планування, є Марківська модель [165], яка пропонує два стани каналів: стан без помилок (добрий) і стан з помилками (поганий) (Рис.5.3.).

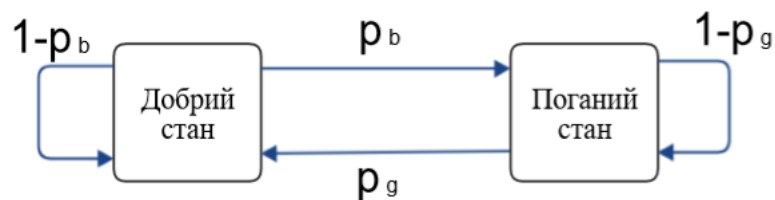


Рис. 5.3. Дискретні стани марківської моделі каналу.

Ймовірність переходу P_g – це ймовірність того, що наступний часовий інтервал задовільний, враховуючи, що поточний інтервал є незадовільним, а P_b – ймовірність того, що наступний часовий інтервал є незадовільним, враховуючи, що поточний інтервал задовільний. Отже, стаціонарна ймовірність перебування в задовільному (хорошому) P_G та незадовільному (поганому) P_B станах обчислюється за формулою:

$$P_G = \frac{p_g}{p_g + p_b}, P_B = \frac{p_b}{p_g + p_b}. \quad (5.3)$$

Варто зауважити, що, якщо станція знаходиться в незадовільному стані, існує висока ймовірність того, що пакети, які передаються до неї, будуть пошкоджені[166]. Коли стан каналу є в хороших умовах для передачі пакетів,

вони успішно відправляються/приймаються. Така інформація, як: кількість користувачів, їхній пріоритет, стани каналів, кількість пакетів в черзі, повинна бути відома для того, щоб організувати відмінний рівень обслуговування. Є кілька основних елементів [167], які потрібно включати (враховувати) для ефективного розподілу ресурсів в безпроводному середовищі:

- модель безпомилкового обслуговування;
- модель компенсації;
- модель випередження/запізнення;
- окремі слоти і черги пакетів;
- засоби для моніторингу і прогнозування стану каналу.

5.1.3. Засоби для моніторингу і прогнозування стану каналу.

Справедливий розподіл ресурсів в безпроводних мережах можливий лише тоді, якщо відомо стан каналу для потоків, які мають пакети для відправки. Помилки каналу, що залежать від розташування, вимагають постійного контролю стану каналу за кожним потоком, який передає дані і прогнозування майбутнього стану каналу. Як правило, якщо слот i є добрий, то вважається, що наступний слот $i+1$ не буде зазнавати впливу помилок і навпаки.

У безпроводній мережі можлива також ситуація, за якої, для деяких користувачів, стан каналу є відмінним, в той час, як для інших – незадовільним, а через деякий час, набір користувачів, для яких канал є доступний, може змінитись. Таким чином, може виникнути необхідність у забезпеченні додаткової пропускної здатності каналу для користувачів, які зіткнулися з помилками при передачі, як тільки стан каналу для них став задовільним.

Рис. 5.4 ілюструє випадок, коли для чотирьох користувачів, підключених до мережі, один зустрічає помилковий канал, в результаті чого перестає отримувати ресурси.

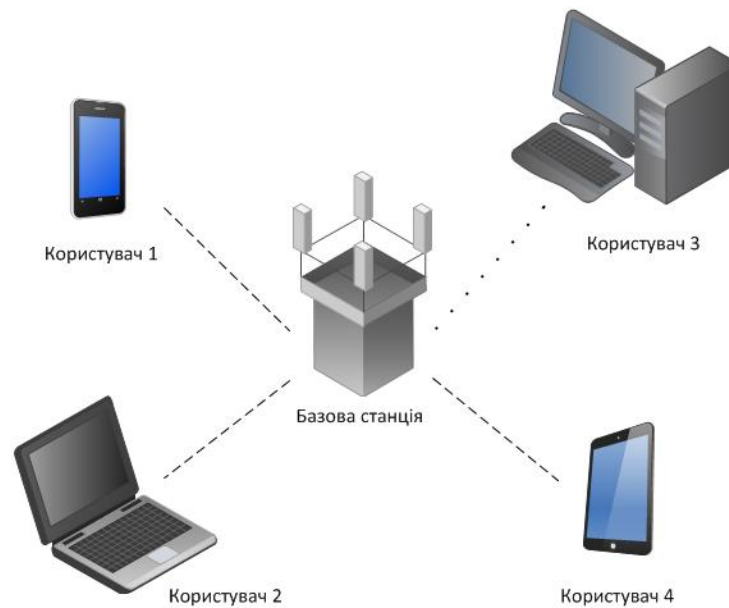


Рис.5.4. Приклад зв'язку із базовою станцією: 3-ій користувач втрачає зв'язок за рахунок помилок в каналі.

5.1.4. Алгоритми справедливого обслуговування в безпроводних мережах

Хоча такі алгоритми обслуговування черг, як: CQ, PQ та WFQ можуть забезпечити як гарантоване, так і справедливе обслуговування послуг в провідних мережах, вони можуть зазнати невдачі в безпроводному середовищі. Однією з головних причин є те, що в безпроводних мережах стан каналу залежить від розташування. В безпроводних мережах, для деяких станцій стан каналу може бути незадовільним, в той час, як для інших – відмінним. Саме тому, в системах із розподіленим навантаженням, пристрій, який розподілятиме потоки, направить сервіс із потоку з помилками в безпомилковий потік.

Існує кілька класів алгоритмів справедливого обслуговування черг в безпроводних мережах. Перший клас алгоритмів й досі зберігає концепцію провідних FQ алгоритмів, але належно підмінює канал доступу між перевантаженими потоками. Другий клас передбачає механізм компенсації тих потоків, які отримують менше послуг через помилки каналу. Третій клас алгоритмів динамічно регулює потік, що пристосовується до каналу або стану черги. Останній клас алгоритмів враховує інші специфічні параметри, такі, як типи потоків трафіку.

Алгоритм ідеалізованого зваженого справедливого обслуговування IWFQ

Алгоритм ідеалізованого зваженого справедливого обслуговування IWFQ можна віднести до першого класу алгоритмів справедливого обслуговування [168]. Алгоритм вважається ідеалізованим в тому сенсі, що робить два ключові ідеалістичні припущення:

- кожен потік має повну інформацію про стан каналу;
- використовується ідеальний протокол управління доступом до середовища (medium access control, MAC).

Ідеалізований алгоритм справедливого обслуговування в безпроводних мережах, в якості моделі, використовує алгоритм WFQ і кожен пакет із порядковим номером n потоку i , що прибув в момент часу $A(t_{i,n})$, асоціюється двома мітками (мітка початку $S_{i,n}$ та завершення $f_{i,n}$), точно так, як це робить WFQ. Значення мітки буде визначатись:

$$S_{i,n} = \max \{v(A(t_{i,n})), f_{i,n-1}\}; f_{i,n} = s_{i,n} + \frac{L_{i,n}}{r_i}, \quad (5.4)$$

де $L_{i,n}$ – розмір n -го пакету в i -му потоці.

Віртуальний час $A(t_{i,n})$ визначатиметься, як:

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{C}{\sum_{i \in B(t)} r_i}, \quad (5.5)$$

де C – пропускна здатність каналу, $B(t)$ – перевантажені потоки в момент часу t .

Надсилатись буде пакет, значення мітки якого є нижчим [169]. Коли всі потоки мають безпомилкові стани каналу, два алгоритми працюють однаково. Якщо пакет, вибраний із черги, не може бути переданий у зв'язку з помилками в каналі, IWFQ вибирає пакет з наступним найменшим значенням мітки для завершення обслуговування. Цей процес буде продовжуватися до тих пір, поки пристрій планування знайде пакет, який може бути переданий. Після того, як він був відправлений, мітки пакетів перераховуються. Для цього, для кожного потоку створюються мітки обслуговування, що будуть мітками завершення першого пакету в черзі. Якщо потік немає даних для передачі в черзі, його

мітка обслуговування встановлюється рівною ∞ . Після того, як мітки обслуговування були перераховані для всіх потоків, алгоритм вибирає той потік, для якого мітка обслуговування має найменше значення, а канал не містить помилок, і перший пакет з черги надсилає в мережу. Слід зауважити, що відстаючому потоку не дозволено відновлювати більше b_i біт інформації, що визначається за формулою:

$$b_i = B \cdot \left(\frac{r_i}{\sum_{k \in F} r_k} \right), \quad (5.6)$$

де r_i – ваговий коефіцієнт потоку, F – число всіх потоків, B – константа, яка обмежує загальну мітку (кількість втрачених послуг) для всіх потоків.

Це обмеження для відстаючих потоків в IWFQ використовується із метою запобігання впливу потоків, які накопичують велику кількість пакетів із малими значеннями мітки завершення, за рахунок невідправлених, у зв'язку з помилками, пакетів на інші потоки. Варто зазначити, що накопичені відстаючі потоки отримують пріоритет при розподілі каналу в момент, коли їхні канали стають безпомилковими. Для збереження пріоритету доступу до каналу для відстаючих потоків із різними вимогами до затримки та втрати пакетів, виникає необхідність відокремити мітки обслуговування (службові мітки) від черги в якій знаходяться пакети. Для того, щоб досягти такої розв'язки, для кожного потоку повинно бути організовано дві черги: черга слотів і черга пакетів.

Константа B визначатиметься кількістю пакетів в буфері при максимальній інтенсивності сумарного потоку і визначатиметься за формулою Норроса [170]:

$$B = \left(\frac{\left(N^H \cdot (1-N)^{1-H} \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln P(n>N)} \right)^{\frac{1}{H}} \cdot \alpha^{\frac{1}{2 \cdot H}} \cdot m^{\frac{1}{2 \cdot H}}}{C-m} \right)^{\frac{H}{1-H}}, \quad (5.7)$$

де H – параметр Херста профілю трафіку; $P(n>N) = 10^{-6}$ – ймовірність втрати пакету, яку необхідно забезпечити; $C=100$ Мбіт/с – пропускна здатність прямого каналу (біт/с); $m=20$ Мбіт/с – швидкість надходження пакетів (біт/с); $\alpha= 3,5$ Мбіт/с – коефіцієнт варіації швидкості надходження пакетів (біт/с).

Оскільки в дослідженні враховувалось 6 типів потоків, то введемо матрицю вагових коефіцієнтів, в якій будуть задані вагові коефіцієнти для кожного потоку:

$$r = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6\}. \quad (5.8)$$

Згідно формули (5.7) було розраховано параметр b_i для кожного із потоків. Із представлених вище даних, можна розрахувати час затримки обслуговування для алгоритму IWFQ та порівняти результат із затримкою, яка виникає при використанні алгоритму WFQ в провідних мережах.

Будь який слот S каналу завершить обслуговування за час $t_e + d_g$, де t_e – час завершення слоту S в алгоритмі WFQ, а d_g – враховує затримку на передачу втрачених послуг за час, коли потік перебував у відстаючому стані $d_g = b_i / C$.

В програмному середовищі Matlab було розроблено імітаційну модель обслуговування черг мультисервісної мережі з використанням пріоритезації даних. Результати моделювання представлені у вигляді діаграми на рис. 5.5.

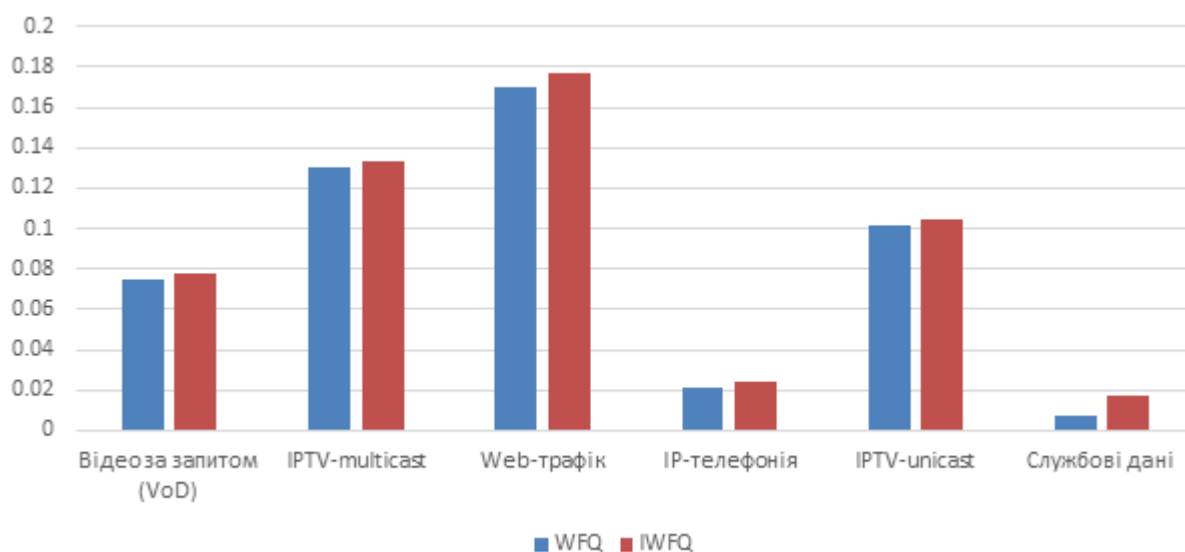


Рис.5.5. Порівняння часу затримки для алгоритмів обслуговування черг в провідних та безпроводних мережах.

5.2. Реалізація та дослідження алгоритму оцінки обслуговування черг у мультисервісній мережі на основі інтегрального критерію

Алгоритм роботи моделі представлено на рис.5.6.

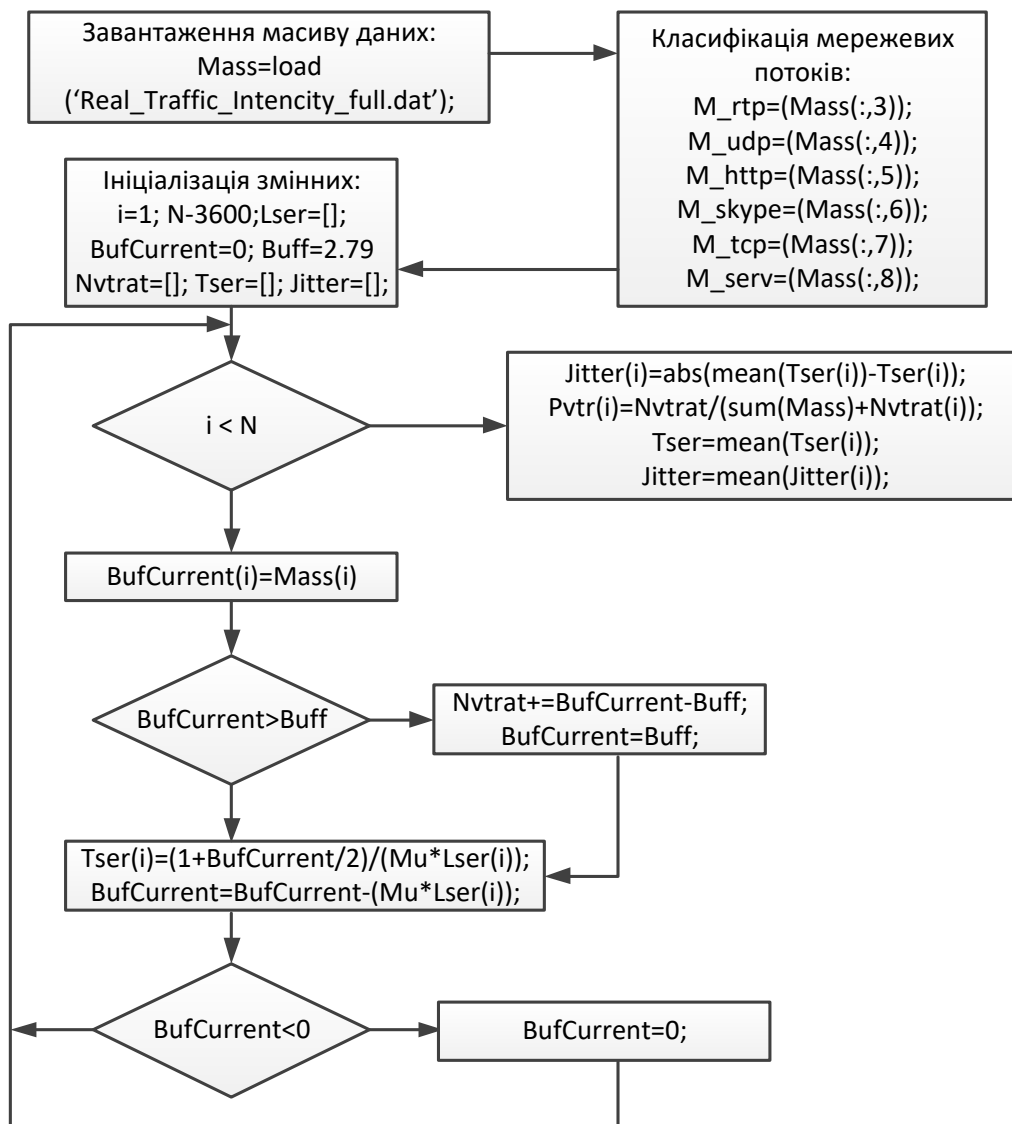


Рис. 5.6. Алгоритм процесу обслуговування черг з пріоритезацією даних [171].

Принцип роботи алгоритму складається з таких етапів:

- завантаження масиву даних інтенсивності надходження пакетів кожного мережевого потоку;
- розбиття всього часу спостереження (в даному випадку однієї години) на проміжки часу, тривалістю 1 секунда;
- аналіз пакетів, що потрапили у відповідний часовий проміжок і класифікація відповідності пакетів до певного мережевого потоку;
- визначення можливості бути обслуженим, занесеним в буфер чи бути відкинутим для кожного пакету в даному часовому проміжку;
- обслуговування пакетів з відповідністю до вибраного алгоритму;

- обрахунок параметрів якості, як для кожного потоку окремо, так і для загального потоку.

Для визначення найкращого механізму обслуговування пріоритезованого мультимедійного трафіку вибрано шість алгоритмів обслуговування:

- 1) алгоритм обслуговування черг FIFO;
- 2) механізм пріоритетного обслуговування черг PQ;
- 3) механізм замовленого обслуговування черг CQ;
- 4) алгоритм рівномірного обслуговування черг FQ;
- 5) алгоритм зваженого справедливого обслуговування WFQ;
- 6) алгоритм ідеалізованого зваженого справедливого обслуговування IWFQ.

Критерієм оцінки кожного з цих алгоритмів є можливість найкращого обслуговування кожного сервісу, тобто, забезпечення найкращих параметрів QoS. Визначення цих параметрів відбувалося таким способом:

Ймовірність втрати пакету – визначається, як кількість втрачених пакетів до загальної кількості пакетів:

$$P_{\text{втрат}} = \frac{1}{N} \sum_k n_k, \quad (5.9)$$

де N – загальна кількість пакетів; n_k – кількість втрачених пакетів за k -й період.

Затримка – являє собою тривалість обслуговування пакета і визначається, як сума часу опрацювання пакета і очікування ним обслуговування в буфері:

$$\Delta T_{\text{обс}} = \Delta T_{\text{буфер}} + 2 \cdot \frac{\Delta R_{\text{пак}}}{V_{\text{шини}}} + T_{\text{обробки}}, \quad (5.10)$$

де $V_{\text{шини}}$ – швидкість внутрішньої шини обслуговуючого пристрою (прийнято, що швидкості вхідної і вихідної шин рівні); $\Delta T_{\text{буфер}}$ – тривалість очікування пакетом у буфері; $\Delta R_{\text{пак}}$ – довжина пакету; $T_{\text{обробки}}$ – тривалість опрацювання пакету у процесорі обслуговуючого пристрою; $\Delta T_{\text{обс}}$ – тривалість обслуговування пакету.

Середнє значення джитера визначається, як різниця між середнім значенням затримки та конкретною затримкою:

$$dt = \frac{1}{N} \sum_i |T_{\text{сер}} - T_i|, \quad (5.11)$$

де T_i – затримка i -го пакету; $T_{\text{сер}}$ – середнє значення затримки.

5.2.1. Результати моделювання для алгоритму FIFO

При використанні найпростішої схеми обслуговування – алгоритму FIFO, пріоритет пакету немає ніякого значення, адже обслуговування відбувається на другому рівні OSI. Тому для мультисервісних мереж неприйнятно використовувати даний алгоритм. В даному випадку він використовується для порівняння адекватності застосування складніших алгоритмів.

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що втрати пакетів є досить великими і для потоку службових даних, телефонії, відеозв'язку, є недопустимими. Щодо середнього значення затримки та джитера, то ці параметри забезпечуються на достатньому рівні у відповідності із нормами, зазначеними в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Параметри QoS при використанні алгоритму FIFO

Тип трафіку	К-сть втрачених пакетів	Ймов. втрати пакету, %	Сер. значення затримки, мс	Джитер, мс
Відеоконференція	5472	0,0264	0,567	0,07
IPTV-multicast	9401	0,0263	0,567	0,07
Web-трафік	12107	0,0263	0,567	0,07
IP-телефонія	1567	0,0262	0,567	0,07
Відео за запитом	7417	0,0263	0,567	0,07
Службові дані	558	0,0265	0,567	0,07
Загальний потік	36524	0,0264	0,56702	0,07

5.2.2. Результати моделювання для алгоритму PQ

При використанні алгоритму пріоритетного обслуговування черг PQ, обслуговувалися чотири черги з трафіком з різними пріоритетами. Відповідно до черги з найвищим пріоритетом призначались пакети службових даних, до черги з високим пріоритетом – відеоконференція і телефонія, з середнім – IPTV, з низьким – Web-трафік.

Аналізуючи отримані результати (табл. 5.2), можна зробити висновок, що без втрат та із незначними затримкою і джитером були обслужені найпріоритетніші потоки (службові дані, IP-телефонія, відео за запитом), із низькими втратами – відеоконференція, що дозволяє стверджувати про забезпечення якості для цих потоків. Проте, при цьому відбулося блокування низькопріоритетних потоків (IPTV і Web-трафік), втрати для яких сягали близько третини від усіх пакетів, що є недопустим для будь-якого типу потоку. Тобто, ресурс обслуговуючого пристрою був спрямований, більшою частиною, на обробку високопріоритетних потоків та не виділявся для низькопріоритетних.

Таблиця 5.2. Параметри QoS при використанні алгоритму PQ

Тип трафіку	К-сть втрачених пакетів	Ймов. втрати пакету, %	Сер. значення затримки, мс	Джитер, мс
Відеоконференція	2963	0,014489	0,162	0,0105
IPTV-multicast	122721	0,261248	0,343	0,0210
Web-трафік	236128	0,34577	0,523	0,0258
IP-телефонія	0	0	0,255	0,0075
Відео за запитом	0	0	0,433	0,0144
Службові дані	0	0	0,084	0,0009
Загальний потік	361812	0,211644	0,386	0,0120

5.2.3. Результати моделювання для алгоритму CQ

Отримані результати, для алгоритму замовленого обслуговування черг (табл.5.3), за всіма параметрами задовольняють граничні умови для кожного потоку, окрім випадку для кількості втрачених пакетів IP-телефонії, що перевищують граничне значення для даного сервісу. Висока якість обслуговування, за допомогою цього алгоритму, визначається змінним розподілом буферної пам'яті відповідно до інтенсивності певного потоку та зваженим круговим обслуговуванням. Та все ж, не враховується середня довжина пакету, що відображається у відсутності втрат потоків з малими

розмірами пакетів (службові дані, відео за запитом) та значно більших втратах потоків з великими розмірами пакетів.

Таблиця 5.3. Параметри QoS при використанні алгоритму CQ

Тип трафіку	К-сть втрачених пакетів	Ймов. втрати пакету, %	Сер. значення затримки, мс	Джитер, мс
Відеоконференція	947	0,004677	0,162	0,010
IP-TV-multicast	6990	0,019745	0,341	0,019
Web-трафік	5443	0,012036	0,520	0,025
IP-телефонія	263	0,004499	0,255	0,007
Відео за запитом	0	0	0,431	0,014
Службові дані	0	0	0,084	0,001
Загальний потік	13643	0,010022	0,384	0,011

5.2.3.1. Результати моделювання для алгоритму FQ

Алгоритм рівномірного обслуговування черг, за результатами моделювання (табл.5.4), виявився з надзвичайно низькими втратами для всіх потоків, що свідчить про високу сумісність даного механізму із мультимедійним трафіком. Але значення затримки та джитера дещо збільшились, у порівнянні з попередніми методами, хоча і не перевищують допустимих значень.

Таблиця 5.4. Параметри QoS при використанні алгоритму FQ

Тип трафіку	К-сть втрачених пакетів	Ймов. втрати пакету, %	Сер. значення затримки, мс	Джитер, мс
Відеоконференція	0	0	0,259	0,035
IP-TV-multicast	0	0	0,391	0,054
Web-трафік	34	0,00007609	0,452	0,060
IP-телефонія	0	0	0,111	0,039
Відео за запитом	0	0	0,515	0,080
Службові дані	0	0	0,060	0,054
Загальний потік	34	0,000025	0,399	0,048

5.2.4. Результати моделювання для алгоритму WFQ

Для алгоритму зваженого справедливого обслуговування, отримані результати (табл.5.5) для всіх параметрів задовольняють поставлені потреби кожного сервісу. Втрати, затримка і джитер не перевищують граничних значень. Можна з впевненістю сказати, що даний алгоритм дозволяє якісно обслуговувати мультимедійний трафік.

Таблиця 5.5. Параметри QoS при використанні алгоритму WFQ

Тип трафіку	К-сть втрачених пакетів	Ймов. втрати пакету, %	Сер. значення затримки, мс	Джитер, мс
Відеоконференція	739	0,003653	0,075	0,0105
IP TV-multicast	1334	0,003829	0,131	0,0225
Web-трафік	3161	0,007025	0,170	0,0265
IP-телефонія	24	0,000412	0,022	0,0075
Відео за запитом	0	0	0,101	0,0146
Службові дані	0	0	0,008	0,0009
Загальний потік	5258	0,003886	0,123	0,0124

5.2.5. Результати моделювання для алгоритму IWFQ

Для алгоритму ідеалізованого зваженого справедливого обслуговування, результати (табл.5.6) близькі до WFQ, оскільки в якості моделі використовується саме цей алгоритм. Також задовольняються потреби кожного типу сервісу. Однак, варто зазначити, що використання даного алгоритму рекомендоване для безпроводних мереж, та враховуються певні спрощення, які були описані вище. Загалом, можна стверджувати, що даний алгоритм дозволяє якісно обслуговувати мультимедійний трафік реального часу.

Таблиця 5.6. Параметри QoS при використанні алгоритму IWFQ

Тип трафіку	К-сть втрачених пакетів	Ймов. втрати пакету, %	Сер. значення затримки, мс	Джитер, мс
Відеоконференція	817	0,004241	0	0
IP TV-multicast	1418	0,004646	0,1601185	0,027776

Web-трафік	3216	0,008152	0,1835908	0,02792
IP-телефонія	43	0,0004618	0,0227258	0,008079
Відео за запитом	0	0	0,106037	0,015292
Службові дані	0	0	0,0080789	0,000917
Загальний потік	5494	0,0045097	0,135	0,014

5.2.6. Аналіз та оцінка результатів моделювання

Для детальнішого аналізу параметрів якості обслуговування, представлено результати роботи різних типів алгоритмів для декількох сервісів мультисервісної мережі передачі даних. Результати роботи імітаційної моделі представлені на рис. 5.7 – 5.9.

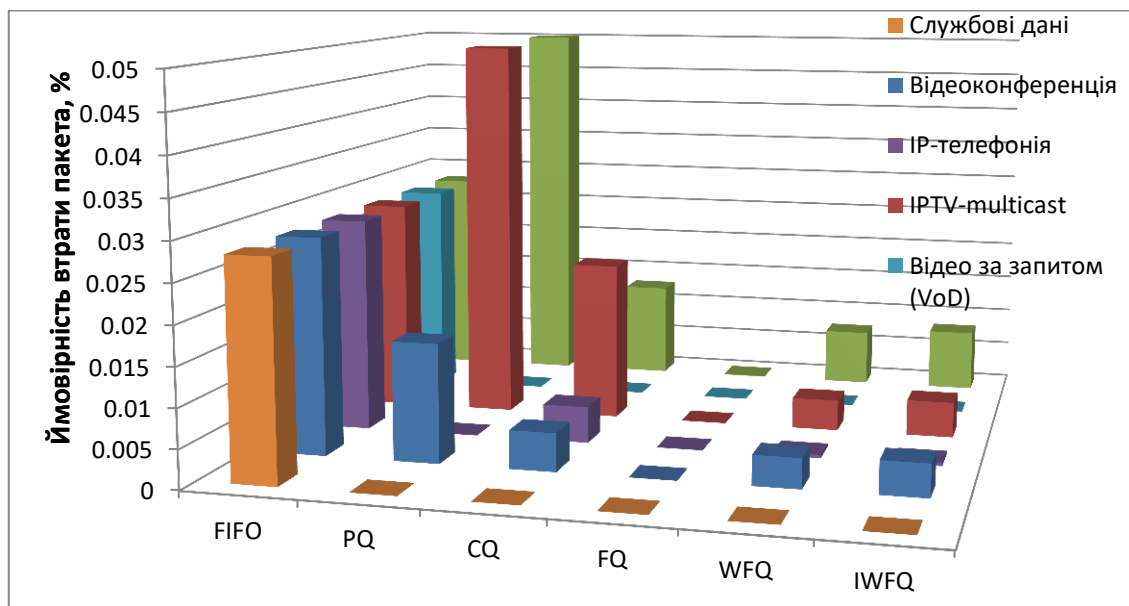


Рис. 5.7. Ймовірність втрати пакетів для мультисервісного потоку при використанні різних алгоритмів обслуговування.

Провівши аналіз отриманих результатів, можна сказати, що алгоритм FIFO допускає досить великі втрати пакетів для всіх типів потоків, що є недопустимим для службових даних. Що стосується алгоритму PQ, можна зауважити, що ресурс обслуговуючого пристрою був спрямований, більшою частиною, на обробку високопріоритетних потоків.

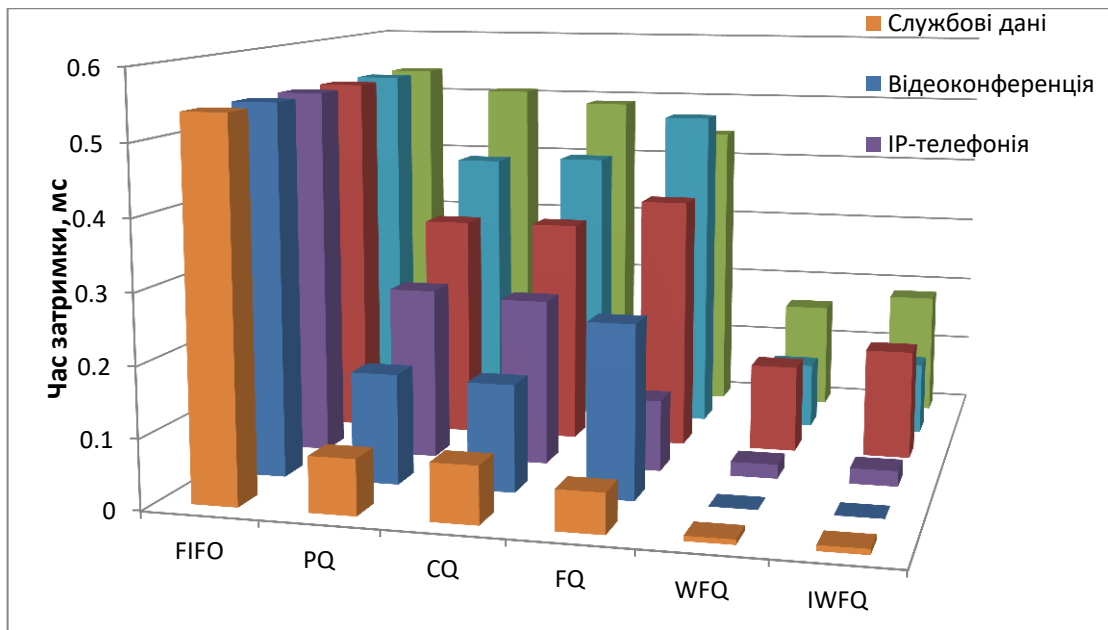


Рис. 5.8. Час затримки для мультисервісного потоку при використанні різних алгоритмів обслуговування.

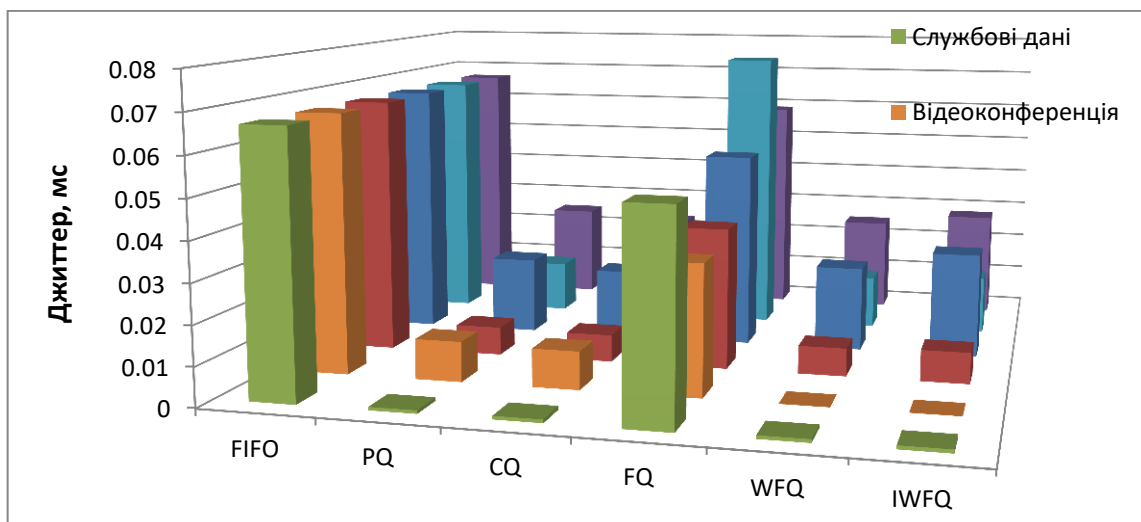


Рис. 5.9. Джиттер для мультисервісного потоку при використанні різних алгоритмів обслуговування.

Отримані результати моделювання для алгоритму CQ за всіма параметрами задовольняють граничні умови для кожного потоку, окрім випадку для кількості втрачених пакетів IP-телефонії.

Алгоритм FQ виявився з надзвичайно низькими втратами для всіх потоків, що свідчить про високу сумісність даного механізму із мультимедійним

трафіком. Але значення затримки та джитера дещо збільшились, у порівнянні з попередніми методами, хоча і не перевищують допустимих значень.

Результати моделювання алгоритму WFQ, за всіма параметрами задовольняють потреби кожного сервісу. Втрати, затримка і джитер не перевищують граничних значень також і для алгоритму IWFQ. Дані порівняння параметрів QoS загального потоку, для кожного алгоритму обслуговування черг, наведені в табл. 5.7. та відображені на рис.5.10 – 5.12.

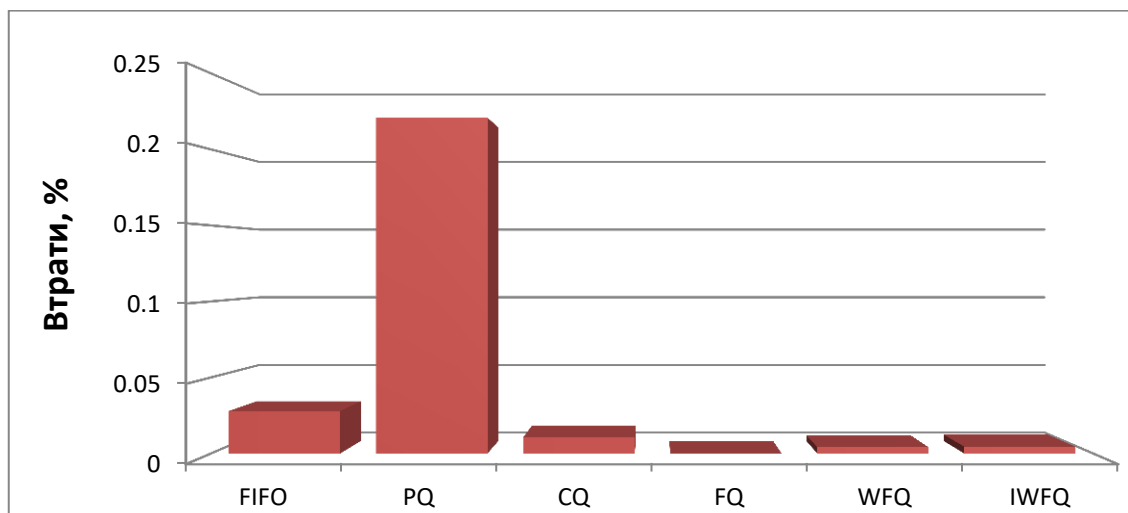


Рис.5.10. Ймовірність втрат пакетів сумарного потоку при використанні різних алгоритмів обслуговування.

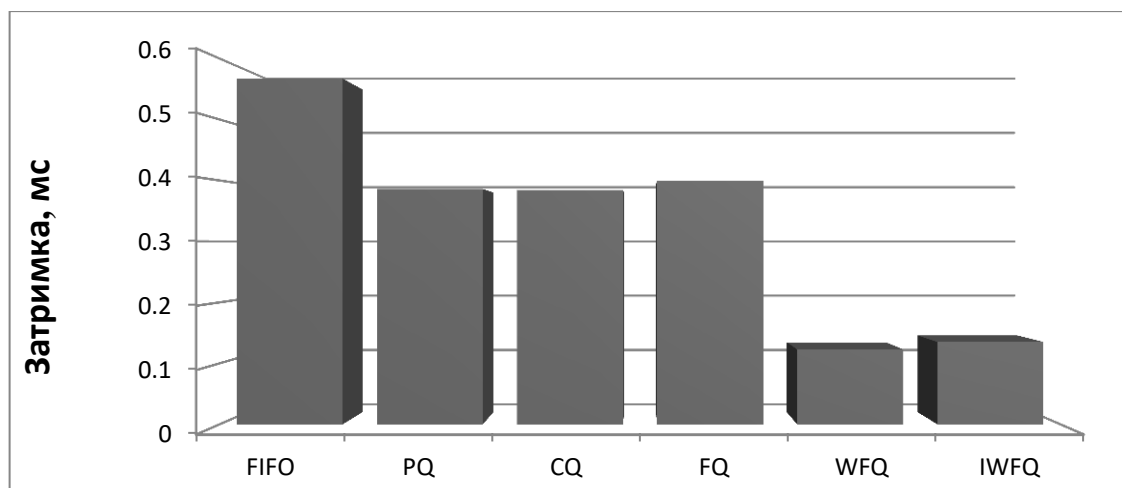


Рис.5.11. Середній час затримки пакетів сумарного потоку при використанні різних алгоритмів обслуговування.

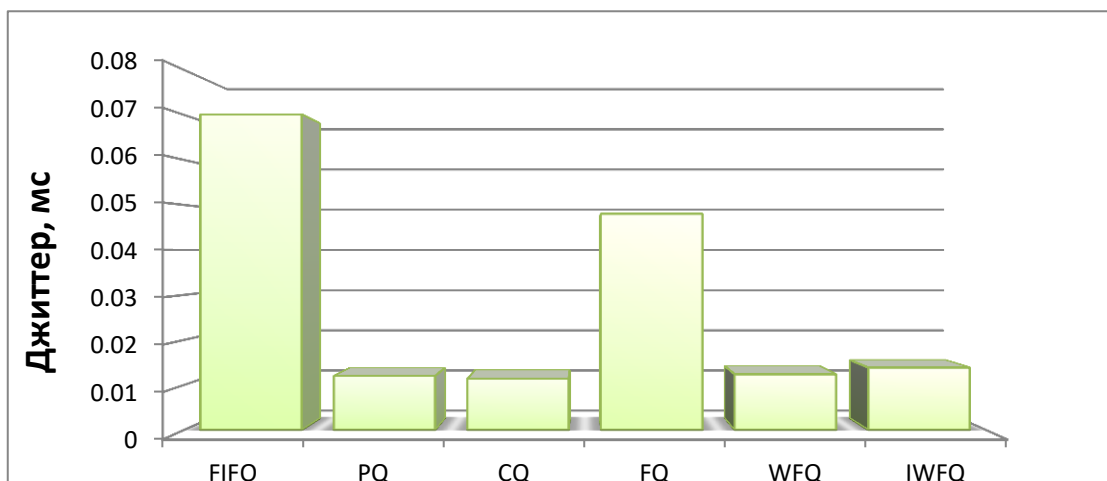


Рис. 5.12. Середнє значення джитера пакетів сумарного потоку при використанні різних алгоритмів обслуговування.

Здійснимо порівняння кожного алгоритму обслуговування черг із найпростішим методом обслуговування FIFO. Для цього визначимо параметр для оцінювання ефекту від покращення якості обслуговування, який показує у скільки разів покращився якісний показник обслуговування із застосуванням вибраного алгоритму, за формулою:

$$K_x = \frac{1}{m} \sum_i \frac{A_{0i}}{A_{xi}} \cdot k_i, \quad (5.12)$$

де K_x – оцінка покращення параметра якості для x -го алгоритму; A_{0i} – початкове значення i -го параметра якості; A_{xi} – текуче значення i -го параметра якості для x -го алгоритму; k_i – коефіцієнт значущості i -го параметра якості; m – кількість параметрів, що порівнюються. Результати розрахунків наведено в табл. 5.8.

Таблиця 5.8.

Значення покращення параметрів якості для кожного алгоритму.

	KPQ	KCQ	KFQ	KWFQ	KIWFQ
Втрати, рази	0,12	2,63	1045,91	6,79	6,43
Час затримки, рази	1,46	1,47	1,42	4,62	4,17
Джиттер, рази	5,85	6,15	1,46	5,68	5,26
Загалом, рази	0,33	2,45	2,16	5,56	5,31

Отже, використання таких алгоритмів обслуговування черг, як замовленого обслуговування CQ чи рівномірного обслуговування FQ покращить більш, ніж вдвічі якість обслуговування, а алгоритм WFQ – більше п'яти разів. Оцінка розміру буферного простору для забезпечення задовільної якості обслуговування проведено за формулою Норроса.

5.3. Експериментальне визначення розміру буфера та дослідження впливу розміру буферів на параметри передачі трафіку

Для дослідження процедури вибору розміру буфера активного мережевого обладнання, розглянемо спрощений варіант, в якому не враховується використання буферизації на трьох рівнях моделі OSI. Тут вважається, що кожен пристрій, який бере участь в передачі даних через мережу зв'язку, використовує один загальний буфер. Приклад такої спрощеної схеми представлений на рис.5.7.

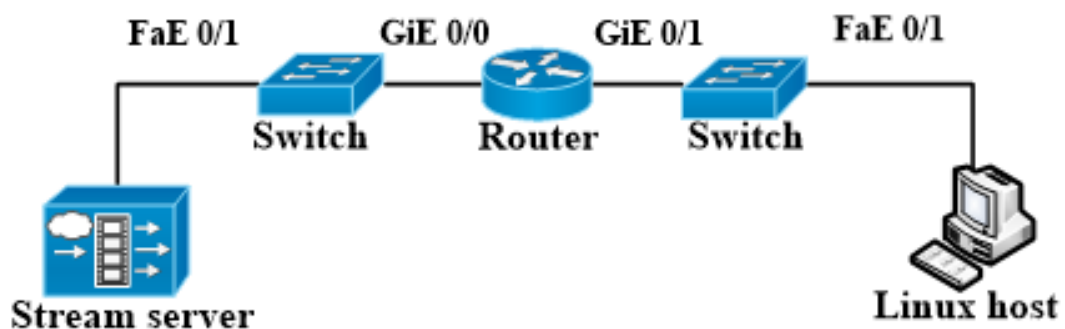


Рис. 5.7. Схема експерименту для визначення розміру буфера в залежності від пропускної здатності.

Для забезпечення якісної та надійної передачі даних в режимі реального часу між двома вузлами (Linux host - Stream server) потрібно, щоб затримки на всіх ділянках мережі передачі суттєво не відрізнялись. Оскільки, при передачі через мережу, дані спочатку записуються в буфер, а тоді вже передаються, важливим є вибір правильних розмірів цих буферів. Як видно з рис. 5.7, пропускна здатність на всіх ділянках є різною, тому, відповідно, розміри буферів також мають відрізнятись, оскільки занадто великий буфер, при низькій пропускній здатності, буде вносити значні затримки при передачі.

Будемо вважати, що розмір буфера слід вибрати таким, щоб кожен пристрій зміг надійно та якісно передавати пакети при виникненні різниці в затримках (мається на увазі джитер) тривалістю 200 мс. Розмір кадрів Ethernet будемо брати 1500 байт. Час передачі пакету визначатиметься за формулою: $t=R/C$, де R – розмір пакету, C – пропускна здатність.

Оскільки пропускна здатність на всіх ділянках мережі буде відрізнятись, час передачі також буде різним. Розрахуємо цей час для кожної ділянки:

$$t_1 = R/C_1 = \frac{1500 \cdot 8}{1024 \cdot 1024 \cdot 100} = 0,00011 \text{ (с)};$$

$$t_2 = R/C_2 = \frac{1500 \cdot 8}{1024 * 1024 * 1024} = 0,000011 \text{ (с)};$$

$$t_3 = R/C_3 = \frac{1500 \cdot 8}{1024 * 1024 * 1024} = 0,000011 \text{ (с)}.$$

Для розрахунку часу передачі на останній ділянці, будемо вважати, що пропускна здатність тут становить 10Мбіт/с:

$$t_4 = R/C_4 = \frac{1500 \cdot 8}{1024 \cdot 1024 \cdot 10} = 0,0011 \text{ (с)}.$$

Тепер, визначимо, яка кількість пакетів зможе бути передана на кожній ділянці за цей час:

$$n_1 = T/t_1 = \frac{0,2}{0,00011} = 1818 \text{ (пакетів)};$$

$$n_2 = T/t_2 = \frac{0,2}{0,000011} = 18182 \text{ (пакетів)};$$

$$n_3 = T/t_3 = \frac{0,2}{0,000011} = 18182 \text{ (пакетів)};$$

$$n_4 = T/t_4 = \frac{0,2}{0,0011} = 182 \text{ (пакетів)}.$$

Отримавши кількість пакетів, які потрібно буферизувати, можна визначити розмір буферної пам'яті:

$$l_1 = 1500 \cdot n_1 = 1500 \cdot 1818 = 2727000 \text{ (байт)};$$

$$l_2 = 1500 \cdot n_2 = 1500 \cdot 18182 = 27273000 \text{ (байт)};$$

$$l_3 = 1500 \cdot n_3 = 1500 \cdot 18182 = 27273000 \text{ (байт)};$$

$$l_4 = 1500 \cdot n_4 = 1500 \cdot 182 = 273000 \text{ (байт)}.$$

Із отриманих результатів очевидно, що чим менша пропускна здатність мережі зв'язку, тим менший розмір буфера потрібно використовувати. Однак, оскільки в реальних мережевих пристроях буфери використовують на трьох рівнях мережевої моделі, проведемо більш детальні дослідження щодо визначення розміру буфера на кожному рівні, та його вплив на час затримки і ефективність використання пропускної здатності мережі.

Для дослідження впливу розміру буферів всіх рівнів на швидкість передачі даних, а також на затримки, що виникають при передачі даних, використовувалась схема-макет, яка складалась із хоста, на якому встановлена операційна система Linux, сервера-стрімера та комутатора Cisco 2960, через який обидва вузли з'єднуються. Схема представлена на рис. 5.8.

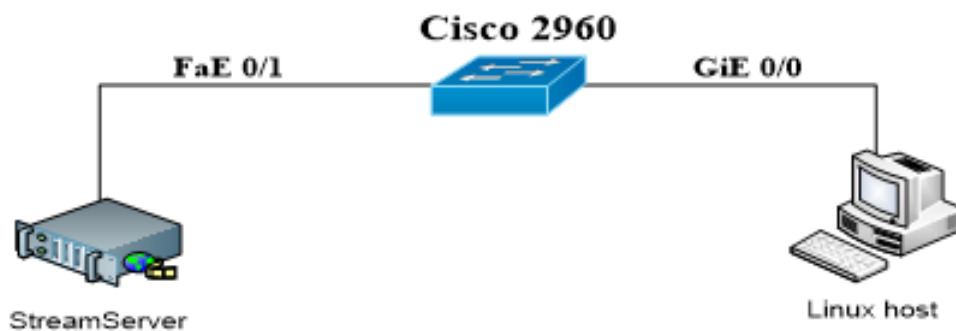


Рис.5.8. Схема проведення досліджень.

Для коректної роботи системи необхідне правильне налаштування всіх трьох рівнів моделі. Налаштування будемо здійснювати, починаючи із вибору параметрів найнижчого рівня, далі рівня черг та рівня протоколів, та спостерігатимемо, як ці зміни впливатимуть на продуктивність роботи мережі. Вкінці, виберемо оптимальні параметри всіх рівнів, для забезпечення максимально можливої продуктивності. В таблиці 5.9 представлено залежності затримки та джитера від довжини черги.

Таблиця 5.9.Залежність затримки та джитера від довжини черги

Довжина черги L, пакетів	1	10	30	50	100	300	500	800	1000	2000	5000	10000	30000
--------------------------	---	----	----	----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	-------	-------

Затримка t, мс	5,5	6,5	8,1	11,2	17,3	40,1	63,5	96,7	113,7	197,3	207,8	212,5	228,2
Джитер Δt , мс	1,7	2,02	3,77	2,69	2,46	10,7	10,1	14,5	46,8	59,3	122,4	121,8	118,3

Дані результати отримані шляхом проведення експериментальних досліджень. Дослідження проводились на обладнанні, яке використовується в сучасних мережах зв'язку. На рис.5.9 та рис.5.10 представлено графічні залежності часу затримки та джитера відповідно, від довжини черги.

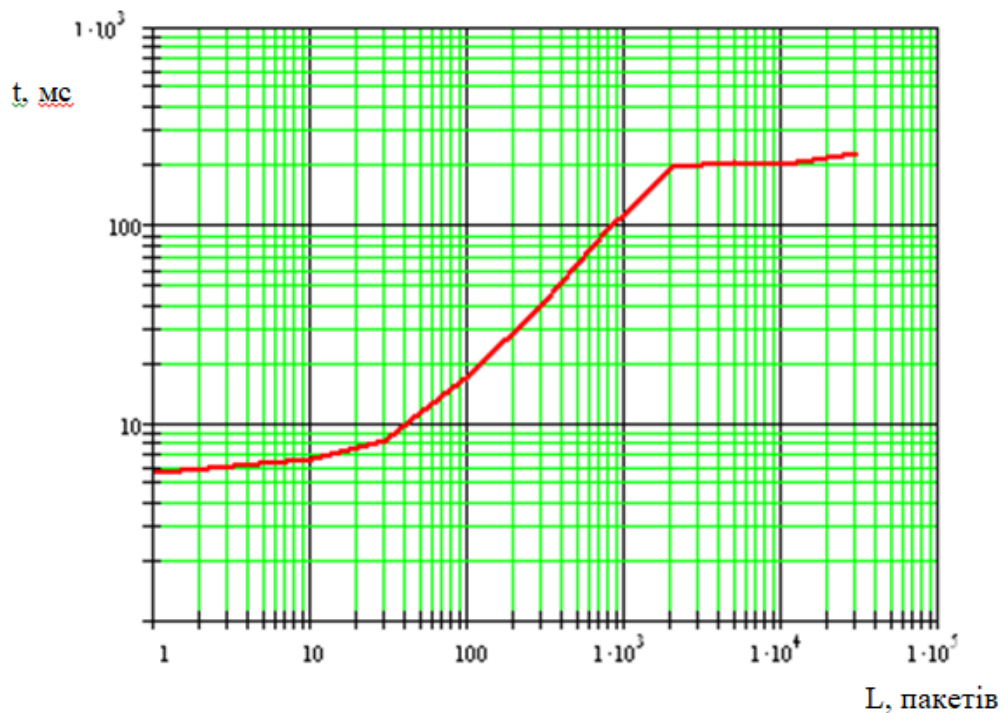


Рис. 5.9. Залежність часу затримки від довжини черги.

З представленого рисунка можна побачити, що із зростанням довжини черги, тобто зі збільшенням розміру буфера, час затримки також зростає. Найбільш чітко це виражено на ділянці від 100 до 1000 пакетів. Далі настає момент, при якому довжина черги вже не так різко впливає на величину затримки. В свою чергу, це означає, що розмір буфера, при даній пропускній здатності каналу передавання, вже буде не доцільно збільшувати. На наступному рисунку зображено залежність варіації затримки (джитера) від довжини черги.

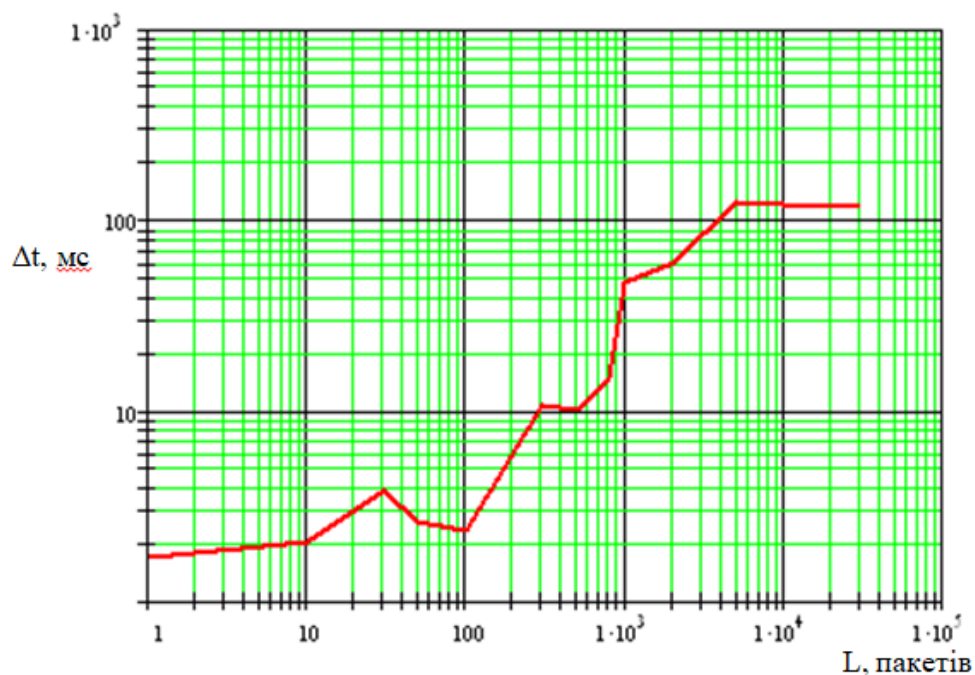


Рис. 5.10. Залежність варіації затримки (джитера) від довжини черги.

Як і на попередньому рисунку, джитер, із збільшенням довжини черги, також зростає. Таке зростання можна пояснити тим, що чим більший розмір буферу, тим більше потрібно прийняти пакетів (або опрацювати та заповнити вихідний буфер), щоб заповнити його, оскільки пакети, перед відправленням, поміщуються в буфер, обробляються і лише тоді пересилаються.

Наступним експериментом, буде визначення залежності ефективності використання пропускну здатності мережі від розміру буфера. В табл.5.10 представлено залежність швидкості передачі від довжини черги.

Таблиця 5.10. Залежність швидкості передачі від довжини черги

Довжина черги L , пакетів	1	10	100	300	500	800	1000	1500	2000	5000
Швидкість передачі C , Мбіт/с	94,2	94,2	94,4	94,6	95	95,4	95,7	95,7	95,7	95,7

На рис. 5.11 графічно представлена отримана залежність. З графіку видно, що при зміні довжини черги, швидкість передачі змінюється не дуже суттєво і, при наближенні до величини черги в 1000 пакетів, швидкість далі не зростає.

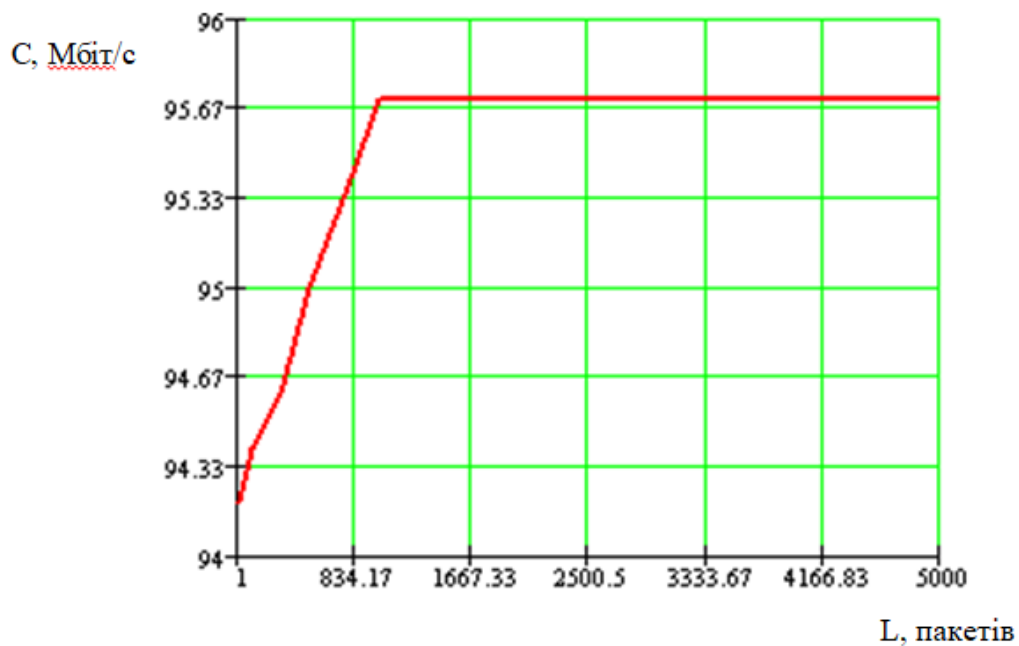


Рис. 5.11. Залежність швидкості передачі від довжини черги.

Це, насамперед, пов'язано з тим, що для подальшого зростання швидкості передавання, потрібно збільшувати розмір буфера на вищому рівні, а саме на рівні протоколів. Наступним кроком буде визначення впливу зміни розміру буфера на рівні протоколів на швидкість передавання. Дані, які отримано в результаті досліджень, показано в таблиці 5.11 та графічно відображені на рис.5.12.

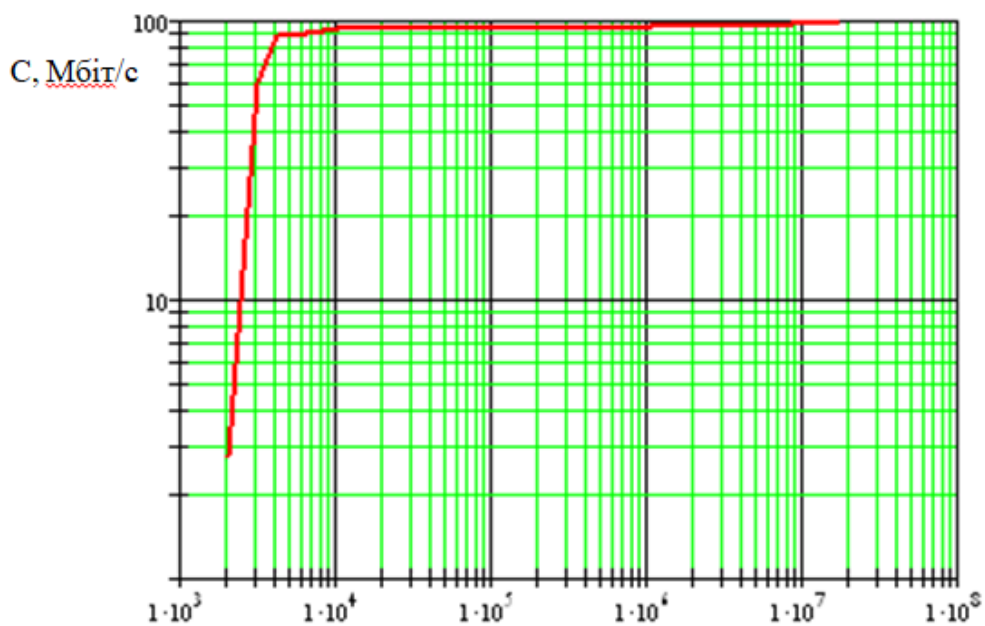


Рис. 5.12. Залежність швидкості передачі від розміру буфера.

Таблиця 5.11. Залежність швидкості передачі від розміру буфера

Довжина черги L, Кбайт	3	5	10	15	30	50	100	200	1000	2000	4000	8000	16000
Швидкість передачі, С Мбіт/с	58,7	88	93,7	93,8	94	94	94,2	94,2	94,5	94,9	95,7	97,3	100

Ефективне використання ресурсів канального рівня, з метою регулювання параметрів якості обслуговування, може здійснюється на основі управління ефективністю протоколу канального рівня, яка безпосередньо залежить від розміру IP пакету [172].

Значенню ефективності протоколу канального рівня ставиться у відповідність певний набір параметрів якості сервісу:

- затримка пакетів;
- джитер.

Алгоритм управління якістю сервісу можна представити у вигляді блок-схеми (рис. 5.13).

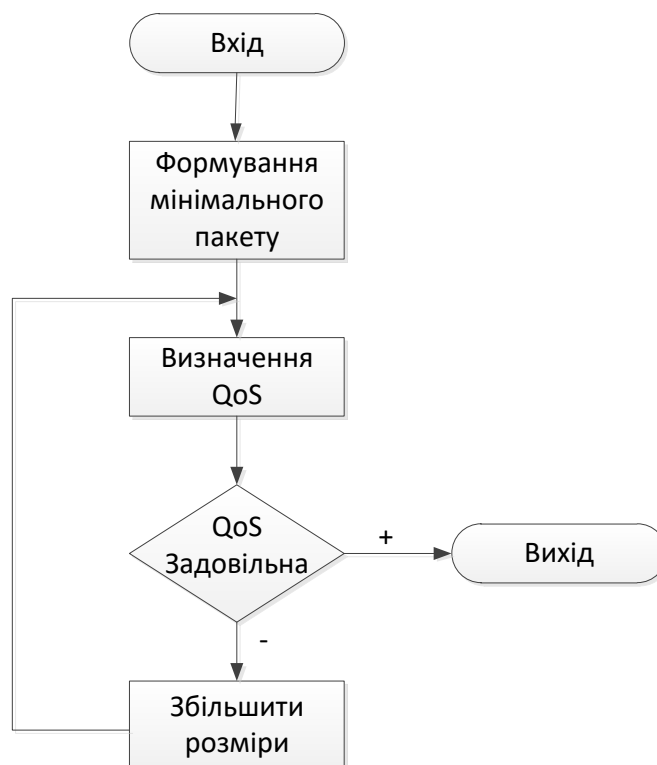


Рис. 5.13. Алгоритм адаптації розміру пакету та ефективності протоколу канального рівня згідно вимог якості сервісу.

По замовчуванню встановлюється мінімальна довжина пакету. Проводиться розрахунок параметрів якості сервісу для встановленої довжини пакету. Якщо якість сервісу є задовільною для надання певної послуги, то довжина пакету не буде змінюватись і передача даних буде проводитись з відповідною якістю. У випадку, коли отримана якість сервісу не буде задовільною для надання послуги, то довжина пакету буде збільшуватись до такого значення, при якому якість сервісу стане задовільною [173].

5.4. Висновки до 5-го розділу.

1. Досліджено механізми формування черг та пріоритетного їх обслуговування в провідних та безпроводних мережах. Визначено цільову функцію забезпечення задовільних параметрів якості обслуговування з урахуванням типів мультисервісного трафіку. Представлено системну модель процесу обслуговування черг в безпроводних мережах, яку доцільно використовувати для ефективного розподілу ресурсів в безпроводному середовищі. Досліджено роботу алгоритмів справедливого обслуговування в безпроводних мережах. Основну увагу акцентовано на алгоритм ідеалізованого зваженого справедливого обслуговування.

2. Розроблено імітаційну модель процесу обслуговування черг в мультисервісній мережі з використанням пріоритезації даних та проведено порівняльний аналіз роботи алгоритмів обслуговування черг в провідних (алгоритм WFQ) та безпроводних (IWFQ) мережах для різних типів потоків. Представлено результати моделювання у вигляді діаграм, які відображають значення часу затримки обслуговування для різних типів потоків, при передаванні даних із використанням відповідних алгоритмів обслуговування.

3. Розроблено алгоритм процесу обслуговування в мультисервісній телекомунікаційній мережі, який враховує роботу кількох механізмів формування черг та механізмів управління перевантаженнями. На основі запропонованого алгоритму розроблено імітаційну модель для визначення найкращого механізму обслуговування пріоритезованого мультимедійного

трафіку. Проведено імітаційне моделювання роботи алгоритму та проаналізовано результати моделювання.

4. Запропоновано інтегральний критерій оцінювання якості роботи механізмів формування черг та механізмів управління перевантаженнями, який враховує значення ймовірності втрат, часу затримки та джитера і відображає покращення відповідних якісних показників обслуговування при використанні того чи іншого алгоритму. Для різних типів потоків визначено параметри якості обслуговування, які можуть забезпечити відповідні алгоритми. Визначено, що алгоритм FIFO не доцільно використовувати для службових даних, алгоритм PQ розроблено для високопріоритетних потоків. Найкращий результат моделювання показав алгоритм IWFQ, який може забезпечити задовільну якість обслуговування за всіма критеріями. Цей підхід може бути використано на етапі проектування, а також оптимізації роботи мережі доставки контенту.

5. Проведено експериментальне визначення розміру буфера та дослідження впливу розміру буферів на параметри передачі трафіку. Досліджено вплив розміру буфера на швидкість передачі даних та затримки. Представлено графічні залежності результатів моделювання. Запропоновано алгоритм регулювання параметрів якості сервісу, на основі забезпечення ефективного використання протоколу канального рівня, шляхом адаптації розміру IP пакету.

РОЗДІЛ 6

Реалізація CDN-мереж на основі глобальної мережевої інфраструктури

6.1. Розроблення методів пріоритетного управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах.

6.1.1. Структурно функціональна схема організації роботи CDN

Для реалізації мережі доставки контенту запропоновано багаторівневу модель побудови мереж доставки контенту на основі глобальної мережевої інфраструктури (рис.6.1).



Рис.6.1. Багаторівнева модель функціонування мережі доставки контенту.

Кожна з наведених площин моделі має чітке призначення та реалізує відповідні функції мережі доставки контенту. Розглянемо принципи функціонування та реалізації кожного з рівнів. Для початку представимо алгоритм розподілу запитів контенту кінцевим користувачем в мережі CDN провайдера (рис.6.2).

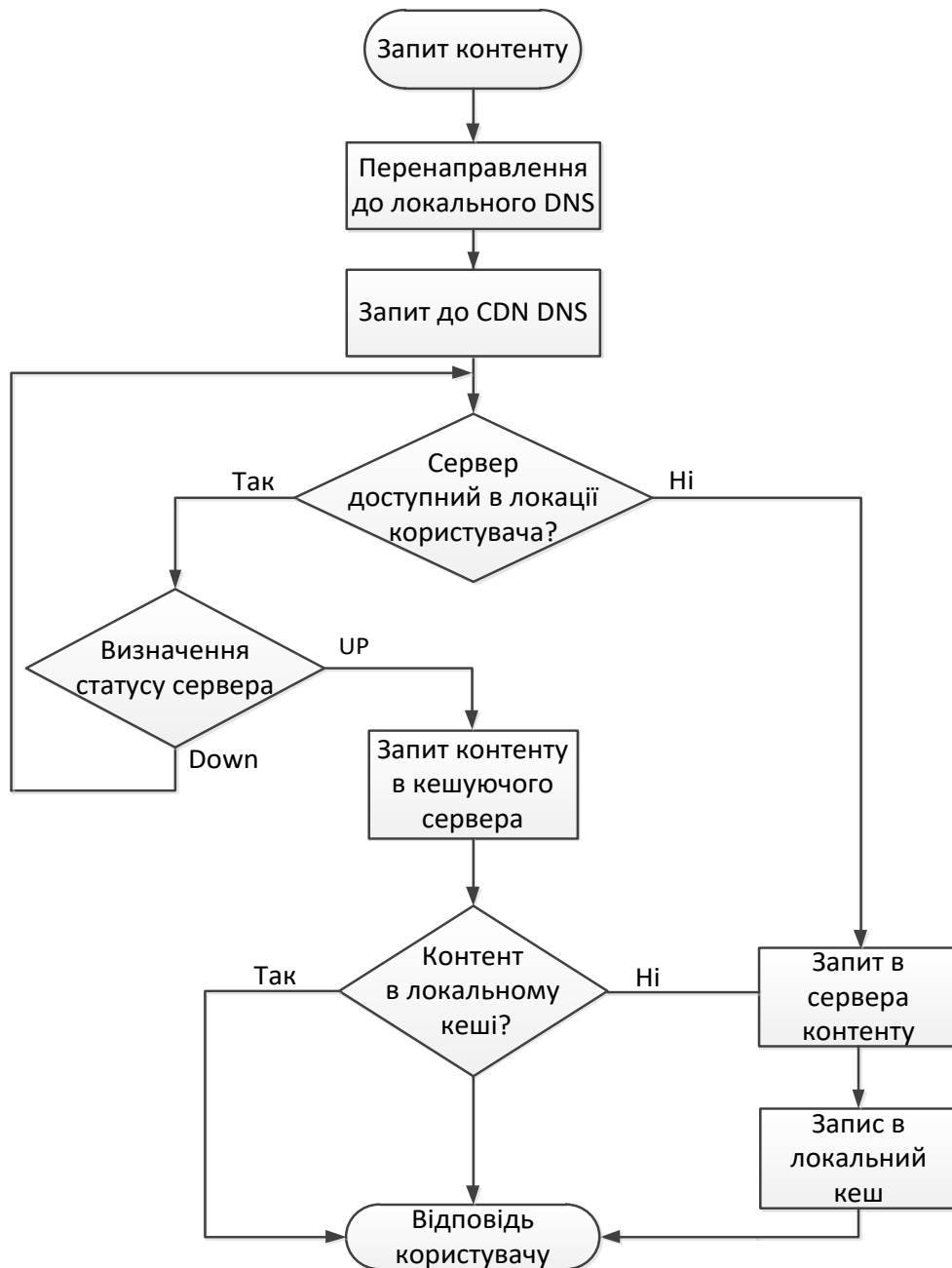


Рис.6.2. Блок-схема алгоритму проходження запитів користувачів на отримання контенту.

Опис роботи алгоритму:

1. Кінцевий користувач запитує контент із CDN ресурсу. Приклад такого запиту: <http://cdnresource.com/video/content.ts>
2. Запит перенаправляється до DNS сервера провайдера, з мережі якого запитує кінцевий користувач.
3. Локальний DNS сервера провайдер перенаправляє запит до DNS сервера CDN провайдера.
4. На основі адреси, від якої прийшов запит, DNS сервера CDN

провайдера визначає оптимальний, по параметрах відстані та затримки, кешуючий сервер, який буде обслуговувати цей запит. Відповідь із адресою сервера повертається до кінцевого користувача, який запитує ресурс.

5. Якщо немає доступного сервера, який може обслужити даний ресурс, то клієнт отримає відповідь від сервера походження.
6. Якщо в даній локації є доступний кешуючий сервер, то система вибору та перенаправлень перевірить статус даного сервера і, якщо сервер активний та всі сервіси на ньому робочі, то він буде вибраним для обслуговування запиту клієнта.
7. Відповідь, із адресою сервера, прийде до користувача та користувач запитає контент в цього сервера.
8. Кешуючий сервер перевірить, чи наявний контент в локальному кеші. Якщо так, то відповідь буде відправлена клієнту. Клієнт отримає запитуваний контент.
9. Якщо запитуваний контент відсутній в локальному кеші, кешуючий сервер запитає контент в сервера походження, збереже його в локальному кеші та надішле відповідь до користувача.
10. Кінцевий користувач бачить в своєму додатку (веб-оглядач, плеєр) запитуваний контент.

Даний алгоритм, повністю описує процеси переспрямування запитів кінцевого користувача до ресурсів CDN.

Наступним модулем багаторівневої моделі організації роботи CDN є платформа доступу (рис. 6.3). Розглянемо детальніше принцип організації платформи доступу. Як бачимо із рис.6.3, на площині доступу зображено взаємодію кінцевих користувачів з кешуючими серверами, взаємодія кешуючих серверів між собою та із сервером контенту (Origin server). Для підвищення ефективності використання мережевих ресурсів, кешуючі сервери (Edge server) можуть об'єднуватись в локації та взаємодіяти один з одним в межах спільної локації, не звертаючись до сервера контенту. Сервер контенту, для підвищення

надійності і доступності, рекомендовано дублювати та реплікувати, з метою балансування навантаження.

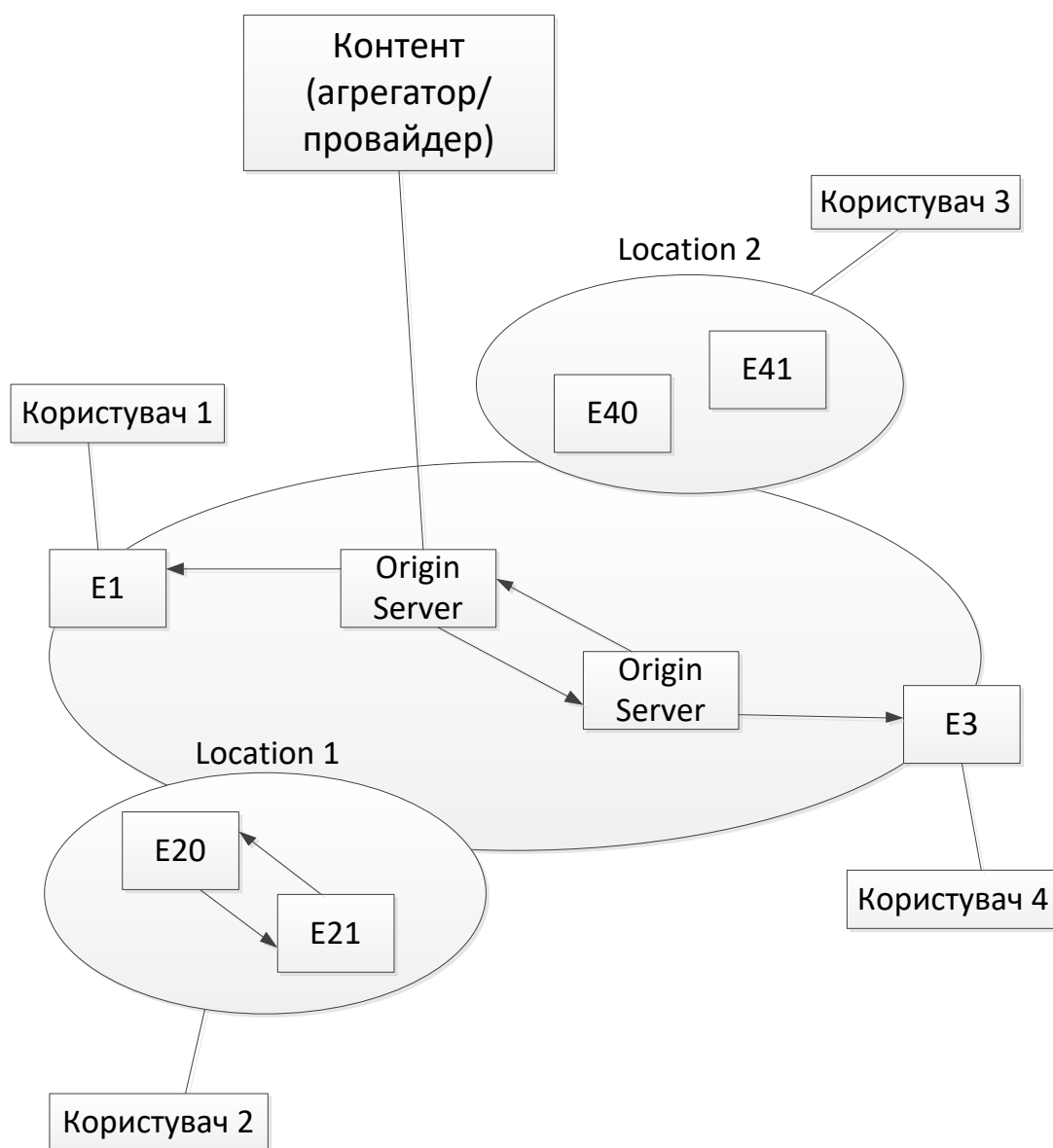


Рис.6.3. Платформа доступу до мережі CDN.

Запит кінцевого користувача завжди попадатиме до кешуючого сервера, який знаходиться найближче до його розташування. Кількість кешуючих серверів визначатиметься залежно від необхідності доступності ресурсів та контенту в CDN мережі.

Платформа доступу взаємодіє із модулем перенаправлення запитів користувачів на основі розподілених DNS серверів. Схема цієї взаємодії зображена на рис. 6.4.

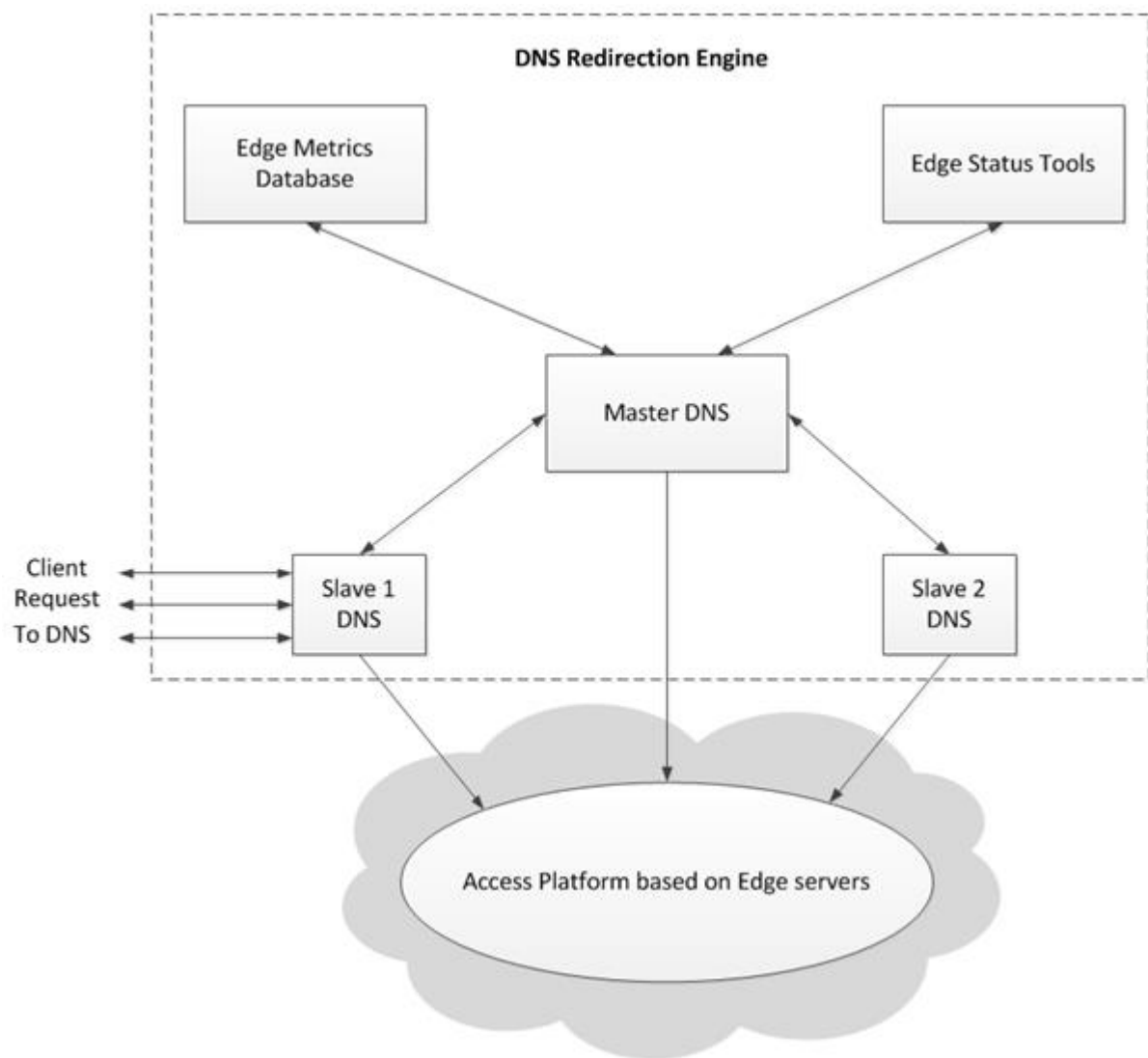


Рис.6.4. Модуль перенаправлення на основі DNS.

Модуль перенаправлення взаємодіє із платформою доступу, з однієї сторони, та з модулем метрик кешуючих серверів і модулем статусів кешуючих серверів з іншої. Більше детально кожен із модулів буде розглянуто. Як бачимо з рис. 6.4, модуль містить один або декілька головних (Master) серверів, що використовуються, як правило, для балансування навантаження та резервування, та декілька другорядних (Slave). Запит від кінцевого користувача приходить до другорядного сервера перенаправлення, який завжди шукатиме інформацію про найближчий кешуючий сервер у власній базі. Якщо дані не будуть знайдені, тоді другорядний сервер звернеться до головного. Головний сервер завжди містить актуальну інформацію про статус та доступність всіх кешуючих серверів. Інформація оновлюється постійно і завжди є актуальною.

Модель перенаправлення взаємодіє безпосередньо із модулем метрик кешуючих серверів. Структура даного модуля представлена на рисунку 6.5.

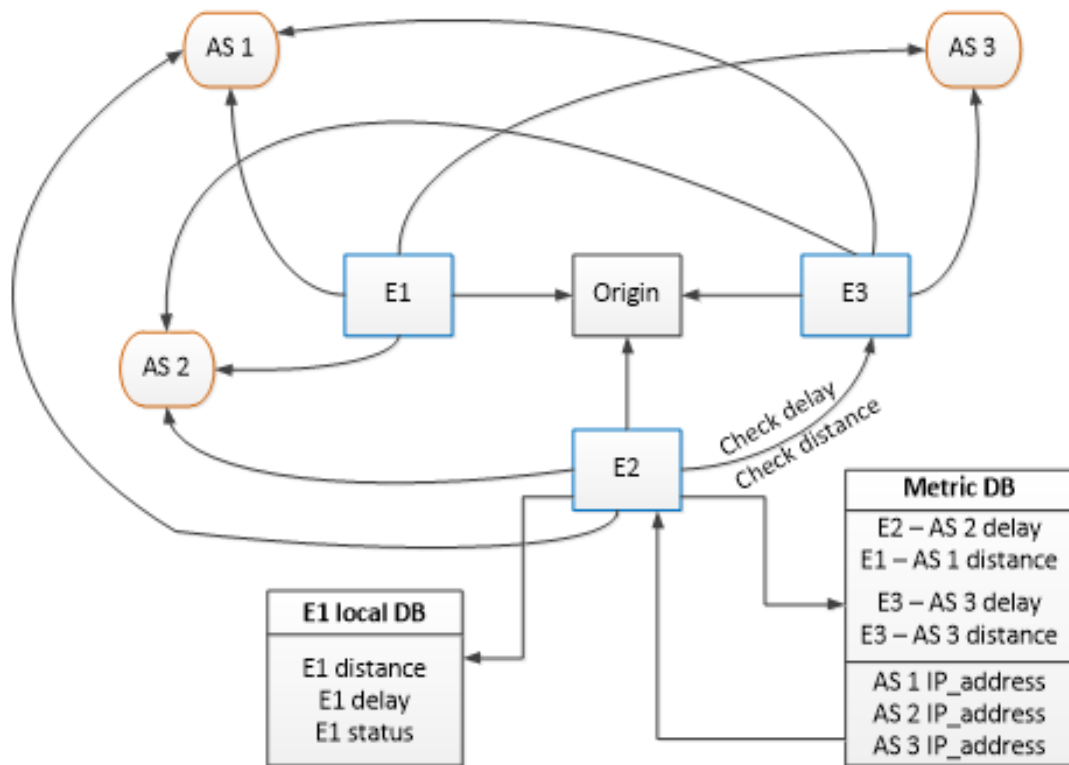


Рис.6.5. Структура системи контролю метрик кешуючих серверів.

Перед тим, як перейти до детального розгляду системи контролю метрик кешуючих серверів, визначимо поняття метрик. Що стосується передачі даних в глобальних мережах, важливе значення має затримка доставки контенту. Затримку буде визначати відстань, між клієнтом та сервером, та час затримки передавання даних. Саме такі параметри, як відстань між автономними системами та час затримки, будуть визначати метрику кешуючих серверів. Важливо визначити, як буде вимірюватись значення метрики, щоб сервер перенаправлення заздалегідь міг знати, до якого кешуючого сервера направити запит кінцевого користувача. В нашому випадку, пропонується використовувати базу метрик, яка буде спільною для кешуючих серверів. База буде містити список автономних систем з IP адресами шлюзів цих систем, які розміщені в різних датацентрах світу. Кожен кешуючий сервер буде отримувати список цих адрес, спеціальний процес на сервері звертатиметься до цих адрес і визначатиме затримку та відстань. Всі ці дані будуть записувати в

ту ж таки базу метрик. Як результат, в базі даних метрик буде міститись інформація про відстані та затримки між усіма кешуючими серверами і усіма шлюзами автономних систем. Також кешуючі сервери будуть комунікувати із сервером походження контенту та звітувати про цей статус в базу даних метрик. Таким чином, сервер перенаправлення, маючи доступ до бази даних метрик, в якій знаходяться дані про метрики всіх кешуючих серверів, зможе вибрати оптимальний, по відношенню до відстані та часу затримки, сервер, для обслуговування запитів користувачів із різних географічних локацій. Іншим модулем/платформою з якою з'єднана система перенаправлення запитів є система оцінки станів кешуючих серверів. Структурна схема такої системи представлена на рис. 6.6.

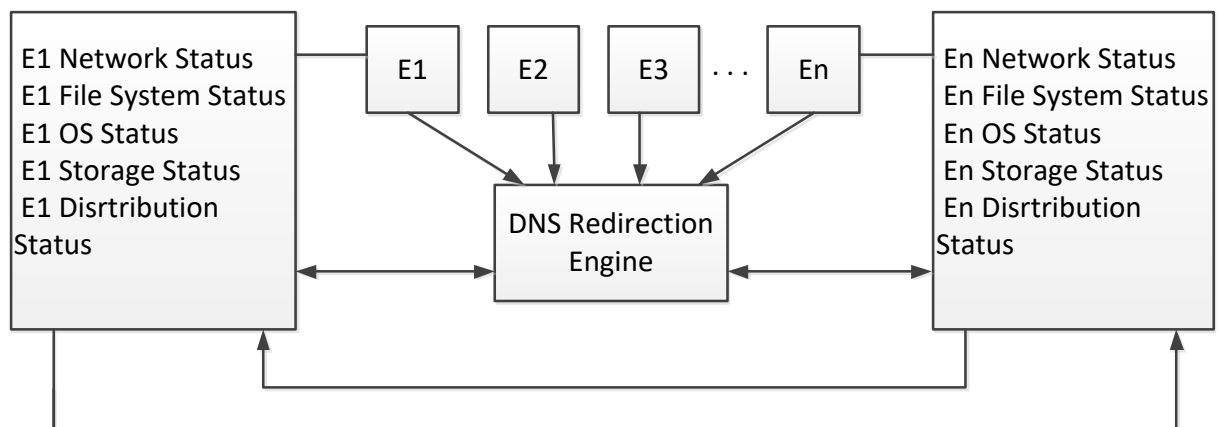


Рис.6.6. Система оцінки станів кешуючих серверів.

Кількість кешуючих серверів, що обслуговують запити кінцевих користувачів, може сягати від декількох десятків до декількох тисяч, залежно від розмірів CDN мережі та кількості клієнтів, які нею користуються. Досить часто, в межах одної локації може знаходитись більше, ніж один сервер. Однак, слід пам'ятати, що сервери можуть мати різні характеристики та підключатись до різних ISP. Отже, система оцінки станів містить дані про стан сервера, його характеристики (розміри дискового простору, оперативної пам'яті, швидкість мережевого інтерфейсу), а також додаткові параметри, які можуть бути враховані при його виборі, для передавання контенту кінцевим користувачам. Якщо, наприклад, деактивувати сервер, або паузу призупинити його роботу на

певний час, то він може цілком повноцінно працювати. Однак, сервіс перенаправлення не вибиратиме цей сервер для обслуговування запитів користувачів. Між системою оцінки станів та кешуючими серверами буде встановлена двостороння взаємодія. Система станів повинна містити актуальні дані та коректно звітувати системі перенаправлення про стан всіх серверів.

6.1.2. Моніторинг і контроль мережі доставки контенту

Зрозумілим також є факт, що для нормальної роботи та функціонування будь-якої системи, повинна бути запропонована система оцінки працездатності мережевої системи в цілому та окремих її сервісів зокрема. Для контролю системи пропонується використовувати систему моніторингу роботи серверів та функціональності модулів Health Check System. Структурна схема такої системи представлена на рисунку 6.7.

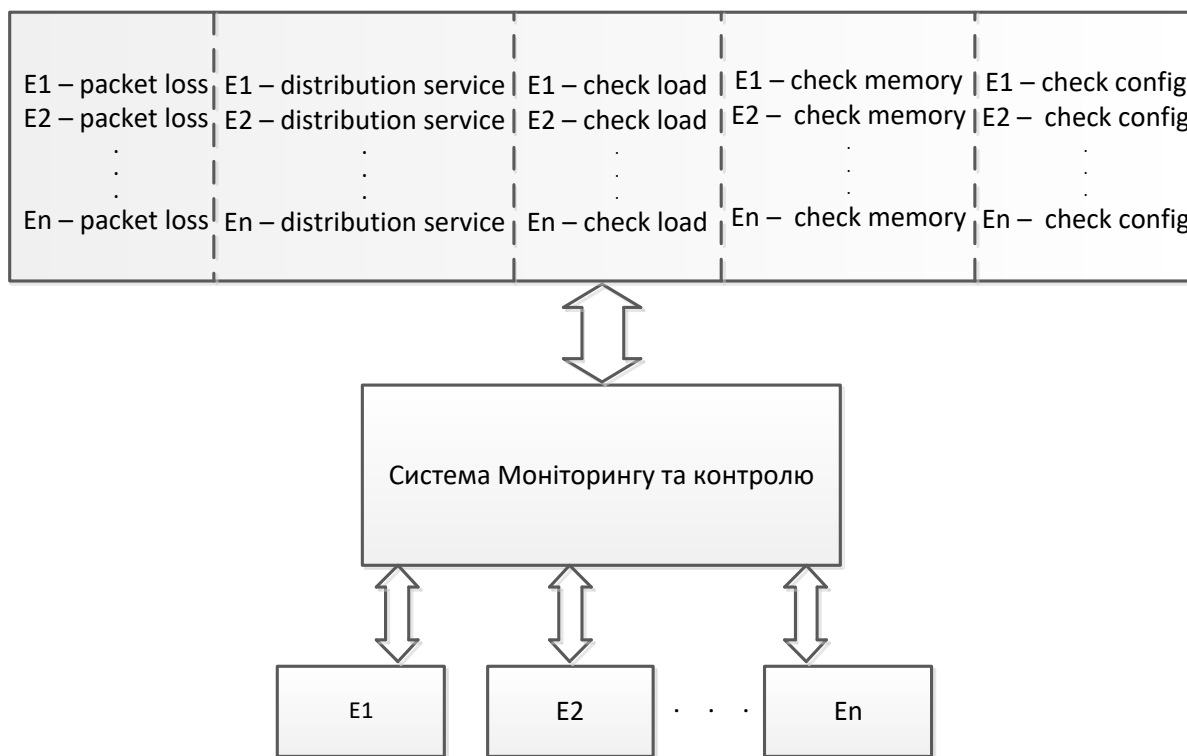


Рис.6.7. Система контролю роботи та функціонування сервісів.

Система контролю містить в собі систему моніторингу, яка працює, як окремий сервіс, та окремі агенти на кешуючих серверах, які звітують системі моніторингу про стан сервісів на самих серверах. Одними із найнеобхідніших та найважливіших сервісів, які варто моніторити, є втрата пакетів на мережевих

інтерфейсах, завантаженість обслуговуючих пристроїв, стан пам'яті, стан файлової системи, стан сервісів, які відповідають за обслуговування запитів клієнтів. Всі ці дані зберігаються в базі даних системи моніторингу. На рис. 6.8-6.11 наведено фрагменти діючої системи контролю роботи мережі CDN та функціонування сервісів [174].

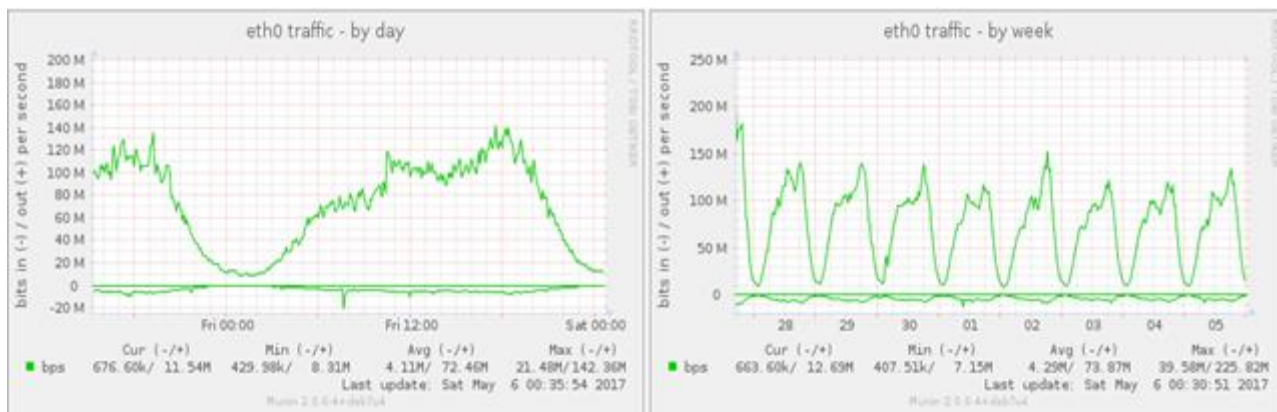


Рис.6.8. Інтенсивність трафіку на інтерфейсі обслуговуючого вузла.

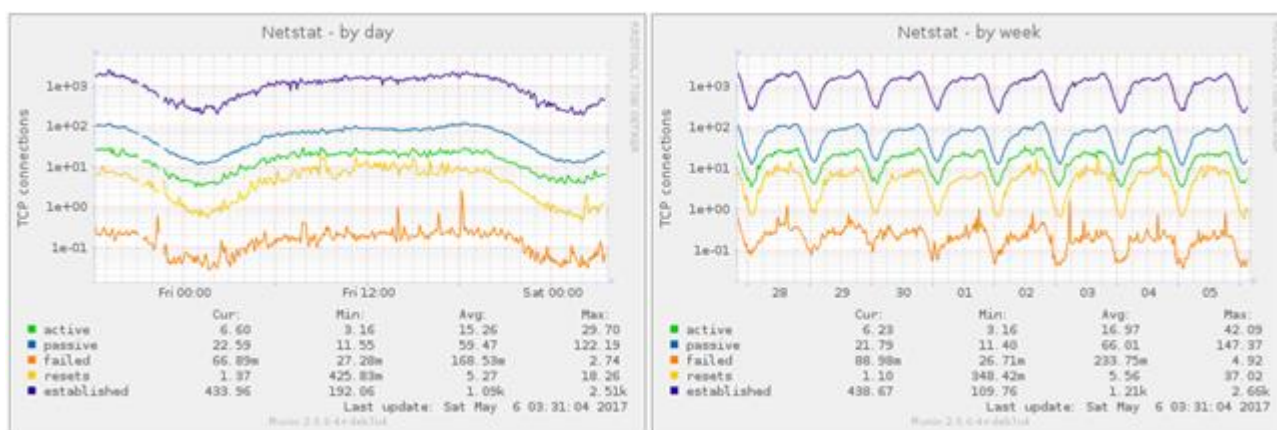
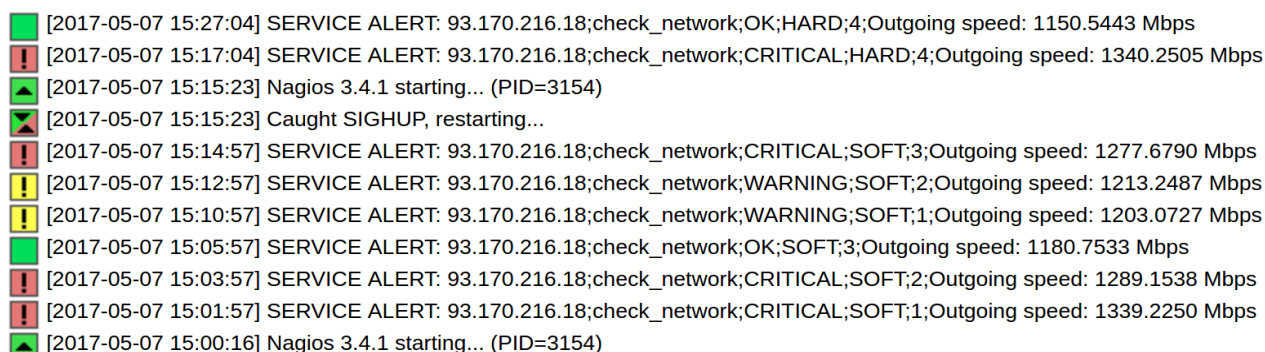


Рис.6.9. Число з'єднань на обслуговуючому вузлі.

З рисунків 6.8-6.9 бачимо, що інтенсивність трафіку та число з'єднань є достатньо високими в пікові періоди часу, та суттєво знижуються в період низької активності. Беручи до уваги ці значення, пристрій, що здійснює розподіл навантаження, буде визначати стан даного сервера та направляти оптимальну кількість запитів до цього вузла. Ці значення можна використовувати, як для збирання статистики, так і для прийняття рішення щодо завантаженості вузла та можливості бути вибраним, для обслуговування окремих ресурсів.

Система перенаправлення запитів, перш, ніж перенаправляти запит користувача до конкретного кешуючого сервера, звернеться до системи моніторингу та перевірить його статус. Якщо всі сервіси працюють та сервер доступний, - це свідчитиме, що даний сервер придатний до обслуговування запитів кінцевих користувачів.

Варто зазначити, що робота кожної платформи, системи та окремих підсистем є важливою та необхідною для функціонування технології CDN вцілому. Вихід з ладу однієї з ланок, призведе до некоректної роботи всієї системи. Тому не варто також недооцінювати роботу системи сповіщень та передбачень виникнення помилок, а також критичних проблем із роботою кешуючих серверів. Основною функцією такої системи є повідомлення власників обслуговуючих пристроїв про можливі проблеми в роботі вузлів, а також про передумови їх виникнення. Приклад сповіщення однієї із систем моніторингу, а саме сповіщення про ліміт швидкості передавання даних на інтерфейсі обслуговуючого пристрою, представлено на рис. 6.10.



The image shows a list of Nagios service alerts for a network check. Each line starts with a colored icon: a green square for OK, a red exclamation mark for CRITICAL, and a yellow exclamation mark for WARNING. The text of each alert includes a timestamp, the service name 'check_network', the severity level (OK, CRITICAL, WARNING), the soft state (SOFT), the hard state (HARD), and the outgoing speed in Mbps.

- [2017-05-07 15:27:04] SERVICE ALERT: 93.170.216.18;check_network;OK;HARD;4;Outgoing speed: 1150.5443 Mbps
- [2017-05-07 15:17:04] SERVICE ALERT: 93.170.216.18;check_network;CRITICAL;HARD;4;Outgoing speed: 1340.2505 Mbps
- [2017-05-07 15:15:23] Nagios 3.4.1 starting... (PID=3154)
- [2017-05-07 15:15:23] Caught SIGHUP, restarting...
- [2017-05-07 15:14:57] SERVICE ALERT: 93.170.216.18;check_network;CRITICAL;SOFT;3;Outgoing speed: 1277.6790 Mbps
- [2017-05-07 15:12:57] SERVICE ALERT: 93.170.216.18;check_network;WARNING;SOFT;2;Outgoing speed: 1213.2487 Mbps
- [2017-05-07 15:10:57] SERVICE ALERT: 93.170.216.18;check_network;WARNING;SOFT;1;Outgoing speed: 1203.0727 Mbps
- [2017-05-07 15:05:57] SERVICE ALERT: 93.170.216.18;check_network;OK;SOFT;3;Outgoing speed: 1180.7533 Mbps
- [2017-05-07 15:03:57] SERVICE ALERT: 93.170.216.18;check_network;CRITICAL;SOFT;2;Outgoing speed: 1289.1538 Mbps
- [2017-05-07 15:01:57] SERVICE ALERT: 93.170.216.18;check_network;CRITICAL;SOFT;1;Outgoing speed: 1339.2250 Mbps
- [2017-05-07 15:00:16] Nagios 3.4.1 starting... (PID=3154)

Рис.6.10. Приклад сповіщення системи моніторингу.

Отримавши таке сповіщення, система моніторингу може самостійно приймати рішення щодо подальшої роботи даного пристрою. Як варіант, система моніторингу може деактивувати пристрій, з метою запобігання втрати запитів, які він не зможе обслужити (рис.6.11). Іншим варіантом може бути перенаправлення всіх запитів на сусідній сервер, який знаходиться в тій же зоні обслуговування, з метою покращення рівня обслуговування.

channels_fps_group (channels_fps_group)			
Host	Status	Services	Actions
channels_fps	UP	131 OK	[Icons]

gtv hosts (gtv hosts)			
Host	Status	Services	Actions
deslsrv1m.cdnten.com	UP	8 OK	[Icons]
gtv.cdnten.com	UP	11 OK	[Icons]

Linux Servers (linux-servers)			
Host	Status	Services	Actions
Monitoring	UP	8 OK	[Icons]

pbi (pbi)			
Host	Status	Services	Actions
pbi1_admin	UP	No matching services	[Icons]
pbi1_mcast	UP	No matching services	[Icons]
pbi2_admin	UP	No matching services	[Icons]
pbi2_mcast	UP	No matching services	[Icons]
pbi3_admin	UP	No matching services	[Icons]
pbi3_mcast	UP	No matching services	[Icons]
pbi4_admin	UP	No matching services	[Icons]
pbi4_mcast	UP	No matching services	[Icons]
pbi5_admin	UP	No matching services	[Icons]
pbi5_mcast	UP	No matching services	[Icons]
pbi6_admin	UP	No matching services	[Icons]
pbi6_mcast	UP	No matching services	[Icons]
pbi7_admin	UP	No matching services	[Icons]
pbi7_mcast	UP	No matching services	[Icons]
pbi8_admin	DOWN	No matching services	[Icons]
pbi8_mcast	UP	No matching services	[Icons]

Network Switches (switches)			
Host	Status	Services	Actions
sw3_4948	UP	1 OK	[Icons]
switch1	UP	1 OK	[Icons]
switch2	UP	1 OK	[Icons]

tvc hosts (tvc hosts)			
Host	Status	Services	Actions
Linatel_51	UP	4 OK	[Icons]
Linatel_54	UP	3 OK	[Icons]
Titan	UP	4 OK	[Icons]
caovsrv2m.cdntvc.com	UP	6 OK	[Icons]
ccam.levtv.net	UP	3 OK	[Icons]
deovsrv2	UP	5 OK	[Icons]
evresrv1m.cdntvc.com	UP	1 OK	[Icons]
hvdra	UP	6 OK	[Icons]
moi_tuner	UP	No matching services	[Icons]
shuvarcam.levtv.net	UP	2 OK	[Icons]
stor1	UP	6 OK	[Icons]
tvc.cdntvc.com	UP	11 OK	[Icons]
us100tb1m.gtvcdn.net	UP	3 OK	[Icons]
usdedis1m.cdntvc.com	UP	4 OK	[Icons]
usiosrv1m.cdntvc.com	UP	4 OK	[Icons]
usslsrv3m.cdnten.com	UP	4 OK	[Icons]
vodstor1.cdntvc.com	UP	3 OK	[Icons]
wsrv1.cdntvc.com	UP	6 OK	[Icons]

Рис. 6.11. Фрагменти діючої системи контролю роботи мережі CDN та функціонування сервісів.

6.2. Дослідження ефективності використання мережі CDN

Процес отримання контенту через CDN можна описати кількома етапами (рис.6.12):

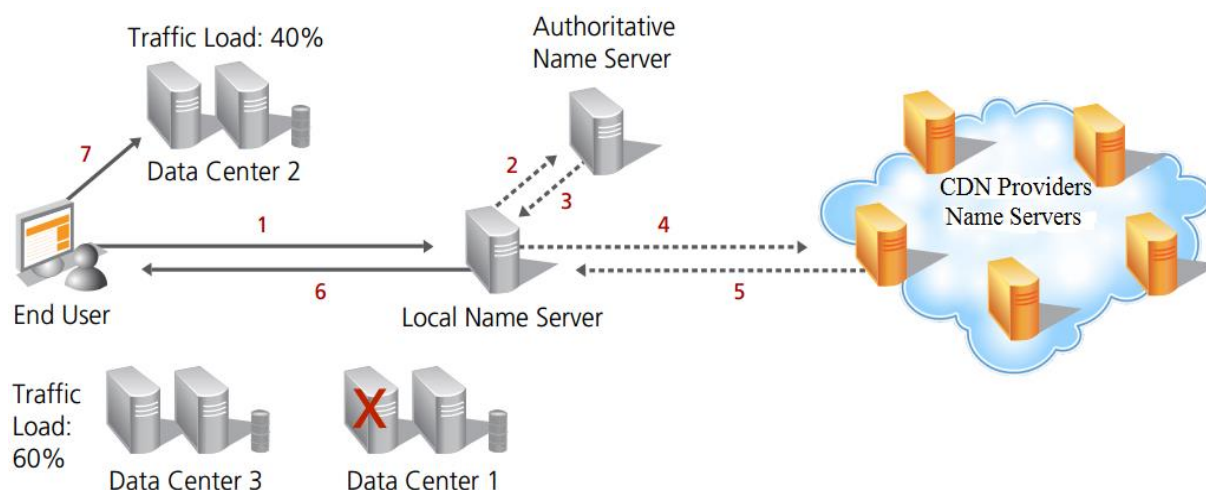


Рис.6.12. Етапи отримання контенту через CDN.

1. Користувач запитує ресурс (веб сайт чи відео додаток) і його браузер робить запит до локального DNS для отримання IP адреси.

2. Використовуючи стандартну політику роботи служби DNS, локальний сервер запитує IP адресу в авторитетного (англ. authoritative) DNS.
3. DNS сервер дає відповідь, включаючи запис CNAME, із посиланням (ip-alias) на CDN провайдера.
4. Локальний DNS звертається до DNS сервера CDN провайдера, для отримання оптимального маршруту до запитуваного контенту.
5. DNS сервери CDN провайдера віддають список адрес серверів із оптимальним маршрутом до користувача, який запитує контент.
6. Локальний DNS відправляє одну із адрес браузеру чи іншому додатку кінцевого користувача.
7. Отримавши адресу сервера, кінцевий користувач звертається за контентом до конкретного сервера, який надає його користувачу.
8. Варто зазначити, що при виборі сервера віддачі зі списку адрес, які повертають DNS сервери провайдера CDN, враховується завантаженість та доступність серверів віддачі контенту [175]

Основними сервісами CDN є:

- Потокове мовлення відео в режимі реального часу (Live Streaming). Трансляція може відбуватись із сервера постачальника контенту, або безпосередньо з IP-камери. Інша область застосування Live Streaming – трансляція прямого ефіру телеканалів через Інтернет.
- Потокове мовлення відео за запитом (Video on Demand Streaming). Передбачає перегляд відеоконтенту в будь-який момент часу, зручний для кінцевого користувача. Можливий перегляд відео з будь-якого місця без завантаження всього вмісту.
- Http-кешування. Http-контент, в міру потреби, кешується на серверах роздачі і віддається з оптимального сервера за запитом користувача.
- Кодування відео в режимі реального часу. Конвертація та перекодування одного формату файлів в інші формати чи контейнери.

- Транскодування відеопотоків. Перетворення типу компресії (наприклад, MPEG-2 в H.264), зміна бітрейту чи розміру відео [176].

Варто зазначити, що крім суттєвого зменшення навантаження на сервери додатків, CDN мережа виконує й ряд інших функцій. Всі сучасні провайдери розміщують копії своїх додатків на усіх, доступних для них, кешуючих серверах, які перенаправляють запити користувачів до найближчих з них. Як результат, отримуємо значно меншу затримку при доставці даних кінцевому користувачу та якісніше надання послуг. Власне, суттєве зниження часу доставки контенту і стало однією із найвагоміших переваг використання CDN мереж. Використання CDN також дає можливість суттєво економити трафік: передати на інший контент файли один раз, тримати їх там на локальному сервері і роздавати через локальні канали дешевше, ніж передавати той же трафік тисячі разів через міжконтинентальні канали передачі даних. Всі ці методи є необхідними для забезпечення ефективного використання ресурсів мережі та вузлів доставки контенту [177].

Для того, щоб швидко віддавати контент з локального сервера (Edge server) без звернення до оригінального сервера (Origin server), треба, щоб цей контент на ньому з'явився (і залишався). Існує багато схем кешування. Найпоширенішими серед яких є:

- Реплікація всього контенту. Перевагою такого методу є велика швидкодія, навіть першої відповіді. До недоліків можна віднести високу вартість такої реалізації.
- Реплікація за першим зверненням (найпоширеніша схема). Перше звернення повільне, а всі наступні швидші.
- Асинхронна реплікація по перевищенню певного порогу звернень. Економічніша версія, більшість клієнтів отримує повільне обслуговування.

Поруч з політикою кешування йде політика очищення кешу: коли саме об'єкт видаляється з сервера в точці присутності? Найпоширенішими варіантами можуть бути:

- за певний час “тайм-аут”, за який не було звернень до ресурсу;
- після зменшення числа звернень нижче деякої величини;
- "ніколи", через фіксований час.

Досить часто постають питання доцільності використання CDN мережі, кількості кешуючих серверів, необхідної для якісного обслуговування мережеских ресурсів. Далі буде представлено результати імітаційного моделювання роботи CDN з використанням програмного середовища моделювання CDNsims, яке призначено для тестової оцінки CDN мереж і побудови експериментальних моделей [178, 179].

Проведено дослідження мережі, що містить 100 кешуючих (Edge) серверів, кожен з яких здатний обслуговувати до 1000 одночасних підключень користувачів. Розмір пам'яті, що виділяється на кешування контенту, буде визначатись відсотком від загального розміру даних обслуговуючого ресурсу.

При проведенні моделювання також було враховано існування маршрутизаторів на шляху від постачальника контенту до кінцевого користувача. Маршрутизатори утворюють мережескі магістралі, де підключаються інші елементи мережі [180].

Запити генеруються симулятором, який враховує структуру ресурсів, генерує запити у вигляді послідовності сторінок, схожі до тих, що генерують реальні користувачі. Введемо поняття популярності об'єкта CDN ресурсу. Популярність визначається ймовірністю запиту даного об'єкту. Співвідношення популярності до розміру коливається в межах $[-1..1]$. Позитивне співвідношення вказує на те, що великі об'єкти більш популярні, ніж дрібні. Нульове співвідношення передбачає, що розмір і популярність не мають ніякого відношення один до одного.

Hit ratio – це співвідношення запитів, які були обслужені без використання інших кешуючих серверів або сервера походження, до загальної кількості запитів. Це значення може коливатися в межах $[0..1]$. Високі значення коефіцієнта попадання є бажаними, оскільки суттєво знижують час відповіді. Параметри моделювання представлено у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1. Параметри моделювання роботи CDN

Параметри	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Дослід 4
Розмір контенту	1 ГБ	1 ГБ	1 ГБ	1 ГБ
Кількість об'єктів, що запитуються	50000	50000	50000	50000
Співвідношення популярності до розміру	0	0	-1,0,1	0
Кількість запитів	1000000	1000000	1000000	1000000
Часовий інтервал запиту	1 с	1 с	1 с	1 с
Часовий розподіл інтервалів	Експон.	Експон.	Експон.	Експон.
Швидкість з'єднання	1 Гбіт/с	1 Гбіт/с	1 Гбіт/с	1 Гбіт/с
Тип мережевої топології	AS, Waxman, Transit stub, Random	AS	AS	AS
Кількість маршрутизаторів	3037,1000	3037	3037	3037
Кількість граничних (Edge) серверів	100	100	100	100
Кількість клієнтів	100	100	100	100
Розмір кеш у % від розміру контент-ресурсу	2,5%, 5%, 10%, 20%, 40%, і 80%	2,5%, 5%, 10%, 20%, 40%, і 80%	2,5%, 5%, 10%, 20%, 40%, і 80%	2,5%, 5%, 10%, 20%, 40%, і 80%

Для оцінки продуктивності роботи CDN, введено термін «доцільність CDN». Доцільність CDN – це нормалізоване відношення відвантажених даних

до завантажених. Це значення може бути в межах $[0...1]$. Зрозумілим є факт, що для нормально налагодженої CDN мережі це значення має бути більшим 0.5.

На рис. 6.9 показано значення залежності продуктивності використання CDN від розміру кеш-пам'яті для різних мережевих топологій.

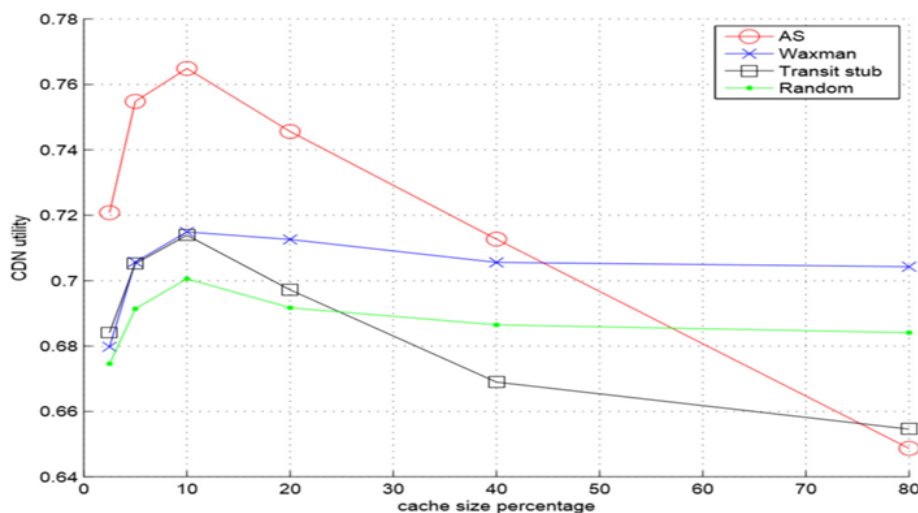


Рис.6.9. Залежність продуктивності використання CDN від розміру кеш-пам'яті.

На графіку чітко видно один пік, коли розмір кеш-пам'яті становить 10% від загального розміру обслуговуваного ресурсу. Можна також вважати, що пікова продуктивність приблизно однакова для всіх досліджуваних топологій. До моменту досягнення піку, розмір кеш-пам'яті є надто малим і в самій CDN мережі є дуже мало контенту, який запитується. В результаті, практично всі запити будуть перенаправлятися на оригінальний сервер (Origin). В такому варіанті ефективність використання мережі CDN є низькою. У міру збільшення розміру кеш-пам'яті, кількість реплікацій змісту збільшується та обмін даними між кешуючими серверами зростає. Якщо розмір кеш-пам'яті занадто великий, то обмін даними між кешуючими (Edge) серверами припиниться, оскільки весь контент буде збережений в пам'яті кожного сервера.

Не слід забувати, що закешувати контент на 100% неможливо тому, що частина контенту постійно оновлюється (динамічний контент). Динамічний контент завжди потрібно запитувати від оригінального сервера [181].

Із представленої залежності (рис. 6.9) можна зробити висновки, що збільшення розміру кеш-пам'яті не завжди забезпечує ефективність

використання CDN. Це варто враховувати при виборі оптимального розміру кеш-пам'яті. При невеликому розмірі вмісту ресурсу, спостерігається пік ефективності і гарантуються задовільні результати, за рахунок зниження трафіку. Також варто пам'ятати, що збільшення пропускної здатності та розміру пам'яті впливає на ціну послуг CDN.

На рис. 6.10 представлено залежність коефіцієнта попадання від розміру кеш-пам'яті. Коефіцієнт попадання – це співвідношення запитів, які були обслужені без взаємодії з іншими граничними (Edge) серверами або сервером походження (Origin), до загальної кількості запитів. Ця величина коливається в межах $[0..1]$. Високі значення коефіцієнта попадання бажані, оскільки вони призводять до зменшення часу відгуку.

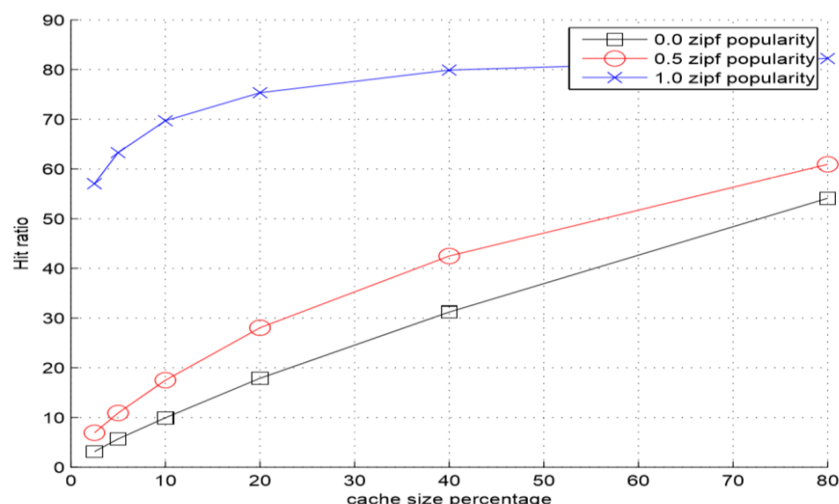


Рис. 6.10. Залежність коефіцієнту попадання від розміру кеш-пам'яті.

Як бачимо із цієї залежності, що при збільшенні розміру пам'яті значення коефіцієнта попадання теж зростає.

Вищі значення z приводять до більш високої продуктивності CDN. Це підтверджується і на рис. 8, де при $z=0$ об'єкти рівномірно запитуються і коефіцієнт попадання дуже низький, навіть, для великих розмірів кеш-пам'яті. При $z=1$ коефіцієнт попадання дуже високий, навіть, при дуже малих розмірах кеш-пам'яті. В такому випадку, розмір файлів є достатньо великий і довго зберігається в кеш-пам'яті.

Важливим показником, для оцінки якості роботи CDN, є час відповіді запитаного ресурсу. Саме цей параметр визначає, як швидко користувач

отримає запитуваний контент. На рис. 6.11 показано залежність часу відгуку від розміру кеш-пам'яті для різних методів перенаправлення.

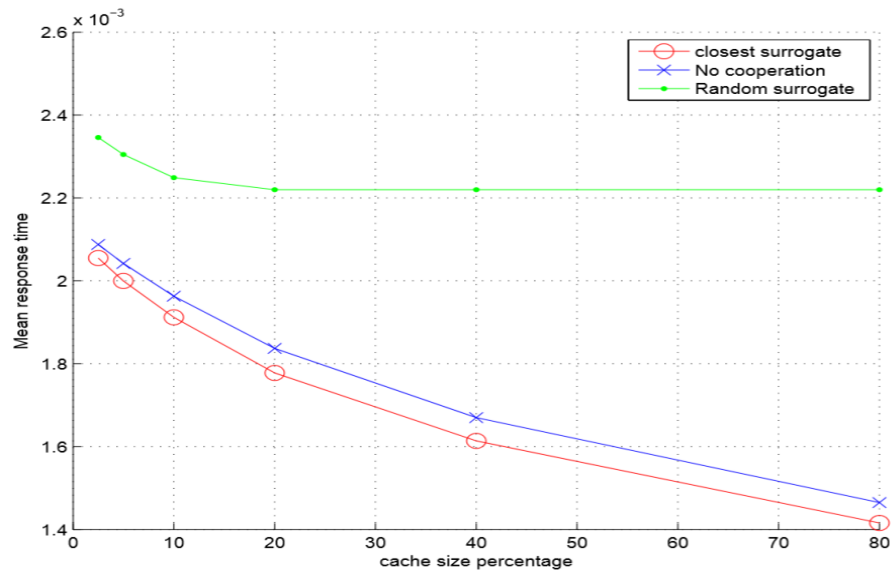


Рис.6.11. Залежність часу відповіді від розміру кеш-пам'яті.

Найкращу якість можна отримати при використанні граничних серверів із взаємодією. Трохи більшим буде час, при способі перенаправлення без взаємодії, оскільки, в такому випадку, запити будуть надходити безпосередньо до оригінального сервера.

Очевидним є той факт, що, зі збільшенням розміру кеш-пам'яті, час відповіді буде зменшуватись, оскільки більшість контенту буде знаходитись на граничних серверах, які знаходяться ближче до кінцевого користувача [182].

6.3. Особливості передавання мультисервісного трафіку в мережі CDN.

Розрахунки параметра Херста, для досліджуваного трафіку, проводились в середовищі Matlab. Фрагмент програми, для визначення параметра Херста, має вигляд:

```
s=load ('traffic.dat','a','k');
max_T=max(s(:,1));
f1=figure;
plot (0:0.1:max_T,s(:,2),'black');
N=length(s);
R1=max(s(:,2))-min(s(:,2));
S1=std(s(:,2));
H1=log2(R1/S1)/log2(N/10);
```

Для досліджуваного unicast трафіку, інтенсивність надходження пакетів якого зображена на рис.6.12, параметр Херста становить $H=0.674$

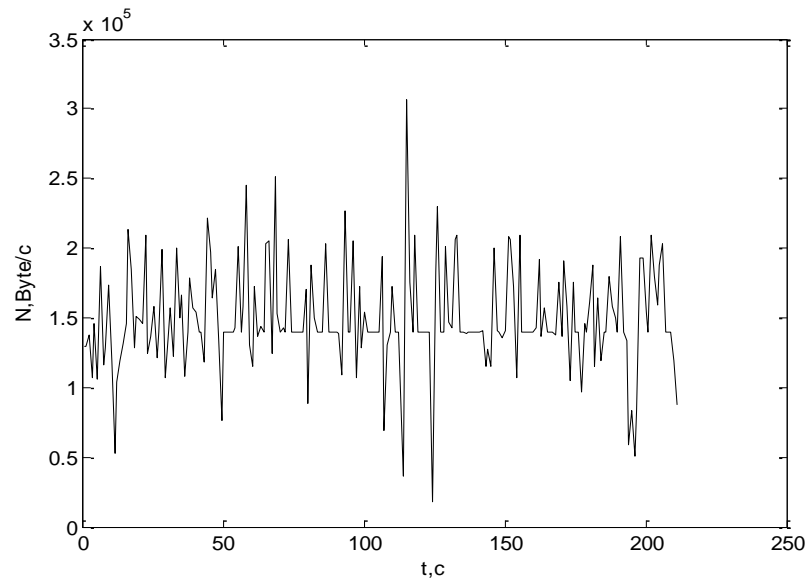


Рис 6.12. Інтенсивність проходження unicast трафіку по протоколу tcp.

Іншим типом трафіку, який проходив в даній мережі, був трафік multicast, що транслювався протоколом UDP. Для такого типу трафіку параметр Херста становить $H=0.662$, а інтенсивність надходження пакетів зображена на рис 6.13.

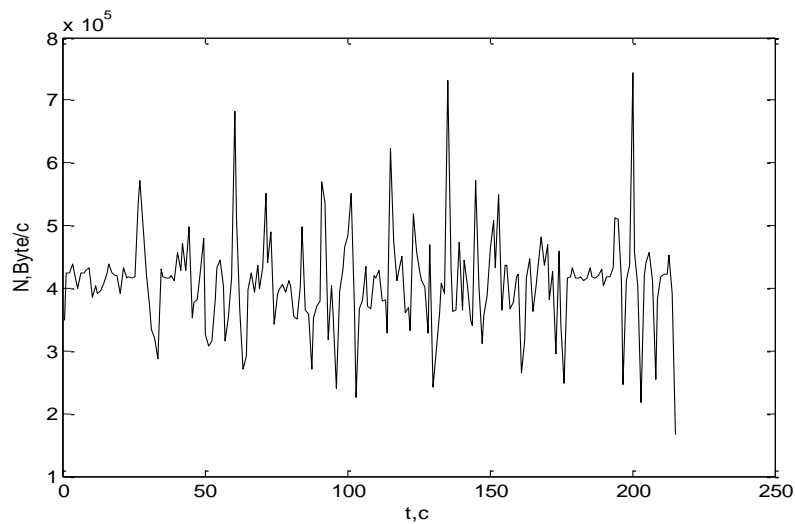


Рис 6.13. Інтенсивність проходження multicast трафіку по протоколу udp.

Проаналізувавши отримані результати, можна стверджувати, що значення параметра Херста $H=0,662$ та $H=0,674$ і є достатньою підставою для визнання процесу самоподібним.

Ефект самоподібності трафіку надає негативний вплив на продуктивність мереж передачі даних, зважаючи на значно більшу потребу в буферній пам'яті

телекомунікаційних систем, що є одним з основних чинників, які впливають на величину затримки. Величина затримки буде залежати від швидкості передачі повідомлень, смуги пропускання каналу зв'язку, а також кількості пристроїв, що обслуговуються, які будуть здійснювати обробку повідомлень [183].

Із зростанням швидкості передачі повідомлень та кількості пристроїв, що обслуговуються, значення часу затримки буде зростати. Це можна пояснити тим, що, із зростанням швидкості, зростає кількість інформації, яка передається, і відповідно час, необхідний на її обробку, буде збільшуватися.

У випадку збільшення смуги пропускання каналу зв'язку, час затримки зменшиться, за рахунок зростання кількості інформації, яка може бути передана за одиницю часу через канал передачі даних. Для прикладу, наведемо залежність часу затримки T від пропускнуої здатності каналу зв'язку P [184]. Представлена на рис. 6.14 залежність відображає, як змінюється час затримки, в залежності від швидкості передавання та смуги пропускання каналу зв'язку.

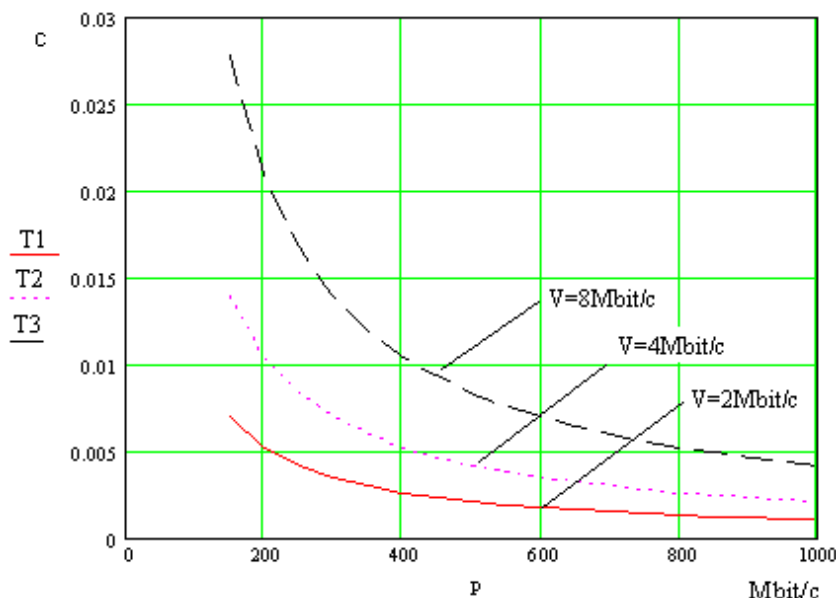


Рис 6.14. Залежність часу затримки від смуги пропускання каналу.

Можна вважати, що із збільшенням швидкості передачі у два рази, час затримки, відповідно, також зросте приблизно вдвічі, а із зростанням смуги пропускання до 1000 Мбіт/с, значення часу затримки значно знизиться.

Дана мережа є достатньо ефективною для передачі одноадресних та багатоадресних потоків, що здійснюють передачу даних реального часу. Весь

трафік, присутній в даній мережі, володіє властивістю самоподібності, про що свідчить параметр Херста. Ця властивість дає можливість стверджувати, що такі типи трафіку (реального часу) не можна описати звичайним Пуассонівським розподілом, оскільки його статистичні характеристики проявляють властивість масштабування, а сам процес зберігає схильність до сплесків.

Властивість самоподібності також негативно впливає на продуктивність мережі, збільшуючи величину затримки. Величина затримки зростатиме із збільшенням швидкості передачі даних, а оскільки дані реального часу, а саме відео високої якості, вимагають досить значних швидкостей - близько 20Мбіт/с, то величина затримки буде досить великою, що є недопустимим для даних реального часу. Одним із способів вирішення цієї проблеми є використання високошвидкісних каналів передачі даних.

6.4. Метод підвищення QoE для послуг IPTV/OTT.

6.1.1. Методика оцінювання QoE за параметром «Час перемикання»

Добре відомо, що час перемикання є важливим чинником, який впливає на QoE, та існує не багато інформації про вимоги до часу перемикання. В роботі [185] час перемикання називають задовільним, якщо він становить менше 1 секунди. Це узгоджується із загальними принципами для часу відгуку комп'ютерних систем [186]. Мінімальні вимоги до якості в IPTV були вказані, як ITU[187] і DSL Forum [188]. Однак, у документі ITU немає рекомендації на затримки перемикання, в той час, як DSL Forum рекомендує обмежити затримку перемикання максимум до 2 секунди. Крім того, DSL Forum зауважує, що постачальники повинні прагнути до перемикання за 1 секунду.

Європейські вчені провели статистичні дослідження [189] та за відгуками користувачів отримали дані MOS, які представлені в таблиці 6.2 та в графічному вигляді на рисунку 6.15.

Таблиця 6.2. Шкала оцінювання якості за часом перемикання каналів

Час перемикання каналу	Оцінка(MOS)	Похибка
0	4,9	0,46
0,1	4,7	0,47
0,2	4,5	0,58
0,5	3,9	0,63
1	2,8	0,69
2	2,1	0,63
5	1	0

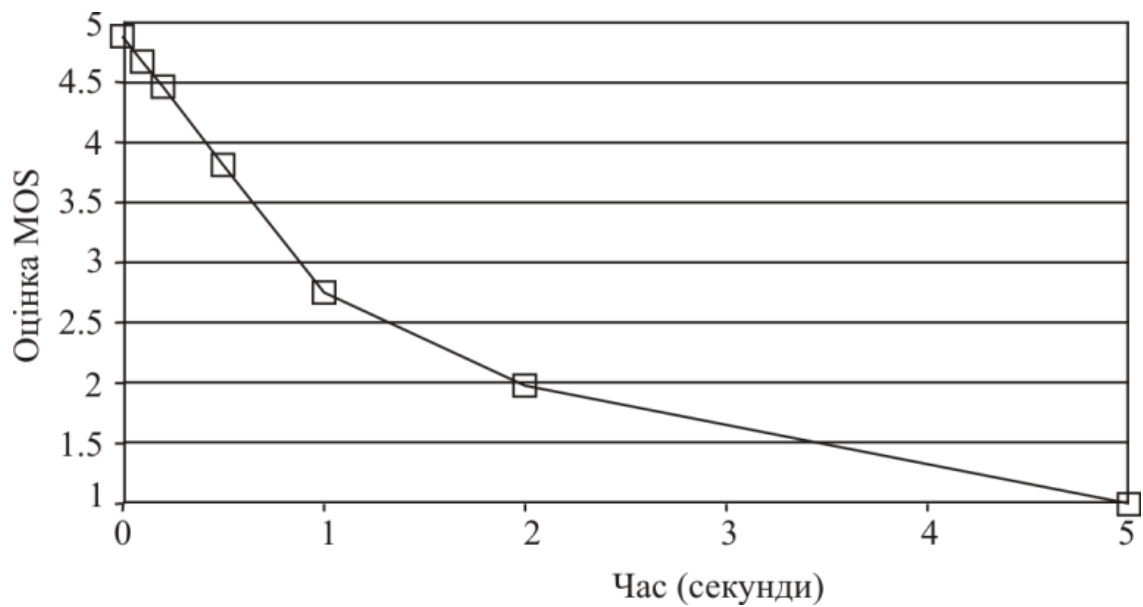


Рис. 6.15 Шкала оцінювання QoE за часом перемикання каналів.

На час перемикання впливає багато факторів. На рис. 6.16 графічно представлений процес зміни каналу користувачем.



Рис. 6.16. Процес перемикання відеопотоків.

В таблиці 6.3 зображені можливі параметри для кожного з наведених факторів.

Таблиця 6.3. Фактори, що впливають на затримку при перемиканні каналу

Фактор	Час затримки
Затримка отримання даних про канал	0-0,5 (секунди)
Мережеві затримки	0,1-1 (секунди)
Очікування I-фрейму	0-3 (секунди)
Протиджитерний мережевий буфер	50 (мілісекунд)
Буфер MPEG	1-4 (секунди)
Загальний час	1,65-8,55 (секунди)

Також, слід відзначити, що затримка включає ще й час відкриття мережевих сокетів та затримку декодування. Проте, цей час настільки малий (30-40 мілісекунд), що на фоні затримок, які ми отримуємо від інших факторів, цими затримками можна нехтувати.

В залежності від мережі доставки контенту може змінюватись і значення мережових затримок. Блок-схема мережі доставки IPTV/OTT контенту зображена на рисунку 6.17.

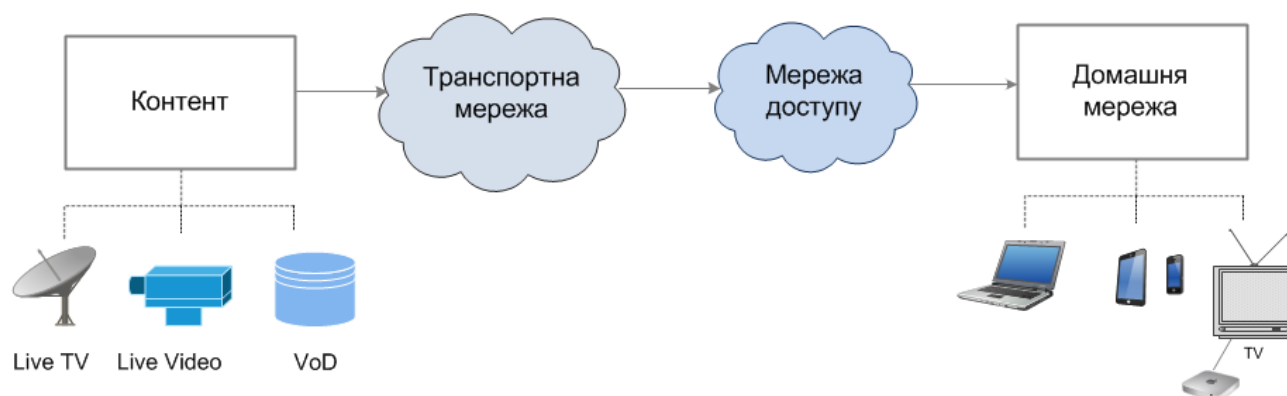


Рис. 6.17. Типова мережа доставки контенту.

Найбільш залежною від мережевого обладнання частиною затримки в процесі перемикання є мережові затримки. Дана затримка складає менше, ніж 1/5 від загальної затримки при перемиканні. Методами боротьби з нею можуть бути: переміщення серверів доставки контенту якнайближче до абонента, заміна на ефективніші технології останньої милі, використання пріоритезації в доставці трафіку.

Багато робіт останніх років акцентують увагу на можливості зміни в GOP структурі, що в умовах мультикасту цілком виправдано, адже мережові затримки, в цьому випадку, не відіграють такої ролі. Окрім того, використовується протокол UDP, який не потребує встановлення з'єднання. При використанні одноадресної доставки, GOP структура також важлива, проте, вона не вирішує проблему настільки вдало, як у випадку з багатоадресною розсилкою. Як показують результати дослідження [190], даний метод може скоротити час перемикання в межах 70%, у випадку використання багатоадресної передачі.

Також існують роботи зі зменшення часу підключення до IGMP груп [191], проте, даний випадок не підходить для OTT сервісу [192].

Серед радикальних методів вирішення даної проблеми є методи паралельного транслювання потоків. Наприклад, паралельного транслювання

багатьох потоків з нижчою якістю. Такий підхід є лише частковим вирішенням даної проблеми, адже користувач буде мати постійно заповнений канал зв'язку і буфери. Також цей підхід не виправданий для головної станції IPTV, оскільки кількість потоків буде рівною кількості користувачів, помноженій на кількість каналів, нехай і нижчої якості.

6.1.2. Метод швидкого перемикавання та процес моделювання

Пропоноване рішення являє собою алгоритм, який реалізується програмно на стороні клієнта. Процес перемикавання каналів користувачем в часовій площині представлено на рисунку 6.18.

Даний метод – це повністю програмне рішення, яке реалізується на кінцевому абонентському пристрої та взаємодіє з робочою платформою за моделлю PaaS і саме це надає йому такі переваги: легкість в реалізації, швидкість в тестуванні та впровадженні, що, в свою чергу, дозволяє використовувати дане рішення при наданні послуг IPTV/OTT.

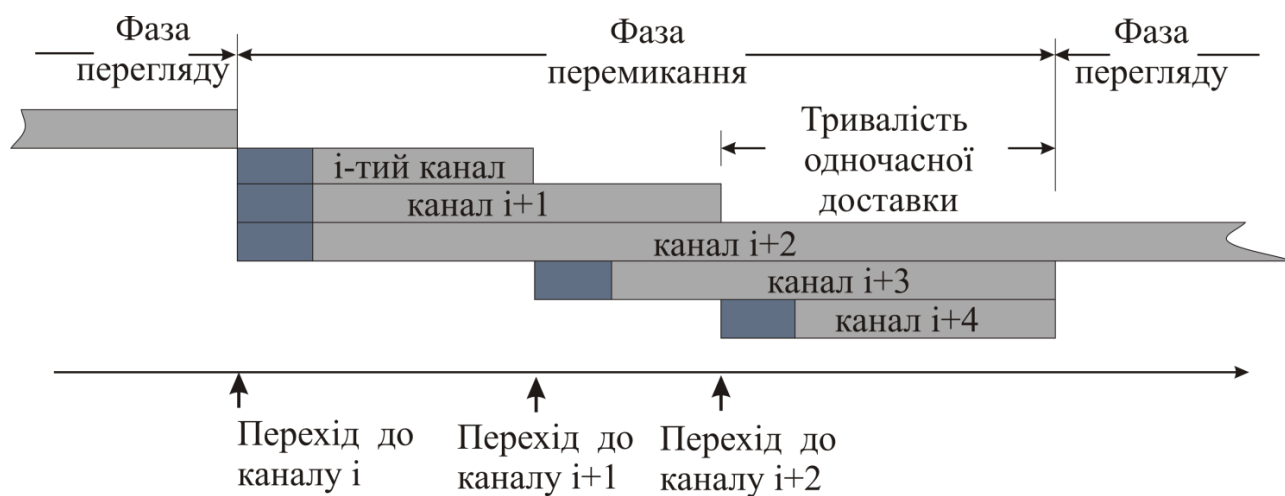


Рис. 6.18. Робота алгоритму швидкого перемикавання каналів.

Негативні сторони впровадження даного алгоритму:

- збільшення навантаження на мережу доставки контенту оператора IPTV/OTT послуг;
- збільшення завантаженості каналів передачі даних;
- складність використання даного методу при суттєво обмеженій смузі пропускання останньої милі, наприклад, в мережах з радіодоступом.

Доставка контенту до абонентських пристроїв (STB, SmartTV, комп'ютер, мобільний телефон та ін.) здійснюється або керованою широкосмуговою IP-мережею оператора/провайдера з використанням технології multicast або unicast (IPTV), або некерованою мережею Інтернет (OTT).

Модель симулює роботу алгоритму пришвидшеного перемикання в умовах реальної IPTV (OTT) системи. Алгоритм симуляції дій користувачів, протягом однієї секунди, представлений на рис 6.19.

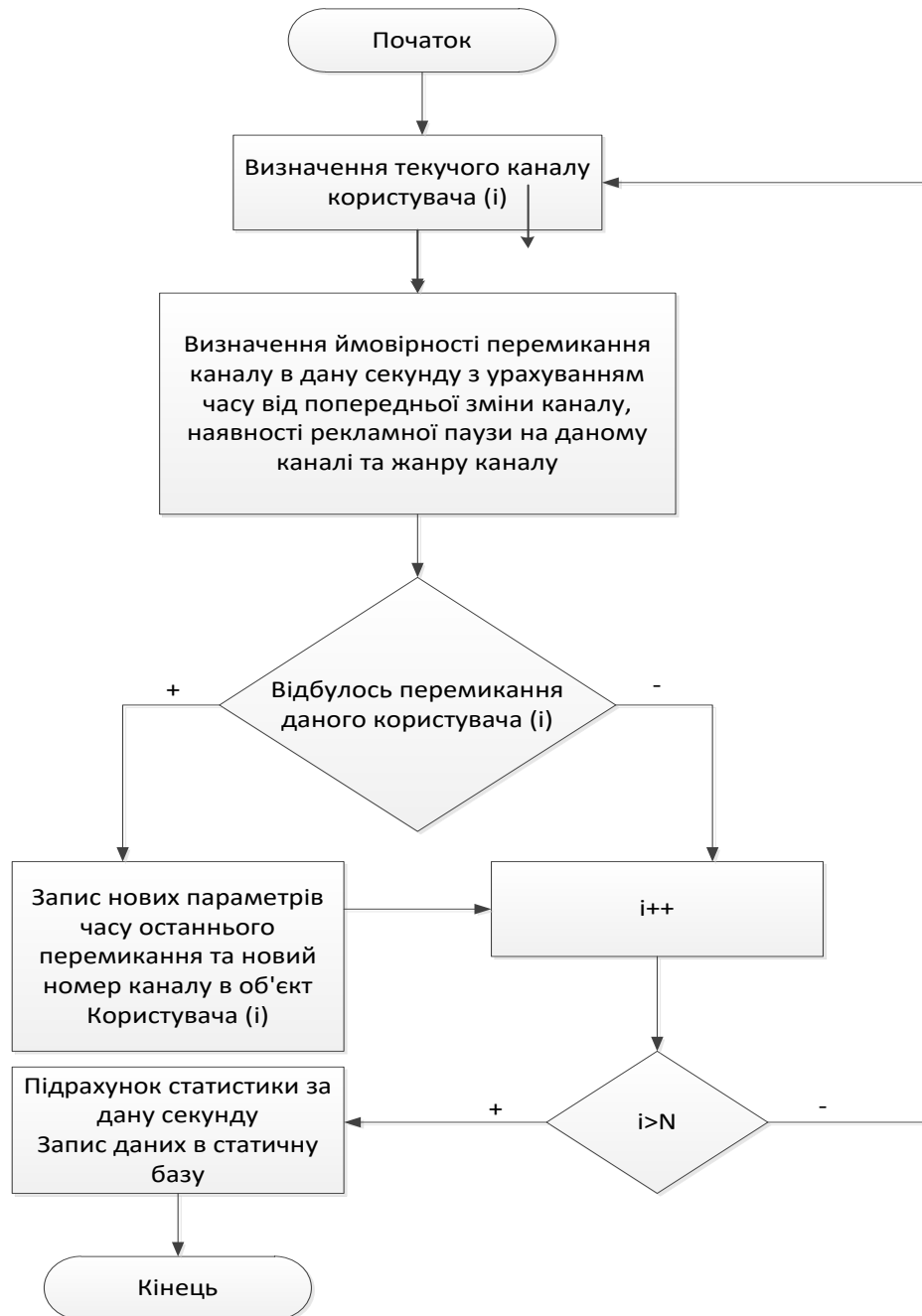


Рис. 6.19. Алгоритм моделювання діяльності N користувачів протягом заданої секунди.

Процес симуляції роботи сервісу поділяється на два етапи: підготовка стартових показників та посекундна симуляція роботи сервісу. Підготовка до початку симуляції включає в себе:

- генерування списку каналів (попередні дані: кількість каналів);
- генерування кожного каналу (попередні дані: жанр каналу);
- зв'язування каналів із списком;
- генерування користувачів та зв'язування користувачів із каналами відповідно до популярності (по закону Ципфа згідно досліджень [193, 194]).

Процес симуляції полягає в щосекундному моделюванні поведінки користувача в системі. На користувача, при цьому, впливають рекламні паузи та діючі рейтинги каналів. Ймовірність перемикання каналу, під час першої хвилини рекламної паузи, близька до 0,5. Різні жанри каналів мають різний середній час, протягом якого користувачі на них затримуються під час серфінгу. Відношення часу перегляду різних жанрів глядачами представлені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Середній час перегляду різних жанрів глядачами

	Новини	Дитячий	Музика/спорт	Змішані/без жанрів	Фільми/документ
<50%	5 сек.	6 сек.	7 сек.	9 сек.	11 сек.
<90%	3 хв.	10 хв.	3 хв.	7 хв.	6хв.
<95%	9 хв.	21 хв.	8 хв.	18 хв.	17 хв.

В результаті симуляції, використовуючи різні параметри, отримаємо інформацію про роботу сервісу, максимально наближену до реальності. Даний процес симуляції дасть змогу визначити параметри завантаження головної станції постачальника послуги, в залежності від кількості користувачів, кількості каналів та параметрів алгоритму швидкого перемикання каналів.

6.1.3. Аналіз результатів моделювання процесу вибору контенту

Користувач, під час «серфінгу», може відчувати повну, часткову або відносно нульову затримку. Під час першого перемикання, час очікування картинки на екрані буде повним часом перемикання F . Під час другого перемикання користувач може відчувати повну, часткову, або нульову затримку, в залежності від моменту часу, в який відбувається перемикання.

Позначимо час зміни каналу як ω , тоді ймовірність буде виражена, як:

$$P(\omega = F) = \int_{\tau}^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda \tau}, \quad (6.1)$$

де λ параметр Пуассонівського процесу, пов'язаний з середнім інтервалом між двома послідовними змінами каналу.

Якщо розглядати ω , як неперервну випадкову величину, при $\omega = F$ функція щільності матиме вигляд:

$$f(\omega)|_{\omega=F} = e^{-\lambda \tau} \delta(\omega - F). \quad (6.2)$$

Функція щільності, для випадку $0 < \omega < F$, матиме вигляд:

$$f(\omega)|_{0 < \omega < F} = \lambda e^{-\lambda(F-\omega)}. \quad (6.3)$$

Комбінуючи формули (6.2) та (6.3), отримуємо очікування другої зміни каналу:

$$E(\omega)|_{2nd} = \int_0^F \omega f(\omega) d\omega = \frac{F\lambda e^{-\lambda \tau} + e^{-F\lambda} + F\lambda - 1}{\lambda}. \quad (6.4)$$

Для третьої та наступних змін каналів функція щільності розподілу ймовірності визначатиметься, як:

$$f_{\alpha}(\omega)|_{0 < \omega < F} = e^{-\lambda \tau} \lambda e^{-\lambda(F-\omega)}. \quad (6.5)$$

При $t_1 + t_2 < F$, функція щільності ймовірності визначається за формулою:

$$f_b(\omega)|_{0 < \omega < F} = \lambda^2 (F - \omega) e^{-\lambda(F-\omega)}. \quad (6.6)$$

Комбінуючи формули, отримуємо очікуваний час перемикання каналу на третій і наступній його змінах.

$$E(\omega)|_{3rd} = \int_0^F \omega (f_{\alpha}(\omega) + f_b(\omega) + f(\omega)|_{\omega=F}) d\omega =$$

$$= \frac{e^{-\lambda(F+\tau)} + e^{-\lambda\tau}(2F\lambda - 1)}{\lambda} + \frac{e^{-\lambda F}(F\lambda + 2) + (F\lambda - 2)}{\lambda}. \quad (6.7)$$

Кожен процес «серфінгу» глядача почнеться з його першої зміни ймовірності P_0 , а потім глядач може перейти на наступний канал з ймовірністю P_1 , третій - з P_2 і т. д. Таким чином, очікувану затримку при трьох каналах, що додатково транслюються, можна записати так:

$$P_h F + P_h^2 E(x)|_{2nd} + \left(\sum_{i=3}^{\infty} P_h^i\right) E(x)|_{3rd}. \quad (6.8)$$

Ця сума, фактично, видає очікування загальної затримки одного «серфінг» процесу. З вище зазначеної моделі, визначимо середню кількість каналів, що змінюється під час одного процесу 'S':

$$S = \frac{P_0}{1 - P_0}. \quad (6.9)$$

Відповідно P_0 :

$$P_0 = \frac{S}{S+1}. \quad (6.10)$$

Підставляємо це співвідношення в (6.8), та отримуємо загальну середню затримку для кожної зміни каналу в процесі «серфінгу» по трьох каналах:

$$E(x)|_{3-ch} = \frac{F + (E(x)|_{2nd} + F)S + E(x)|_{3rd}S^2}{(1+S)^2}. \quad (6.11)$$

Для системи з двома каналами, вираз відповідно буде спрощений до:

$$E(x)|_{2-ch} = \frac{F + E(x)|_{2nd}S}{1+S}. \quad (6.12)$$

Таким чином, (6.11) і (6.12) показують, як впливають на загальний час зміни каналу виконання перемикачів, з урахуванням параметру S , що залежить від P_0 .

Під час другої зміни каналу, в процесі «серфінгу», користувач не відчуває жодної затримки, якщо він перемикається в межах проміжку доставки додаткових каналів τ , але не швидше за час підімкнення каналів F . Дану ймовірність можна записати виразом:

$$P(\text{no delay})|_{2nd} = \int_F^{\tau} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda F} - e^{-\lambda \tau}. \quad (6.13)$$

Вираз ймовірності для третьої та наступних змін каналів матиме вигляд:

$$P(\text{no delay})|_{3rd} = 1 - P(\omega = F) - \int_0^F [f_a(\omega) + f_b(\omega)] d\omega =$$

$$= e^{-\lambda(F+\tau)} [1 - 2e^{F\lambda} + e^{\lambda\tau}(1 + F\lambda)]. \quad (6.14)$$

Проаналізувавши дані, наведені вище, можна зробити висновок, що середній час перемикання каналів залежить від тривалості трансляцій додаткових каналів τ . Цю залежність можна записати, як:

$$E'(\tau)|_{3rd} = (1 - e^{-F\lambda} - 2F\lambda)e^{-\lambda\tau}. \quad (6.15)$$

Рекомендовано вираховувати значення τ за формулою:

$$\tau = \frac{5}{\lambda} \quad (6.16)$$

Залежність середнього часу перемикання від тривалості трансляцій додаткових каналів для різних перемикань вираховується згідно формул:

$$E(\tau) = \begin{cases} F & : 1 \text{ перемикання;} \\ \frac{e^{-F\lambda} + F\lambda - 1}{\lambda} & : 2 \text{ перемикання;} \\ \frac{e^{-\lambda F}(F\lambda + 2) + (F\lambda - 2)}{\lambda} & : 3 \text{ перемикання.} \end{cases} \quad (6.17)$$

Результати, отримані при звичайному режимі перемикання, представлені на рисунку 6.20.

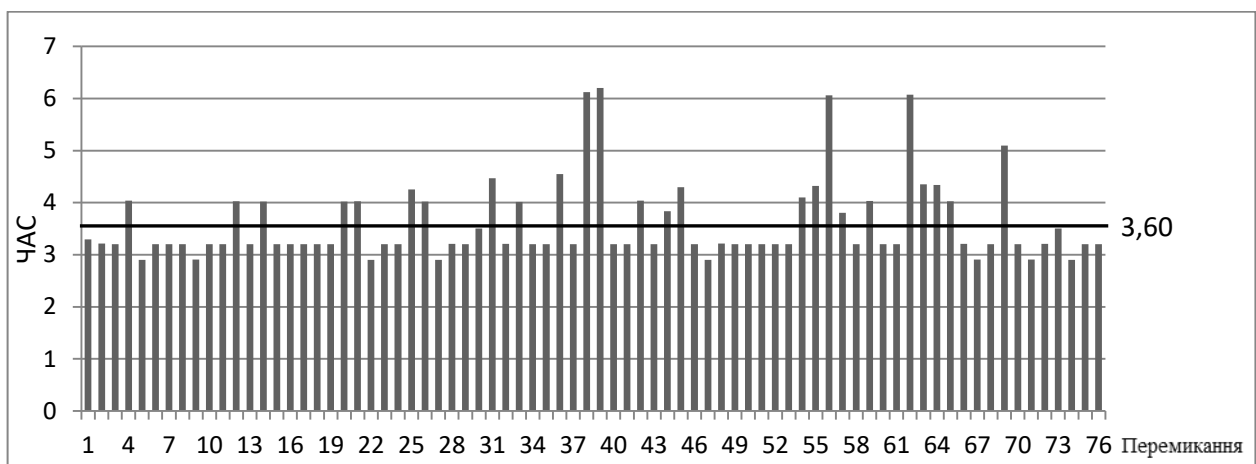


Рис. 6.20 Час перемикання каналів під час сесії перегляду телебачення без застосування алгоритмів швидкого перемикання.

Як видно з рис. 6.20, середній час перемикання становить 3,6с, що є незадовільним показником. На даний час, з такими показниками якості дуже важко конкурувати на ринку надання послуг.

Результати, отримані під час роботи із запропонованим алгоритмом, представлені на рис 6.21. Середній час перемикання становить 1,22 с, що є прийнятним для даного виду послуг.

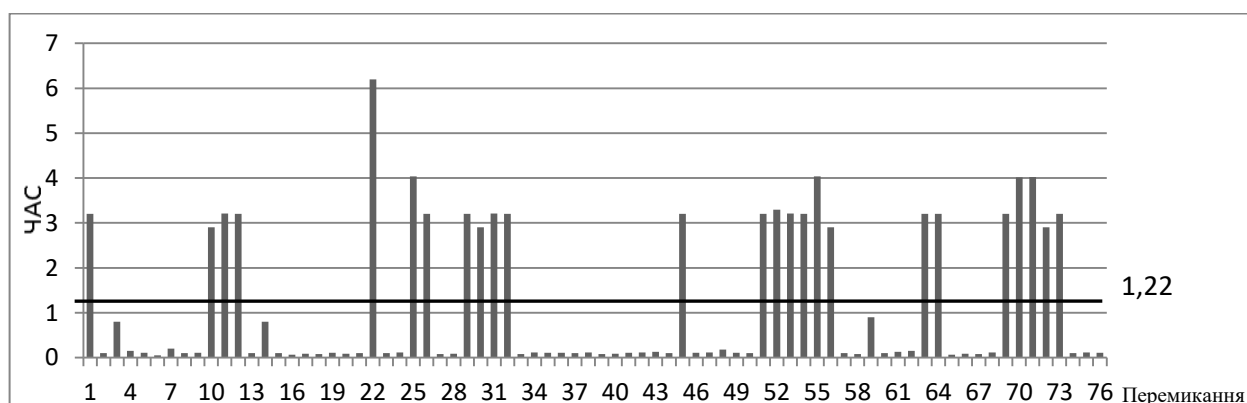


Рис 6.21. Час перемикання каналів при використанні алгоритму швидкого перемикання(3 додаткових канали, 20 секунд трансляції)

Порівнюючи результати на рисунках 6.20 та 6.21, можна зробити висновок, що алгоритм дає можливість суттєво зменшити час затримки при послідовному перемиканні каналів. Проте варто зауважити, що даний алгоритм не покращує час перемикання при випадковому перемиканні каналів, або при великих затримках між перемиканнями каналів.

6.5. Узагальнена методологія синтезу мереж доставки контенту

6.5.1. Синтез мереж доставки контенту на основі сегментів ГП

У попередніх розділах дисертаційної роботи запропоновано та докладно розглянуто елементи методології синтезу мереж доставки контенту (рис. 6.22). На основі проведених досліджень було сформовано низку методів, які умовно можна поділити на: методи ефективного використання мережевих ресурсів, методи управління контентом та забезпечення якості послуг, а також методи балансування навантаження в інфокомунікаційних мережах. На основі цих елементів, а також допоміжних методів та підходів, які виходять за рамки проблематики досліджень цієї дисертаційної роботи, було запропоновано методологію синтезу мереж доставки контенту (рис. 6.23).

Концепція	Глобальної інформаційної інфраструктури, на основі якої будуються CDN мережі доставки контенту, що забезпечують ефективніше використання мережевих ресурсів, підвищують продуктивність та якість надання послуг		
Принципи	Конвергенція мереж	Програмно керовані мережі та віртуалізація мережевих функцій (Впровадження SDN та NFV)	Концептуальна агрегована модель NaaS
Моделі	Моделювання та дослідження ймовірно-часових характеристик трафіку	Моделювання якісних та часових параметрів мультисервісного трафіку	Моделювання та аналіз самоподібного мережевого трафіку
Методи ефективного використання мережевих ресурсів	Метод управління використанням спектру в когнітивній безпроводній мережі доступу	Метод оцінювання ефективності вибору р/ч каналу	Метод управління використанням спектральних ресурсів з використанням SDN та NFV
Методи управління контентом та забезпечення якості послуг	Методи обслуговування черг при передаванні контенту в безпроводних мережах	Методи пріоритетного управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах	Методи забезпечення QoS при передаванні інформації в CDN мережах
Методи балансування навантаження	Метод обробки запитів на отримання контенту на основі DNS	Метод контролю метрик та оцінки станів кешуючих серверів	Система контролю роботи та функціонування сервісів
Методологія синтезу CDN мереж			

Рис. 6.22. Елементи методології синтезу мереж доставки контенту.

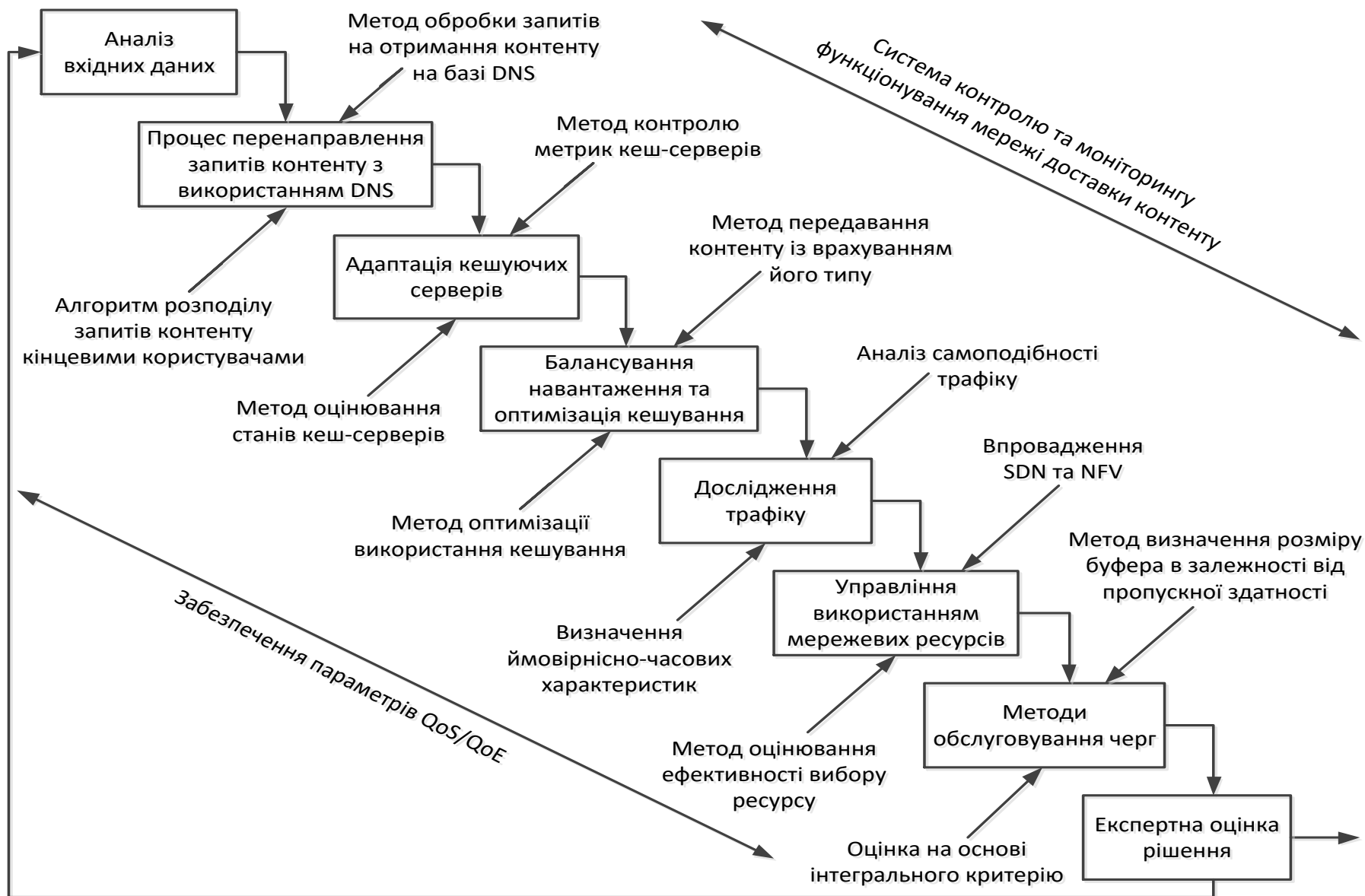


Рис. 6.23. Методологія синтезу мереж доставки контенту на основі сегментів ГП.

6.5.2. Результати дослідження ефективності застосування методології синтезу мереж доставки контенту.

Дослідження ефективності застосування запропонованих методів управління контентом та методології синтезу мереж доставки контенту здійснювались під час впровадження мережі CDN на основі мережевої інфраструктури компанії OVH Telecom. Тополічна структура та пропускні здатності каналів компанії (європейський та північно-американський сегменти, на основі яких будувалась мережа доставки контенту) наведено на рис. 6.24.

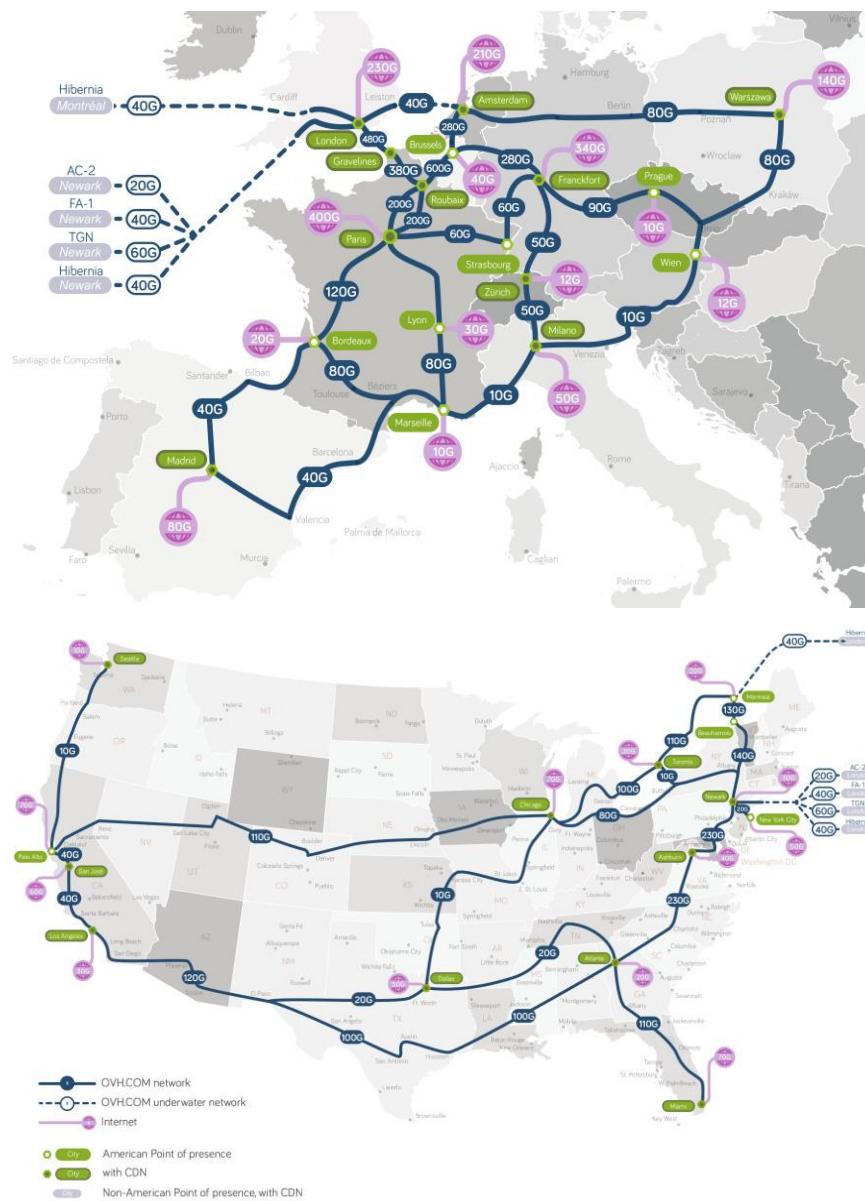


Рис. 6.24. Європейський та північно-американський сегменти мережі компанії OVH Telecom [195].

Для підвищення продуктивності роботи, серед іншого, пропонується використання методів балансування навантаження та оптимізованого кешування контенту. Структурну схему роботи мережі представлено на рис.6.25.

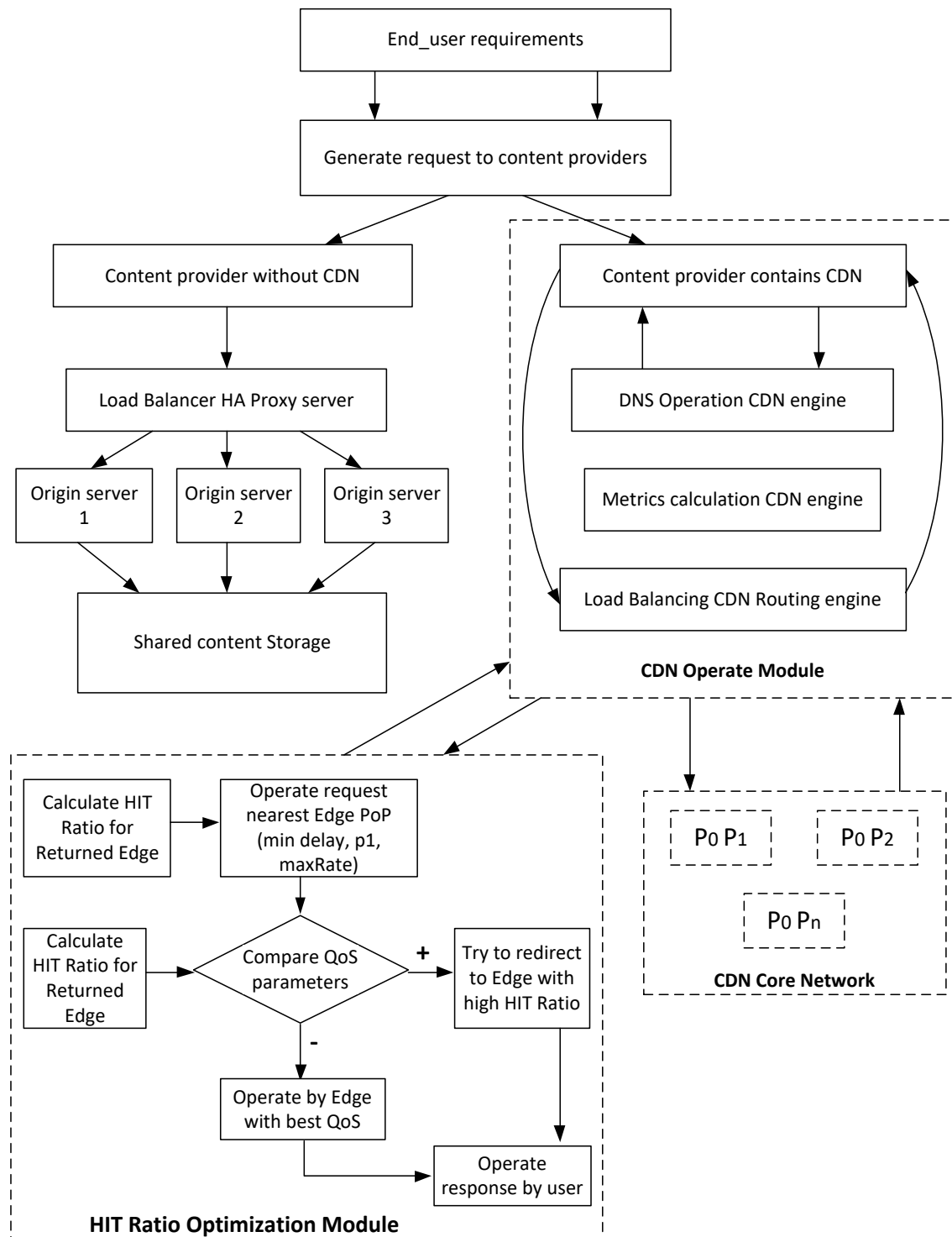


Рис. 6.25. Структурна схема роботи CDN мережі із використанням методу оптимізованого кешування.

Робота схеми передбачає можливість роботи без використання мережі доставки контенту. В такому варіанті реалізації, всі запити користувачів будуть напряму надсилатись до сервера походження. На стороні сервера походження рекомендовано застосовувати технології балансування навантаження та резервування контенту HA Proxy Load Balancer. Така система являє собою високонадійну систему, яка підвищить якість надання послуг користувачам. Можливий також варіант поєднання технології CDN та технології HA Proxy Load Balancer. В такому варіанті рекомендовано статичний контент передавати через CDN мережу, а динамічний – через HA Proxy.

CDN Operate Module – виконує завдання перенаправлення запитів користувачів на кешуючі сервери з найкращими параметрами якості обслуговування по відношенню до локації користувача. Цей модуль також взаємодіє із CDN Core Network модулем з одної сторони та Hit Ratio Optimization з іншої.

CDN Core – це, власне, структура розміщення локацій в різних точках світу, в яких знаходяться керуючі сервери, що обслуговують та зберігають контент, який запитують кінцеві користувачі. Від їхньої кількості залежить рівень доступності сервісу в конкретному регіоні.

Hit Ratio Optimization Module – основною функцією даного модуля є підвищення Hit Ratio і, тим самим, забезпечення оптимального використання механізму кешування даних. Коли приходить перший запит від користувача за контентом в конкретній локації, він буде перенаправлений на кешуючий сервер із оптимальними параметрами QoS (мінімальна затримка, максимальна надійність сервера). Далі, механізм перевірить, чи є вже цей контент у кеш-пам'яті сусідніх кешуючих серверів. Якщо є, то запит буде передано для обслуговування на відповідний сервер, з метою економії трафіку від сервера походження та збільшення Hit Ratio. Після передачі обслуговування також буде проводитись визначення параметрів QoS та їх відповідність для даного сервісу. Таким чином, даний модуль зможе забезпечити ефективне використання

механізму кешування, максимізувати Hit Ratio та контролювати рівень якості послуг для кінцевого користувача.

Дослідження ефективності впровадження запропонованої методології побудови мереж доставки контенту з використанням запропонованих методів управління контентом проводились протягом одного місяця. Результати подані на рисунках 6.26 – 6.33. Для прикладу, на рис. 6.26 бачимо безпосередні результати застосування сукупності запропонованих методів, зокрема оптимізованого кешування у CDN мережі (у порівнянні із ситуацією без їх використання, див. рис. 6.27).

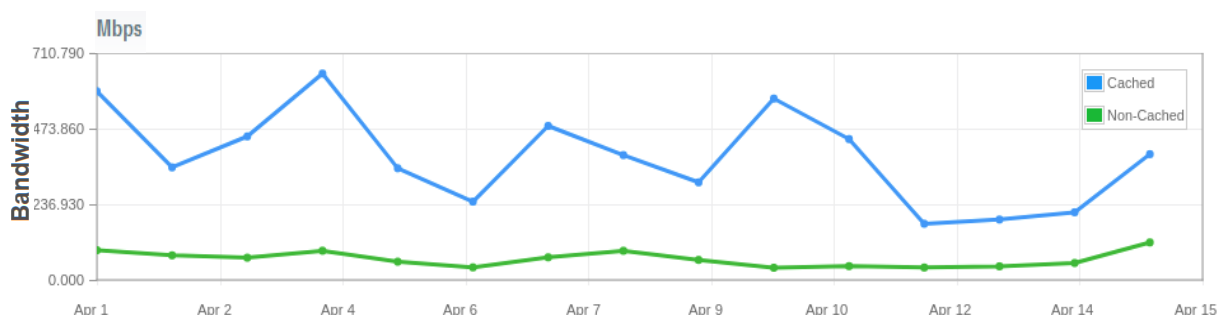


Рис. 6.26. Інтенсивність трафіку від сервера походження та кешуючих серверів із застосуванням запропонованих методів управління контентом.

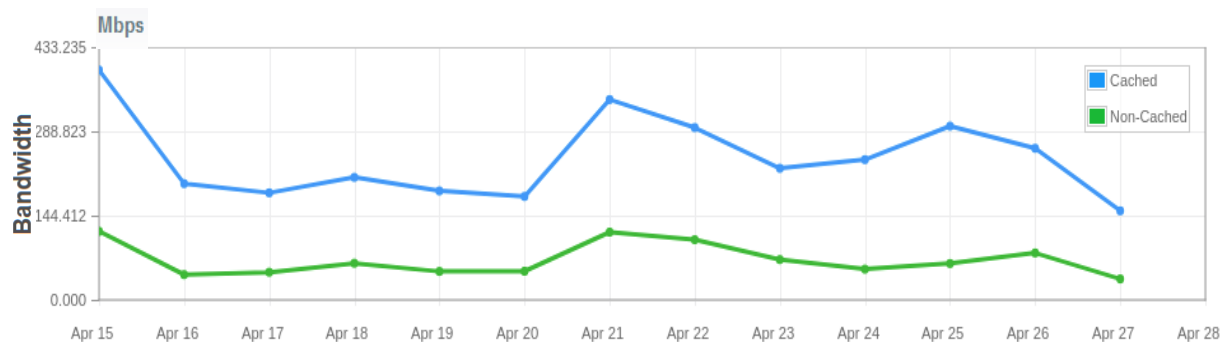


Рис. 6.27. Інтенсивність трафіку від сервера походження та кешуючих серверів без застосування запропонованих методів управління контентом.

Як видно із рис. 6.26 – 6.27, трафік від сервера походження залишається незмінним, однак ефективність кешування суттєво відрізняється. На рис. 6.28 – 6.29 представлено інтенсивність трафіку від сервера походження протягом інтервалу проведення експерименту. Як видно з рис. 6.26 – 6.29, за рахунок впровадження методів кешування та балансування навантаження, максимальне

значення інтенсивності трафіку від сервера походження становить 140 Мбіт/с за весь інтервал часу спостереження, а її середнє значення є практично незмінним на всьому інтервалі, в той час як обсяг трафіку, який віддається кінцевим користувачам зростає в 2-2.5 рази.



Рис. 6.28. Інтенсивність трафіку від сервера походження із застосуванням запропонованих методів управління контентом.



Рис. 6.29. Інтенсивність трафіку від сервера походження без застосування запропонованих методів управління контентом.

Для оцінки роботи запропонованого методу, також, було проаналізовано завантаженість сервера походження. За оцінку було взято час відповіді сервера на запити кешуючих серверів, та кількість TCP з'єднань від серверів кешування. Результати представлено на рисунках 6.30 - 6.33.

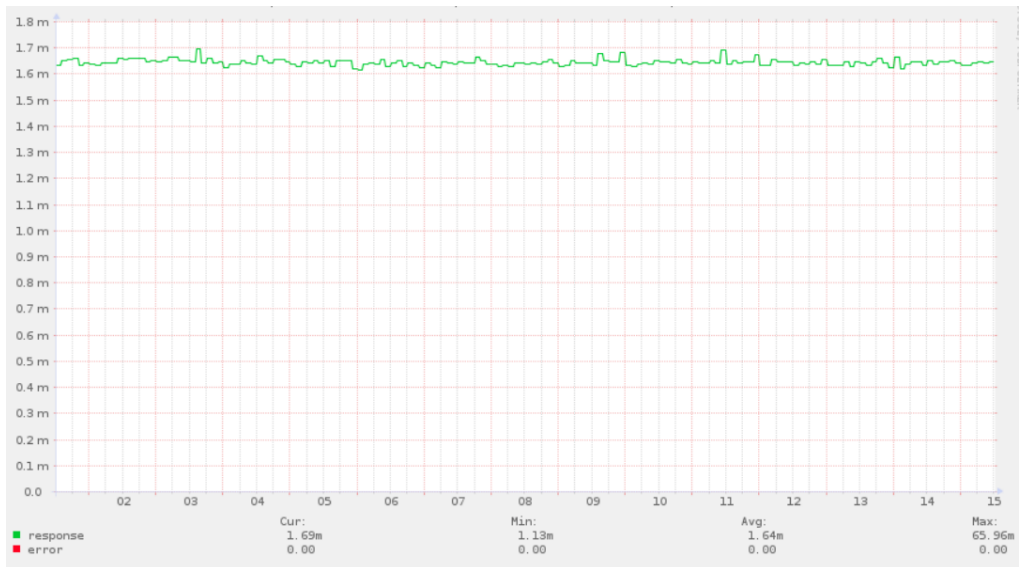


Рис. 6.30. Час відповіді сервера походження із застосуванням запропонованих методів управління контентом.

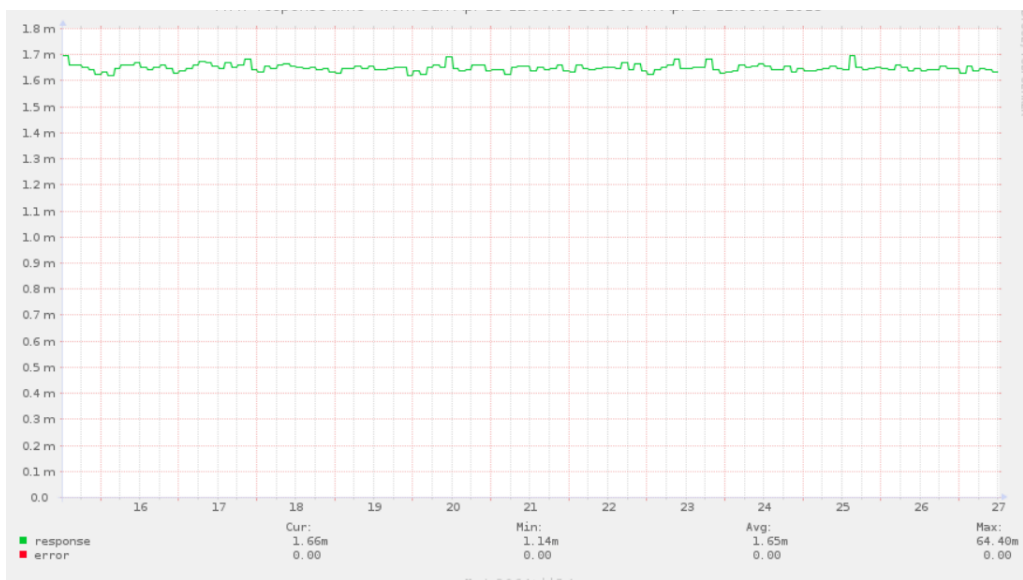


Рис. 6.31. Час відповіді сервера походження без застосування запропонованих методів управління контентом.

Як видно з графіків (рис.6.30, 6.31) за весь період експерименту, час відповіді суттєво не змінювався. Кількість TCP з'єднань до сервера походження зображено на рис. 6.32-6.33.



Рис. 6.32. Кількість з'єднань до сервера походження, до моменту впровадження запропонованих методів управління контентом.



Рис. 6.33. Кількість з'єднань до сервера походження після впровадження запропонованих методів управління контентом.

Як видно із обох графіків, число з'єднань також суттєво не змінюється на всьому інтервалі проведення експерименту.

Загалом, можна стверджувати, що використання запропонованих методів управління контентом дає змогу більш, ніж в два рази покращити ефективність використання керуючих серверів, при цьому, не збільшуючи навантаження на сервер походження, що дає можливість збільшити кількість користувачів при наявних мережевих ресурсах. Крім цього, за рахунок зниження затримки та

втрати даних, можна отримати підвищення рівня якості надання послуг та забезпечувати значення параметрів QoS та QoE в допустимих межах.

6.6. Висновки до 6-го розділу.

1. Запропоновано багаторівневу модель побудови мереж доставки контенту на основі сегменту глобальної мережевої інфраструктури, наведено структурно-функціональні схеми роботи її складових компонентів. Описано процеси розподілу запитів контенту кінцевими користувачами та їх перенаправлення на основі DNS серверів, системи контролю метрик та оцінки станів керуючих серверів. Для забезпечення контролю та працездатності серверів і сервісів, пропонується використовувати систему моніторингу роботи мережевої системи.

2. Проведено імітаційне моделювання роботи кешуючих серверів мережі доставки контенту із врахуванням багатьох параметрів, а саме: розмір ресурсу, що передається в CDN-мережу, число звернень до конкретного ресурсу, інтервал часу між зверненнями, розмір кешуючої пам'яті та ін. Отримані результати показали, що при малих значеннях розмірів кеш-пам'яті на кешуючих серверах, практично всі запити будуть перенаправлятися на оригінальний сервер контенту і, відповідно, ефективність використання мережі CDN є низькою. Зі збільшенням розміру кешу, кількість звернень до оригінального сервера зменшується. При подальшому зростанні розміру кеш-пам'яті може виникнути ситуація, коли весь контент буде збережений в пам'яті кожного керуючого сервера, що, в свою чергу, зменшить час відгуку на запит контенту кінцевим користувачем. Проте, закешувати контент на 100% неможливо тому, що частина контенту постійно оновлюється. Це, так званий, динамічний контент, який завжди потрібно запитувати від оригінального сервера. Враховуючи це, а також те, що розмір пам'яті впливає на загальну вартість послуг мережі доставки контенту, важливим є вибір оптимального розміру кеш-пам'яті.

3. Досліджено вплив самоподібності мультисервісного трафіку на продуктивність роботи мережі передавання даних. Дана мережа є достатньо ефективною для передачі одноадресних та багатоадресних потоків, що здійснюють передачу даних реального часу. Весь трафік, присутній в даній мережі, володіє властивістю самоподібності, про що свідчить параметр Херста. Розрахунки параметру Херста, для досліджуваного трафіку, проводились в середовищі Matlab. Проаналізувавши отримані результати, можна стверджувати, що значення параметра Херста $H=0,662$ та $H=0,674$ вважаються достатніми для визнання процесу самоподібним. Властивість масоподібності дає можливість стверджувати, що такі типи трафіку (реального часу) не можна описати звичайним Пуассонівським розподілом, оскільки його статистичні характеристики проявляють властивість масштабування, а сам процес зберігає схильність до сплесків. Крім того, ця властивість також негативно впливає на продуктивність мережі, збільшуючи величину затримки. Величина затримки зростатиме із збільшенням швидкості передавання даних. Наприклад, передавання відео високої якості вимагає значних швидкостей передавання. Величина затримки, в такому випадку, буде досить великою, що є неприпустимим для даних реального часу. Одним із способів вирішення цієї проблеми є використання високошвидкісних каналів передачі даних.

4. Представлено метод покращення параметрів QoE, проаналізована робота запропонованого алгоритму покращення. Запропоновані та проаналізовані методи дослідження впливу даного алгоритму на якість послуги, яка надається кінцевому користувачу, та на стан мережі постачальника даної послуги. Отримані результати дозволяють стверджувати, що запропонований метод дає можливість приблизно вдвічі зменшити час затримки при послідовному перемиканні каналів. Проте, варто зауважити, що він не покращує час перемикання при випадковому перемиканні каналів, або при великих затримках між перемиканнями каналів.

5. На основі проведених досліджень і розроблених методів ефективного використання мережевих ресурсів, управління контентом та забезпечення якості послуг, балансування навантаження в інфокомунікаційних мережах було запропоновано методологію синтезу мереж доставки контенту. Дослідження ефективності застосування запропонованих методів управління контентом та методології синтезу мереж доставки контенту здійснювались під час впровадження мережі доставки контенту, на основі мережевої інфраструктури компанії OVH Telecom. Результати експериментальних досліджень роботи CDN мережі підтверджують позитивний результат використання запропонованих методів.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано наукову проблему розроблення методологічного забезпечення управління передаванням інформації в розподілених інфокомунікаційних системах та мережах доставки контенту з метою ефективного використання мережевої інфраструктури, підвищення системної продуктивності і якості надання послуг за рахунок динамічного балансування навантаження.

За результатами розв'язання поставленої проблеми можна зробити такі висновки:

1. На основі аналізу опублікованих праць та проведених теоретичних досліджень, з урахуванням сучасного стану галузі управління контентом та проблем розподілу ресурсів інформаційних мереж, визначено необхідність створення високоефективного інфокомунікаційного середовища на основі існуючих та перспективних інформаційних та телекомунікаційних мереж, для надання користувачам високоякісних послуг, в умовах постійного зростання обсягів різнорідних потоків інформації та конвергенції мереж. Розвиток Національної інформаційної інфраструктури визначено одним із державних пріоритетів для її ефективної інтеграції у світовий інформаційний простір.

2. Проведено аналіз потоків трафіку мультисервісної мережі та запропоновано методику ідентифікації трафіку, яка дозволяє отримати модель його профілю, що в свою чергу, дало змогу адекватно підбирати алгоритми керування передаванням контенту в інфокомунікаційних мережах. На основі розробленої імітаційної моделі, одержано співвідношення для розрахунку оптимальних параметрів якості обслуговування мультисервісного трафіку, що передається у інформаційних системах, які дають можливість оцінювання та вибору параметрів мережевого обладнання для обслуговування різних типів інформаційних потоків користувацького навантаження. При цьому, підвищуються показники якості сервісу на 8% та відбувається підтримка вказаних значень упродовж усього періоду експлуатації мережевої системи.

3. Проведено математичне моделювання з використанням теорії масового обслуговування для визначення параметрів якості обслуговування. Підтверджено, що використання довільної методики обрахунку параметрів

якості сервісу є недопустимим для мультисервісного трафіку, який володіє властивістю самоподібності. Запропоновано використання теоретичної моделі системи масового обслуговування виду G/G/1, як базової, для розрахунку параметрів мультисервісного трафіку.

4. Запропонована математична модель для оцінювання ефективності вибору радіочастотного каналу в когнітивній безпроводній мережі доступу, яка враховує ймовірність зайняття визначених ділянок радіочастотного спектру на основі результатів його сканування, що дало змогу підвищити ефективність використання радіочастотного спектру та забезпечити зростання сумарної пропускної здатності когнітивної радіомережі в середньому на 10%, при максимальній завантаженості абонентами первинної мережі, а також покращити параметри якості надання мультисервісних послуг.

5. Удосконалено імітаційну модель системи управління когнітивною радіомережею, яка використовує методи балансування вхідного навантаження, що дало змогу зменшити тривалість прийняття рішення про зміну радіоканалу та моніторинг його параметрів, а також дозволяє покращити швидкодію системи керування когнітивною радіомережею, за рахунок зменшення часу прийняття рішення про зміну радіоканалу до 25%, при низькому навантаженні вторинних користувачів, а при високому навантаженні, алгоритм переключення каналів, на основі сканування параметрів каналу, зменшує тривалість перерозподілу каналів більше, ніж на 50%.

6. Запропоновано новий підхід до управління доступом до середовища передачі, на основі комплексного моніторингу мережі та програмного планування, для агрегації декількох смуг на різних частотах у ліцензійному та неліцензійному діапазонах в один канал передавання у мережах 4G/5G. Проведене моделювання, для оцінювання ефективності запропонованого підходу у випадку двох конкуруючих операторів, показало, що обидва оператори можуть досягти високої ефективності агрегації носіїв під час використання запропонованого підходу та збільшити середню швидкість передачі даних для користувачів до 40%.

7. Вперше запропоновано архітектуру мережі доставки контенту для підвищення ефективності маршрутизації та вибору сервера-обробника запитів

користувачів на основі цільової функції, яка враховує, в якості основних критеріїв, час затримки, навантаження на сервер і ймовірність втрати пакетів, що, у свою чергу, дало змогу зменшити затримку та джитер, які є критичними для послуг реального часу, підтримуючи задану якість сервісу в CDN-мережі.

8. Запропоновано інтегральний критерій для оцінювання ефективності обслуговування черг та управління розподілом навантаження в безпроводних мережах, що враховує значення затримки, джитера та ймовірності втрати пакетів і дає змогу оцінити результати застосування алгоритмів управління мережевими ресурсами та забезпечення належної якості надання послуг.

9. Вперше запропоновано модель процесу переспрямування замовленого потокового контенту, яка, на відміну від відомих, враховує QoE оцінку користувачів при отриманні послуг, що дало змогу обрати найбільш ефективну PaaS реалізацію методу побудови CDN мережевої системи та зменшити в 1.5-2 рази час перемикання між відеопотоками.

10. Розроблено методологію побудови та багаторівневу структурну модель мережі доставки контенту, на основі сегменту існуючої глобальної мережевої інфраструктури, яка забезпечує ефективне використання мережевих ресурсів, за рахунок динамічного балансування трафіку та уникнення перевантажень, що дало змогу підвищити системну продуктивність та загальну якість надання послуг.

11. На основі розроблених методів ефективного використання мережевих ресурсів, управління контентом та забезпечення якості послуг, балансування навантаження в інфокомунікаційних мережах запропоновано методологію синтезу мереж доставки контенту. Під час впровадження мережі доставки контенту, на основі мережевої інфраструктури компанії OVH Telecom, за рахунок використання запропонованих методів управління контентом та методології синтезу, досягнуто зменшення в 2-2.5 рази завантаженості основного сервера, в 1.5-2 рази зниження затримки, яку отримує кінцевий користувач при одержанні контенту, а також зниження ймовірності втрати даних на шляху передавання в середньому на 15%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Inauguration of the First World Telecommunication Development Conference (WTDC-94), Buenos Aires, 21 March, 1994// International Telecommunication Union. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/4.144.57.en.104.pdf>
2. Рекомендації ITU-T. Y.100:1998 General overview of the Global Information Infrastructure standards development.[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.100-199806-I/en>
3. Валов С. Г., Гольшко А. В. Инфокоммуникационные сети будущего: общие принципы // Вестник связи.– 2003.– № 2.– С. 52–61.
4. Валов, С. Г. Инфокоммуникационные сети будущего: «Контентология» услуг / С. Г. Валов, А. В. Гольшко. Вестник связи. – 2003. – № 3.– С. - С.53-61.
5. The State of Broadband: Broadband catalyzing sustainable development September 2017 // International Telecommunication Union. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.itu.int/dms_pub/itu-s/opb/pol/S-POL-BROADBAND.18-2017-PDF-E.pdf
6. Нечипорук О.Л. Властивості та класифікація інфокомунікаційних послуг // Зв'язок. – 2004. – №1. – С. 25-26.
7. Report of the Geneva phase of the World Summit on the Information Society, Geneva-PalExpo, 10-12 December 2003// International Telecommunication Union. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.itu.int/dms_pub/itu-s/md/03/wsis/doc/S03-WSIS-DOC-0009!R1!PDF-E.pdf
8. The Tunis Agenda for the Information Society of the World Summit on the Information Society, Tunis, Kram Palexpo, 16-18 November 2005// International Telecommunication Union. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.itu.int/net/wsis/docs2/tunis/off/6rev1.html>
9. Закон України Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки від 09.01.2007 № 537-V // Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2007. – № 12. – Ст.102.

10. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.06.2009 р. № 680-р «Про схвалення Концепції розвитку національної інноваційної системи» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/680-2009-%D1%80>
11. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура й основні функції. – Том 1 : [Електронний ресурс]. / [В. В. Поповський, О. В. Лемешко, В. К. Ковальчук та ін.] - Режим доступу : <http://www.znanius.com/3554.html?&L=>
12. Нестеренко О. В. Проблеми формування національної інформаційної інфраструктури та забезпечення її безпеки / О. В. Нестеренко // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2010. – Т. 12, № 2.– 216-226.
13. Валов С.Г., Гольшко А.В. Инфокоммуникационные сети будущего: архитектура сети. // Вестник Связи, 2003, № 07.
14. Тимченко О.В. Співвідношення між якістю послуг мереж передачі даних і рівнями OSI/ О.В. Тимченко, М.І. Кирик, Б.М. Верхола, Аскар Самі. // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.49. – К.: 2008. – С. 150-157.
15. Валов С.Г. Сетевая модель инфокоммуникаций // С. Г. Валов, А. В. Гольшко. Вестник связи. - 2004. - № 10. – С. - С.27-36.
16. Глобальна інформаційна інфраструктура // Вісник ІАЦ, ДКЗУ. – 1997. – № 1. – 89с.
17. Рекомендації Міжнародної академії зв'язку // International Telecommunication Academy, 2003. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.itu.int/dms_pub/itu-s/md/03/wsis/c/S03-WSIS-C-0003!!PDF-E.pdf
18. Кирик М. І. Статистична модель самоподібного трафіку мультисервісної мережі / М.І. Кирик, Н. М. Плесканка // VI Международный научно-технический симпозиум «Новые технологии в телекоммуникациях» ГУИКТ-КАРПАТЫ '2013. 21 - 25 января 2013 г., с. Вышков Долинского района Ивано-Франковской области. – С.89-90.
19. Тимченко О.В., Кирик М.І., Верхола Б.М., Самі Аскар. Дослідження якості багатоадресної передачі мультимедійного трафіку. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.48. – К.: 2008. – С. 161-169.

20. Алексеев И. Универсальная сеть на базе технологии Diff-Serv / И. Алексеев // Сети. – 2000. – № 8. – С. 22–26.
21. Тимченко О.В. Аналіз методів передачі трафіку реального часу в телекомунікаційних мережах / О.В. Тимченко, М.І. Кирик, В.В. Червенець // Матеріали конференції, науково-методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій 2009», 28-30 жовтня 2009 р., Львів, с.51-53.
22. Wu D., Hou Y.T., Zhu W., et al. On end-to-end architecture for transporting MPEG-4 video over the Internet //IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol. 2000. V.10. P.923-941.
23. Kyryk Maryan. The Buffering and Congestion Management in Multiservice Networks / Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25- March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 541-543.
24. Jacobson V. Congestion avoidance and control //Proc. ACM SIGCOMM'88. 1988. P. 314–329.
25. Tirletti T., Huitema C. Videoconferencing on the Internet // IEEE/ACM Trans. Netw. 1996. V.4. P. 340–351.
26. Chiang T., Zhang Y.-Q. A new rate control scheme using quadratic rate distortion model //IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol. 1997. V.7. 246-250.
27. Wu D., Hou Y.T. and Zhang Y.-Q. Transporting real-time video over the Internet: challenges and approaches // IEEE Proc. 2000. V.88. P.1855–1875.
28. Мережі наступного покоління. Архітектура. Протоколи. Інтерфейси. Проект КНД 4582282005.Розробник УНДІЗ, 2005 рік.
29. А.В. Пинчук, И.А. Соколов. Мультисервисные абонентские концентраторы для функциональных возможностей. «Triple8play Services». Вестник связи. № 4. 2005 г

30. 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. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – №680 – С.132-135.
31. Stefan Winkler. Proc. International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), San Diego, CA, July 29–31, 2009.
32. Тимченко О.В. Механізми забезпечення якості передачі відеотрафіку в мультисервісних мережах/ О.В. Тимченко, М.І. Кирик, В.В. Червенець // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр.– К.: ІПМЕ НАН України, 2009. – Вип.54. – с. 247-251.
33. Климаш М.М. Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку / М.М. Климаш, М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка, І.О. Кагало // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано та мікроелектроніки, IV міжнародна науково-практична конференція. – Чернівці, Україна, 23-25 жовтня 2014. – С.98-99.
34. Boros S. Policy-based network management with SNMP// Proceedings of the 6th Eunice Summer School, 2000. pp. 65–172.
35. Verma D., Calo S., Amiri K. Policy based management of content distribution networks// IEEE Network.– 2002. – Vol. 16. No 2.– pp. 34–39.
36. Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний // Наукові записки УНДІЗ. – 2009. – №1(9). – С. 3-26.
37. Кирик М. І. Методи та моделі управління трафіком в розподілених інфокомунікаційних системах : моногр. / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, О. В. Тимченко. – Львів : Укр. акад. друкарства, 2017. – 264 с.
38. Холодкова А.В. Формализация задачи управления качеством телекоммуникационной системы / В.С. Крикун // Радиотехника. – 2008. – № 155. – С. 133-136.

39. Столлингс В. Современные компьютерные сети. СПб.: Питер, 2003 – С. 352-402.
40. Vern Paxson and Sally Floyd, Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 3 No. 3. – Pp. 226-244, June 1995.
41. Boudec J.-Y., Thiran P. Network calculus. A theory of deterministic queuing systems for the Internet. Springer Verlag, 2001. – 274 p.
42. Norros I. The Management of Large Flows of Connectionless Traffic on the Basis of Self-Similar Modeling // ICC '95, IEEE International Conference on Communications. – Seattle, 1995. – P. 451 – 455.
43. Crovella M.E. Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes / M.E. Crovella, A. Bestavros // IEEE Trans. Networking. – 1997. – Vol. 5, N 6.
44. Ryu B.K. Fractal Network Traffic: From Understanding to Implications. Ph.D. thesis. – Columbia University, 1996. – 143 p.
45. Sahinoglu Z. On Multimedia Networks: Self-Similar Traffic and Network Performance / Z. Sahinoglu, S. Tekinay // IEEE Communications Magazine. – 1999. – Vol. 37, N 1. – P. 48-52.
46. Климаш М. М. Визначення параметрів мультимедійного трафіку в мультисервісній мережі / М. М. Климаш, М.І. Кирик, Н. М. Плесканка // Матеріали конференції, науково-методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2012», 01-04 листопада 2012 р., Львів. – С.34-37.
47. Симонина О.А. Яновский Г.Г. Характеристики трафика в сетях IP // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. СПб. 2005. № 171. С. 8-12.
48. Будкова Л.В. Комплексна оцінка характеристик та ідентифікація трафіку в інформаційних телекомунікаційних мережах / Л.В. Будкова, В.І. Корнієнко // Системи обробки інформації. – 2013. – № 2 (109). – С. 207-211.
49. Козлов П.В. Вейвлет-преобразование и анализ временных рядов / П.В. Козлов, Б.Б. Чен // Вестник КРСУ. – 2002. – Т. 2. – № 2. – С. 95-103

50. Newman M.E.J. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law / M.E.J. Newman // Contemporary Physics. – 2005. – Vol. 46. – P. 323.
51. Kyryk Maryan. The model of evaluation quality and timing parameters service device in multiservice network / Maryan Kyryk, Volodymyr Yanyshyn // Proc. of the XII Intern. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013). February 19-23, 2013 Lviv – Polyana, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. - P. 198-199.
52. Можаяев О.О Передача інформації у гетерогенних комп'ютерних мережах: монографія / О.О.Можаяев. – Харків : НТУ «ХПИ», 2012. – 220 с.
53. Crovella M. Heavy Tailed-Probability Distributions in the World Wide Web / M. Crovella , M.S. Taqqu, A. Bestavros // A Practical Guide to Heavy Tails: Statistical Techniques and Applications. – Boston : Birkhäuser, 1998. – P. 326.
54. Brock W.A. A Test for Independence Based on the Correlation Dimension / W.A. Brock, W.D. Dechen, J.A. Scheinkman // Working Paper #8702. Department of Economics, University of Wisconsin, 1987.
55. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. - 3-е изд., – С.Пб.: Питер, 2006. – 957с.
56. Рекомендація Y.1541 [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541/en>
57. Vern Paxson and Sally Floyd, Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 3 No. 3. – Pp. 226-244, June 1995.
58. 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)
59. Cisco Systems. DiffServ – The Scalable End-to-End QoS Model / Cisco Systems // Cisco IOS Technologies.– 2005.[Electronic resource]. – Access mode: - <http://www.cisco.com>
60. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: »Институт компьютерных исследований», 2002. – 656 с.

61. Митилино С. Фрактальная катастрофа TCP/IP //Компьютерное Обозрение, 2001. - С.7.
62. Подходы к моделированию самоподобного трафика / А. И. Костромицкий, В. С. Волотка // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 4/7 (46). – С. 46–49.
63. Шелухин О.И. Мультифракталы. Инфокоммуникационные приложения / О.И. Шелухин – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 576 с.
64. Stalling W. High-Speed Networks TCP/IP and ATM Design Principles / W. Stalling. – Prentice-Hall Inc., 1998.
65. Федорова М.Л. , Леденева Т.М. Об исследовании свойства самоподобия трафика мультисервисной сети // Вестник ВГУ. Серия: системный анализ и информационные технологии. – 2010. – № 1. – С. 46-54.
66. Комплексна оцінка характеристик та ідентифікація трафіку в інформаційних телекомунікаційних мережах / Л.В. Будкова, В.І. Корнієнко // Системи обробки інформації. – 2013. – № 2 (109). – С. 207–211.
67. А.Г. Ложковский, Р.А. Ганифаев Оценка параметров качества обслуживания самоподобного трафика энтропийным методом // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 1. – С.57–62.
68. Ю.И.Лосев, К.М.Руккас. Анализ моделей вероятности потери пакетов в буфере маршрутизатора с учетом фрактальности трафика // Вісник Харківського національного університету, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» – 2008, №833, с.163-169
69. Клейнрок Л., Теория массового обслуживания. Пер. с англ./ И.И.Грушко; ред. В. И. Нейман.-М.:Машиностроение, 1979. – 432 с.
70. Ложковский А.Г. Теорія масового обслуговування в телекомунікаціях / А.Г. Ложковский. – Одеса, 2010. – 112 с.
71. Моделирование информационных систем. /Под ред. О. И. Шелухина. -М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.

72. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения.- СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.: ил.
73. Цыбаков Б.С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. – 1999. – Вып. 5. – С. 24 – 31.
74. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. Монография./ Под ред. О. И. Шелухина.-М.:Радиотехника, 2003.-480с.
75. Кирик М.І. Дослідження буферизації мультимедійного трафіку в мережах передачі даних / М. І. Кирик, Т. В. Андрухів, В. В. Червенець, Н. М. Плесканка // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного Університету «Львівська політехніка». – Львів, 2012. – №738 – С. 100-106.
76. Ложковский А.Г. Модель мультисервисного трафика и метод расчета параметров QoS при его обслуживании // Радиотехника. – 2009. – Вып. 157. – С. 48 – 52.
77. Климаш М. М. Дослідження та моделювання якісних та часових параметрів вузла обслуговування трафіку мультисервісної мережі / М. М. Климаш, М. І. Кирик, Н. М. Плесканка, В. Б. Янишин // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – Київ, 2012. – №4(24). – с.31-37.
78. Mitola J., «Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio,» Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
79. Haykin S., «Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications,» IEEE JSAC, vol. 23, no. 2, Feb. 2005, pp. 201–20.
80. Akyildiz I.F., Lee W.-Y., Vuran M. C., Shantidev M., «A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks», IEEE Communications Magazine, vol. 46, April 2008. – P. 40–48.
81. Tang H., «Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems,» in Proc. IEEE Int. Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Nov. 2005, pp. 151–159.

82. Tevfik Y., Huseyin A., «A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications,» IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume 11, Issue 1, pp. 116 – 130, 2009.

83. Дослідження методів аналізу спектру в когнітивних радіомережах / В. П. Лисечко, І. І. Сопронюк, Ю. О. Степаненко, Н. О. Брюзгіна // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. - 2010. - Вип. 3. - С. 137-145

84. Hussein Hijazi, Eric Pierre Simon, Martine Lienard, Laurent Ros, “Channel Estimation for MIMOOFDM Systems In Fast Time-Varying Environments”, Proceedings of the 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, ISCCSP 2010, Limassol, Cyprus, 3-5 March 2010.

85. Nee R. van, Prasad R., «OFDM for wireless multimedia communications,» – N.Y.: Artech House, 2000.

86. Кирик М. І. Модель оцінки пропускної здатності когнітивної радіомережі на основі OFDM / М. І. Кирик, В. Б. Янишин, І. Б. Стрихалюк // Радіоелектроніка та телекомунікації . Вісник Національного Університету «Львівська політехніка». – Львів, 2014. – №796. – С. 104-112.

87. Кирик М. І. Оцінка спектральної густини потужності на основі методу періодограми Уелча для когнітивного радіо / М.І. Кирик, В.Б. Янишин, Р.С. Колодій // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – №818. – С. 86-93.

88. Wylie-Green M., «Dynamic spectrum sensing by multiband OFDM radio for interference mitigation,» in First IEEE International Symposium on DySPAN 2005, 2005, pp. 619–625.

89. Weiss T., Hillenbrand J., Jondral F., «A diversity approach for the detection of idle spectral resources in spectrum pooling systems,» in Proc. of the 48th Int. Scientific Colloquium, Ilmenau, Germany, Sep. 2003.

90. Hillenbrand J., Weiss T.A., and Jondral F.K., «Calculation of detection and false alarm probabilities in spectrum pooling systems,» IEEE Commun. Lett., vol. 9, no. 4, pp. 349–351, 2005.
91. Yucek T., Arslan H., «Spectrum characterization for opportunistic cognitive radio systems,» Proc. IEEE Military Commun. Conf. (MILCOM), pp. 1–6, 2006.
92. Volkov L.N., Nemirovsky M.S., Shinakov Y.S., «Digital radio: basic methods and characteristics,» - M.: Eco-Trendz, 2005.
93. [ISO / IEC 7498-1-99. «Information technology. Open Systems Interconnection. Basic Reference Model. Part 1. The basic model. - M.: Standartinform, 2006.
94. Sessia. S. I. Toufic, M. «Baker LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice» A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2009. – 522 p. Recommendation ITU-R BS.1387
95. Кирик М.І. Модель оцінки ефективності методів спектральної мобільності для когнітивних радіомереж / М.І. Кирик, В.Б. Янишин, М.В.Піцик // Вісник Національного Університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2016. – №849. – С. 194-202.
96. 3GPP TR 36.913, Requirements for Further Advancements for E-UTRA, Release 11, September 2012.
97. Kyryk M. Proactive spectrum handoff performance evaluation model for cognitive radio / M. Kyryk, V. Yanyshyn // Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Third International Scientific-Practical Conference. – Kharkiv, Ukraine. – 2016. – P. 18-20.
98. Kyryk M. OFDM-based Cognitive Radio System Capacity Evaluation Model / M. Kyryk, V. Yanyshyn // Proceedings of XIIIth international conference «The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics» CADSM'2015. – Lviv-Poljana, Ukraine. – 2015. – P. 137-139
99. Y.A. Gromakov, «The concept of development of mobile and wireless public», Telecommunication № 12, 2008, pp. 51–57.

100. Kyryk M. The Cooperative Spectrum Sensing Performance Research in Cognitive Radio Network / M. Kyryk, V. Yanyshyn, D. Kozhurov // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014. – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2014. – P. 448-450.
101. Кирик М.І. Дослідження ефективності кооперативного сканування в когнітивних радіомережах / М.І. Кирик, В.Б. Янишин // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – СПТЕЛ-2014», 30 жовтня-02 листопада 2014 р., Львів. – С.153-154.
102. W.-Y. Lee, I. F. Akyildiz, «A spectrum decision framework for cognitive radio networks,» IEEE Trans. Mobile Computing, Feb. 2011, pp. 161-174.
103. Климаш М.М. Модель оцінки ефективності алгоритмів переключення радіочастотних каналів для вибору спектру у когнітивних радіомережах / М.М. Климаш, М. І. Кирик, В. Б. Янишин // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Радіоелектроніка та телекомунікації». – Львів, 2017. – №874. – С. 87-95.
104. C.-W. Wang, L.-C. Wang, and F. Adachi, «Performance Gains for Spectrum Utilization in Cognitive Radio Networks with Spectrum Handoff,» International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Sep. 2009
105. H.-J. Liu, Z.-X. Wang, S.-F. Li, and M. Yi, «Study on the Performance of Spectrum Mobility in Cognitive Wireless Network,» IEEE Singapore International Conference on Communication Systems (ICCS), Jun. 2008
106. Y. Yao, D. Erman, A.P. Popescu, «Spectrum Decision for Cognitive Radio Networks», 10th Scandinavian Workshop on Wireless Adhoc Networks (ADHOC), Sweden, May 2011.
107. Kyryk M. Performance Comparison of Cognitive Radio Networks Spectrum Sensing Methods / M.Kyryk, V.Yanyshyn, L.Matiishyn, V.Havronskyuy //

Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2016. – Lviv-Slavske, Ukraine. – 2016. – P. 597-600.

108. Kyryk M. The Spectrum Sensing Techniques Efficiency Analysis in Cognitive Radio Networks / M. Kyryk, V. Yanyshyn // 1st IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT-2015): Conference Proceedings. – Lviv, Ukraine. – 2015. – P. 35-37.

109. C. Ng and B. Soong, «Queueing Modelling Fundamentals with Applications» Communication Networks, 2nd. John Wiley & Sons Inc., 2008.

110. Kyryk M. Performance Evaluation Model for Spectrum Decision Methods in Cognitive Radio / M. Kyryk, N. Pleskanka, V. Yanyshyn // Proceedings of 14th international conference «The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics» CADSM'2017. – Lviv-Poljana, Ukraine. – 2017. – P. 289-291.

111. L. Wang, C. Wang, F. Adachi «Load-Balancing Spectrum Decision for Cognitive Radio Networks,» IEEE Journal on Selected Areas in Communications, May, 2011.

112. Y. Song, J. Xie, «Common Hopping Based Proactive Spectrum Handoff in Cognitive Radio Ad Hoc Networks,» IEEE Global Communications Conference, Dec. 2010.

113. H. Jiang, L. Lai, R. Fan, «Optimal Selection of Channel Sensing Order in Cognitive Radio,» IEEE Trans. Wireless Communication, vol. 8 Jan. 2009.

114. C. Wang, L. Wang, «Modeling and Analysis for Proactive-decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks,» IEEE International Conference on Communications (ICC), Jun. 2009

115. A. Banaei and C. N. Georghiades, «Throughput Analysis of a Randomized Sensing Scheme in Cell-based Ad-hoc Cognitive Networks,» IEEE International Conference on Communications (ICC), Jun. 2009.

116. ETSI. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation "3GPP TS 36.211 Release 14", 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/14.02.00_60/ts_136211v140200p.pdf

117. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.

118. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. 2-е издание: Пер. с англ. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.

119. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021 June 6, 2017 / Cisco Systems – 2017.[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>

120. Fekade B. Probabilistic Recovery of Incomplete Sensed Data in IoT / Berihun Fekade, Taras Maksymyuk, Maryan Kyryk, Minh Jo.. IEEE Internet of Things Journal. – Issue 99, pp. 1-11, Jul. 2017.

121. Maksymyuk T. Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed spectrum for multi-operator 5G hetnet / Taras Maksymyuk ; Maryan Kyryk; Mykhailo Klymash; Minh Jo; Ryszard Romaniuk; Andrzej Kotyra; Aizhan Zhanpeisova; Ainur Kozbekova; // Proceedings of SPIE: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, USA. – 2017. – Vol. 104455T. – doi: 10.1117/12.2280795.

122. Maksymyuk T. Designing the new backbone for 5G Heterogeneous Network Based / Taras Maksymyuk, Olena Krasko, Maryan Kyryk, Vasyl Romanchuk, Roman Kolodiy // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2017. – Vol. 17, No. 4. – P. 9–13. – DOI: 10.15546/aei-2017-0028.

123. Maksymyuk Taras. Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks / Taras Maksymyuk; Mykola Brych; Yulia Klymash; Maryan Kyryk; Mykhailo Klymash // Problems of Infocommunications. Science and Technology, (PIC S&T), 2017 4th International Scientific-Practical Conference, 10 - 13 October, Kharkiv, Ukraine. – P. 515-518.

124. V. Syrjälä, M. Valkama, “Coexistence of LTE and WLAN in Unlicensed Bands: Full-Duplex Spectrum Sensing,” *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks*, Springer International Publishing, pp. 725-734, 2015.

125. www.nokia.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.nokia.com/en_int/news/releases/2015/10/30/sk-telecom-and-nokia-networks-achieve-191-gbps-over-the-air-in-joint-5g-trial

126. M. Jo, T. Maksymyuk, R. L. Batista, T.F. Maciel, A. L. F. de Almeida, and M. Klymash, “A Survey of Converging Solutions for Heterogeneous Mobile Networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 8, pp. 54-62, Dec., 2014.

127. Jo Minhо. Advanced wireless access methods for 5G heterogeneous mobile networks / Minhо Jo, Taras Maksymyuk, Maryan Kyryk, Mykhailo Klymash // *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25- March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine.* – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 30-32.

128. Maksymyuk T. Comprehensive Spectrum Management for Heterogeneous Networks in LTE-U / T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo. // *IEEE Wireless Communications.* –2016. – vol.23– DOI: 10.1109/MWC.2016.1600042WC, Issue: 6, pp. 8-15, Dec. 2016.

129. D. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja, and X. Xiao. Overview and Principles of Internet Traffic Engineering. IETF, Informational RFC-3272, May 2002.

130. Sivasubramanian S., Szymaniak M., Pierre G., «Replication for web hosting systems,» *ACM Computing Surveys*, vol. 36, no. 3, no. 3, pp. 291–334, 2004.

131. Mykhailo Klymash, Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka, Volodymyr Yanyshyn Data Buffering Multilevel Model at a Multiservice Traffic Service Node // *Smart Computing Review. Korea* – Vol. 4. No. 4. August 31, 2014, p. 294-306.

132. OLNN.CN.CDN, The Content distributed network technology, server, May 28, 2007. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://olnn.cn/html/server/6/20070528/3660.html>

133. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ: пер. с англ.: в 2 ч. – М.: Наука, 1992. – Ч. 1. – 336 с.
134. Парфенов В.И., Золотарев С.В. Об одном алгоритме решения задачи оптимальной маршрутизации по критерию средней задержки // Вестник ВГУ: сер. Физика. Математика. – 2007. – № 2. – С. 28–32.
135. Дмитриев Г.А., Марголис Б.И., Музанна М.М. Решение задачи оптимальной маршрутизации по критерию загруженности сети // Программные продукты и системы. – 2013. – № 4. – С. 17–19.
136. Pallis George, Konstantinos Stamos, Athena Vakali «and other». Replication based on Objects Load under a Content Distribution Network // Proceedings of the 22nd (In conjunction with ICDE'06). – Atlanta, 2006. – 53 p,
137. Tim Wauters, Jan Coppens, Bart Dhoedt, Piet Demeester. Load balancing through efficient distributed content placement // In proceeding of: Next Generation Internet Networks. – NY, 2005. – P. 99–105.
138. Кирик М. І. Дослідження механізмів управління контентом у мережах CDN // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації». – 2016. – № 849. – С. 229–236.
139. TR-126 «Triple-play services quality of experience (QoE) requirements», Broadband Forum Architecture and Transport Working Group Tech. Rep., December, 2006
140. S. Winkler, P. Mohandas, «The evolution of video quality measurement: From PSNR to hybrid metrics,» IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 54, no. 3, pp. 660–668, Sept. 2008, invited paper.
141. Kyryk M., Kostiv O. Quality of Experience for IPTV // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proc. Int. Conf TCSET'2010. – Lviv: Publishing house of Lviv Polytechnic, 2010. – P. 214.
142. "Testing MPEG based IP video QoE/QoS" // Shenick Network Systems. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.scribd.com/document/57128274/Testing-Mpeg-Iptv-Vod-Qoe/>

143. ITU-T Recommendation ITU-T Y.1901 (2009), Requirements for the support of IPTV services.
144. RFC 2250 – A Packetization method for transportation of MPEG-TS utilizing RTP protocols.
145. RFC 1889 – An outline of RTP and RTCP, provisioning a method of transportation independent of transport and network layers.
146. Akira Takahashi. Overview of ITU-T and its standardization of QoE assessment methodologies, IEICE Tech. Rep., vol. 110, no. 118, CQ2010-28, pp. 65-69, July 2010
147. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. М.: - Техносфера, 2005. - 368 с.
148. Кирик М.І., Плєсканка Н.М. Визначення залежності якості відеосигналу від параметрів кодека H264. Матеріали конференції, науково-методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій 2011», 27-30 жовтня 2011 р., Львів, с.9-11.
149. Cisco Catalyst 3750 QoS Configuration Examples. Document ID: 91862 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cisco.com/application/pdf/paws/91862/cat3750-qos-config.pdf>
150. Ixia IxChariot:IxChariot Data Sheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ixiacom.com/products/ixchariot/ixchariot_datasheet/index.php
151. Тимченко О.В. Аналіз проходження мультимедійного трафіку в мережі доставки контенту / О. Тимченко, М. Кирик, Н. Плєсканка // Комп'ютерні технології друкарства. Зб. наук. пр. – Львів: Українська Академія Друкарства, 2011. – Вип. 25. – С.109-115.
152. Thomas Karagiannis, Mart Molle, Michalis Faloutsos. «Long-Range Dependence Ten Years of Internet Traffic Modeling». IEEE Internet Computing, September-October 2004
153. S. Lu, T. Nandagopal, and V. Bharghavan, “Design and analysis of an algorithm for fair service in error-prone wireless channels,” Wireless Networks, vol. 6, no. 4, pp. 323–343, 2000.

154. H. Zhang, "Service disciplines for guaranteed performance service in packet-switching networks," Proc. IEEE, vol. 83, pp. 1374–1396, 1995.
155. A.K. Parekh and R.G. Gallager, "A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: the single node case," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 1, pp. 344–357, 1993.
156. P. Goyal, H.M. Vin, and H. Cheng, "Start-time fair queueing: a scheduling algorithm for integrated services packet switching networks," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 5, no. 5, pp. 690–704, 1997.
157. Климаш М. М. Контроль параметрів QoS мережі IP/MPLS на основі розподілу запасу ресурсів / М. М. Климаш, М.І. Кирик, Б.А. Бугиль // Збірник тез. Науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (04-08 жовтня 2010 р. Cominfo'2010-Livadia). – К.:ДУІКТ. - 2010 р.- С.22-23.
158. H. Zhang, "Service disciplines for guaranteed performance service in packet-switching networks," Proc. IEEE, vol. 83, pp. 1374–1396, 1995.
159. H. Han, S. Shakkottai, C. V. Hollot, R. Srikant, and D. Towsley, "Multipath tcp: a joint congestion control and routing scheme to exploit path diversity in the internet," IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 14, pp. 1260–1271, December 2006.
160. Климаш М.М. Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку / М.М. Климаш, М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка, І.О. Кагало // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів, 2014. – №796. – С. 182-194.
161. Kyryk M. Data Buffering Multilevel Model with Adaptive Changes of Buffer Size Technology / M. Kyryk, N. Pleskanka, O. Urikova // Proceedings of XIIIth International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2015, 24-27 February 2015, Lviv-Poljana, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 448-451.
162. Y. Cao and V.O.K. Li, "Scheduling algorithms in broadband wireless networks," Proc. IEEE, vol. 89, pp. 76–87, 2001.

163. T. Nandagopal, S. Lu, and V. Bharghavan, "A unified architecture for the design and evaluation of wireless fair queueing algorithms," *Wireless Networks*, vol. 8, pp. 231–247, 2002.

164. S. Lu, T. Nandagopal, and V. Bharghavan, "Design and analysis of an algorithm for fair service in error-prone wireless channels," *Wireless Networks*, vol. 6, no. 4, pp. 323–343, 2000.

165. H.S. Wang and .Moayeri, "Finite-state Markov channel: a useful model for radio communication channels", *IEEE Trans.Vehicular Technology*, vol. 44, pp.163-171, 1995.

166. Кирик М.І. Системна модель обслуговування черг в безпроводних мережах / М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка // Матеріали конференції, XXXIII науково-технічна конференція «Моделювання», 15-16 січня 2014 р., Київ. – С.42.

167. Bharghavan V.,Lu S., Nandagopal T., "Fair queueing in wireless networks: issues and approaches", *EEE Personal Commun*, vol. 6, pp.44-53, 1999.

168. Wang You-Chiun; Tseng Yu-Chee,"Packet Fair Queuing Algorithms for Wireless Networks", *Design and Analysis of Wireless Networks*, Nova Science Publishers, chapter 7, pp. 113-128 2005.

169. Кирик М. І. Алгоритм обслуговування черг у безпроводних мережах / М. І. Кирик, Н.М. Плєсканка // Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова. Збірник наукових праць. – К., 2014. – Вип. 70. – С. 159-162.

170. Климаш М.М. Моделювання та прогнозування зайнятості буфера системи розподілу мультисервісного трафіка з використанням методу автозупинки [Електронний ресурс] / М.М. Климаш, О.А. Лаврів, Б.А. Бугиль, Р.І. Бак // Проблеми телекомунікацій. – 2011. – № 2 (4). – С. 108 – 117. – Режим доступу: http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_klimash_buffer.pdf

171. Кирик М. І. Дослідження і моделювання механізмів формування та обслуговування черг у мережевих пристроях / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, Д. В. Кожуров // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – №766. – С. 179-186.

172. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS – СПб.: Санкт-Петербург, 2005.
173. Кирик М. Алгоритм адаптивного забезпечення QoS шляхом регулювання довжини IP пакета / М. Кирик, Н. Плєсканка // Зб. наук. пр. – К.: ІПМЕ НАН України, 2011. – Вип.59. – С. 161-165.
174. Kyryk M. The efficiency and productivity of the CDNs. / Maryan Kyryk, Maryana Pleskanka, Nazar Pleskanka // 2nd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT 2017) : Conference Proceedings, 4-7 July 2017, Lviv, Ukraine. – P. 270-273.
175. Kyryk M. QOS mechanism in content delivery network / M. Kyryk, N. Pleskanka, M. Pitsyk // Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016, February 23 – 26, 2016 Lviv-Slavske, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic.- P. 658-660
176. М.І. Кирик, Н.М.Плєсканка, “ Дослідження впливу параметрів кодеку h264 на якість відеосигналу” Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. пр. – 2011. – № 705. – С. 161–166.
177. Kyryk M., Pleskanka N., Pleskanka M. Content Delivery Network Usage Monitoring // Proceedings of 14th International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2017, 21-25 February 2017, Poljana-Svalyava(Zakarpattya), Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - pp. 306-308.
178. Konstantinos Stamos, George Pallis, Athena Vakali, Dimitrios Katsaros, Antonis Sidiropoulos, Yannis Manolopoulos, “CDNsim: A Simulation Tool for Content Distribution Networks”, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, Vol. 20, No. 2, Article 10, Publication date: April 2010.
179. Biliris, A., Cranor, C., Douglass, F., Rabinovich, M., Sibal, S., Spatscheck, O., and Sturm, W. CDN brokering. Computer Communications, 25(4), pp. 393–402, 2002.

180. Buyya, R., Pathan, M., Broberg, J., and Tari, Z. A case for peering of content delivery networks, *IEEE Distributed Systems Online*, 7(10), 2006.
181. Cardellini, V., Colajanni, M., and Yu, P. S. Request redirection algorithms for distributed Web systems. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 14(4), 2003.
182. Кирик М. І. Аналіз роботи та дослідження ефективності використання мережі CDN / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, М.В. Плєсканка // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія "Радіоелектроніка та телекомунікації". – Львів, 2017. – №885. – С. 42-48.
183. Will E. Leland , Murad S. Taqqu , Walter Willinger , Daniel V. Wilson «On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic», 1994.
184. Кирик М.І. Вивчення властивостей мультимедійного трафіку, що передається по мережі CDN / М.І. Кирик, Н. М. Плєсканка // XXX Науково-технічна конференція «Моделювання». ІПМЕ НАН України. Тези конференції. 12-13 січня 2011 року. – К.: 2011. – С. 56-57.
185. Kozamernik, F. and Vermaele, L., «Will Broadband TV Shape the Future of Broadcasting?», European Broadcasting Union, (2005).
186. Nielsen, J., Response Times: The Three Important Limit. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.useit.com/papers/responsetime.html>, Accessed: 30 June 2008.
187. ITU-T, «Quality of Experience Requirements for IPTV», FG IPTV-DOC-0118, ITU Focus group on IPTV. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ties.itu.int/ftp/public/itut/fgiptv/readonly/Previous_Meetings/20070723Geneva/Documents/FG%20IPTV-DOC-0118e.doc, (2007)
188. DSL Forum, «Triple Play Services Quality of Experience (QoE) Requirements and Mechanisms», Technical Report TR-126, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dslforum.org/techwork/tr/TR-126.pdf> , (2006)
189. Kooij, R.E., Nicolai, F., Ahmed, O.K., Brunnström, K.: Model validation of channel zapping quality. In: Proc. of Human Vision and Electronic Imaging Conf., January 19-22 (2009)

190. A.C. Begen, N. Glazebrook, W. Ver Steeg, «A Unified Approach for Repairing Packet Loss and Accelerating Channel Changes in Multicast IPTV,» Consumer Communications and Networking Conference, IEEE, 2009, pp. 1-6.

191. A. Taylor and R. Harper, «Switching on to Switch Off: an analysis of routine TV watching habits and their implications for Electronic Programme Guide Design». In Usable IdTV 1 (3), p. 7--13, 2002.

192. Kyryk Maryan. Reducing Channel Zapping Time Based on Predictive Tuning Method / Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka, Maryan Sylyuchenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the Xth International Conference TCSET'2012, Lviv-Slavske, Ukraine, February 21-24, 2012. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2012. – P. 244-245.

193. N. Sinha and R. Oz, “The Statistics of Switched Broadcast” . Proc. SCTE Conf. on Emerging Technol. (ET '05) (Huntington Beach, CA, 2005). – Режим доступу: http://www.bigbandnet.com/documents/BigBand_Networks-The_Statistics_of_SWB.pdf

194. Meeyoung Cha Pablo Rodriguez Jon Crowcroft Sue Moon Xavier Amatriain «Watching Television Overan IP Network» Proceedings of the 8th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement Pages 71-84 ACM New York, NY, USA ©2008.

195. Our own worldwide network. / OVH Company // About OVH Company.– 2017.[Electronic resource]. – Access mode: - <https://www.ovh.com/world/about-us/network.xml>

196. Плєсканка Н. М. Моделі та алгоритми буферизації мультисервісного трафіку у телекомунікаційних мережах : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі / Назарій Михайлович Плєсканка ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет “Львівська політехніка”. – Львів, 2015. – 24 с. – Бібліографія: с. 17–18 (19 назв).

197. Червенець В.В. Підвищення якості передачі потокового трафіку в мультисервісних мережах: дис. ... канд. техн. наук : 05.12.02 / М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка» .-Львів, 2017 .-173 с.-(іл.) .- Бібліогр.: с. 151-166 (121 назва).

198. Янишин В. Б. Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі / Володимир Богданович Янишин ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – 158 с. – Бібліографія: с. 133–145 (107 назв).

ДОДАТОК А. Код програм, реалізованих в середовищі GPSS World.

Реалізація моделі СМО М/М/1

Lam EQU 257 ; значення lambda

Mu EQU 2560 ; значення u

CHASMOD EQU 665 ; визначення часу моделювання

GENERATE (Exponential(1,0,(1/Lam))) ; генерування потоку

QUEUE CHER ; вхід в чергу CHER

SEIZE MM1 ; зайняття каналу MM1

DEPART CHER ; вихід заявки з черги та потрапляння її у
; канал обслуговування

ADVANCE (Exponential(1,0,(1/Mu))) ; обслуговування заявок у каналі

RELEASE MM1 ; звільнення каналу після завершення
; обслуговування заявки

TERMINATE ; вихід заявки з системи

GENERATE CHASMOD ; задання здійснення часу моделювання

TERMINATE 1 ; вихід з системи після завершення часу моделювання

START 1 ; запуск на виконання моделі один раз

Реалізація моделі СМО М/D/1

Lam EQU 2537 ; значення lambda
Mu EQU 2560 ; значення Mu
CHASMOD EQU 665 ; визначення часу моделювання

GENERATE (Exponential(1,0,(1/Lam))) ; генерування потоку з експоненційним законом
; розподілу заявок

QUEUE CHER ; відмітка моменту надходження заявки в чергу CHER

SEIZE MM1 ; зайняття пристрою з іменем MM1

DEPART CHER ; відмітка моменту виходу заявки з черги

ADVANCE (1/Mu) ; затримка заявки на час 1/Mu

RELEASE MM1 ; звільнення пристроб з імнем MM1

TERMINATE ; вихід заявки з системи

GENERATE CHASMOD ; задання здійснення часу моделювання

TERMINATE 1 ; вихід з системи після завершення часу моделювання

START 1 ; запуск на виконання моделі один раз

ДОДАТОК Б. Фрагменти програмного коду реалізації програмного комплексу на основі імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею.

Фрагменти коду менеджера первинної мережі:

Менеджер первинної мережі являє собою програмну імітацію роботи існуючих ліцензійних мереж з максимальним наближенням до реальних умов. Включає в себе генерацію користувачів первинної мережі, їх доступ до радіочастотного ресурсу мережі та надання послуг у передаванні даних.

Змінні:

<i>type</i>	тип мережі (первинна, вторинна)
<i>workRanges</i>	список робочих частотних діапазонів мережі
<i>channels</i>	список робочих частотних каналів мережі
<i>userTypes</i>	список типів користувачів, що можуть бути згенеровані та обслуговуватися менеджером мережі
<i>users</i>	список активних користувачів даної мережі
<i>gen_frequency</i>	частота генерації нового користувача (користувачів/с)
<i>max_user_num</i>	максимальна кількість унікальних користувачів мережі (при значенні 0 - безліч користувачів)

Функції:

<i>Init()</i>	ініціює створення програмної первинної мережі з вибараними параметрами
<i>OnStop()</i>	зупиняє роботу програмної первинної мережі
<i>StartGenerateUsers()</i>	стартує алгоритм генерації користувачів
<i>GenerateUser(type)</i>	генерує нового користувача вибраного типу
<i>GetRandomUserType()</i>	отримує випадковий тип користувача (відповідно до вагового

	коефіцієнту)
--	--------------

```
public enum NetworkType{
    none = 0,
    primary = 1,
    secondary = 2,
}

public class Network : MonoBehaviour {

    public NetworkType type;

    public List<FrequencyRange> workRanges;

    public List<FrequencyChannel> channels;

    public List<UserType> userTypes;
    public List<User> users;

    public float gen_frequency = 1;
    public int max_user_num = 100;

    public void Init()
    {
        users = new List<User> ();
        channels = new List<FrequencyChannel> ();

        foreach (FrequencyRange _range in workRanges) {
            List<FrequencyChannel> _channels = ModelManager.frequencyManager.GetFrequencies (_range);
            foreach (FrequencyChannel _c in _channels) {
                if (!channels.Contains (_c)) {
                    _c.network = this;
                    channels.Add (_c);
                }
            }
        }

        if (workRanges.Count == 0) {
            channels = ModelManager.frequencyManager.GetAllWorkFrequencies ();
        }

        StartGenerateUsers ();
    }

    public void OnStop(){
        StopAllCoroutines ();

        foreach (Transform _t in transform) {
            Destroy (_t.gameObject);
        }

        users = new List<User> ();
        channels = new List<FrequencyChannel> ();
    }

    public void StartGenerateUsers()
    {
        StartCoroutine (GenerateUserDelay ());
    }

    public UserType GetRandomUserType(){
        int _sum = 0;
        int[] _weights = new int[userTypes.Count];
        for (int i = 0; i < userTypes.Count; i++) {
            _sum += userTypes[i].weight;
            _weights [i] = _sum;
        }

        int _random = Random.Range (0, _sum);
        for (int i = 0; i < _weights.Length; i++) {
            if (_random < _weights [i]) {
                return userTypes [i];
            }
        }
        return new UserType ();
    }
}
```

Фрагмент коду класу менеджер радіочастот:

Змінні:

<i>channelsNum</i>	загальна кількість каналів
<i>FrequencyRange</i>	потрібний діапазон частот радіосередовища
<i>channelWidth</i>	ширина одного каналу в МГц
<i>channels</i>	список з усіх наявних частотних каналів

Функції:

<i>Init()</i>	ініціює створення програмного радіосередовища з вибраними параметрами
<i>OnStop()</i>	зупиняє роботу програмного радіосередовища
<i>GetFrequencies(range)</i>	отримує список частотних каналів заданих діапазоном частот
<i>GetAllWorkFrequencies()</i>	отримує список усіх робочих частотних каналів
<i>GetAllFreeFrequencies()</i>	отримує список усіх вільних частотних каналів
<i>GetFirstFreeFrequency()</i>	отримує наступний вільний частотний канал

```

public class FrequencyManager : MonoBehaviour {

    private int channelsNum;

    public FrequencyRange FrequencyRange;           //(МГц) діапазон частот
    public float channelWidth = 0.2f;             //(МГц) ширина каналу
    public List<FrequencyChannel> channels;

    public void Init(){
        channelsNum = (int)(FrequencyRange.width() / channelWidth);

        channels = new List<FrequencyChannel>();
        for (int i = 0; i < channelsNum; i++) {
            float _f = FrequencyRange.start + i * channelWidth;
            channels.Add(new FrequencyChannel(i, new FrequencyRange(_f,_f+channelWidth)));
        }
    }

    public void OnStop(){
        channels = new List<FrequencyChannel>();
    }

    public List<FrequencyChannel> GetFrequencies(FrequencyRange _range){
        if (_range.start < FrequencyRange.start) {
            Debug.LogError("GetFrequencies: start range is less then we have");
            _range.start = FrequencyRange.start;
        }
        if (_range.end > FrequencyRange.end) {
            Debug.LogError("GetFrequencies: end range is more then we have");
            _range.end = FrequencyRange.end;
        }

        int start_num = (int)((_range.start - FrequencyRange.start) / channelWidth);
        int end_num = (int)((_range.end - FrequencyRange.start) / channelWidth);

        List<FrequencyChannel> _channels = new List<FrequencyChannel>();
        for (int i = start_num; i < end_num; i++) {
            _channels.Add (channels[i]);
        }

        return _channels;
    }

    public List<FrequencyChannel> GetAllWorkFrequencies(){
        List<FrequencyChannel> _channels = new List<FrequencyChannel>();
        for (int i = 0; i < channels.Count; i++) {
            if (channels [i].is_working) {
                _channels.Add (channels[i]);
            }
        }

        return _channels;
    }

    public List<FrequencyChannel> GetAllFreeFrequencies(){
        List<FrequencyChannel> _channels = new List<FrequencyChannel>();
        for (int i = 0; i < channels.Count; i++) {
            if (channels [i].is_free) {
                _channels.Add (channels[i]);
            }
        }

        return _channels;
    }
}

```

Фрагменти коду класу діапазон частот та частотний канал.

Змінні:

<i>is_free</i>	прапорець, що визначає зайнятість частотного каналу будь-яким користувачем
<i>is_working</i>	прапорець, що визначає загальну доступність до роботи частотного каналу
<i>num</i>	номер частотного каналу
<i>range</i>	діапазон частот, що займає даний канал
<i>user</i>	визначає користувача, який в даний момент займає частотний канал. Якщо канал вільний, змінна встановлюється, як null
<i>network</i>	визначає ліцензійну мережу, до якої належить даний частотний канал

Змінна *range* являє собою клас частотний діапазон і має такі складові:

Змінні:

<i>start</i>	початкова частота діапазону (МГц)
<i>end</i>	кінцева частота діапазону (МГц)

Функції:

<i>width()</i>	отримати ширину діапазону (МГц)
----------------	---------------------------------

```

[Serializable]
public class FrequencyRange{
    public float start;
    public float end;

    public FrequencyRange(float _s, float _e){
        if (_e > _s) {
            start = _s;
            end = _e;
        } else {
            start = _e;
            end = _s;
        }
    }

    public float width(){
        return end - start;
    }
}

[Serializable]
public class FrequencyChannel {

    public bool is_free{
        get {
            if (is_working && user == null) {
                return true;
            }
            return false;
        }
    }

    public bool is_working {
        get {
            if (network != null && network.type == NetworkType.none) {
                return false;
            }
            return true;
        }
    }

    public int num;
    public FrequencyRange range;
    public User user = null;

    public Network network;

    public FrequencyChannel(int _num, FrequencyRange _range){
        num = _num;
        range = _range;
    }
}

```

ДОДАТОК В. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

«Затверджую»
Директор
ТзОВ «Лабораторія
інформаційних технологій»
/Бордун І.Р./
«03» травня 2017р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, представники ТзОВ «Лабораторія інформаційних технологій», в особі директора Бордуна І.Р. та головного інженера Калиняка В.Я. даним актом стверджуємо впровадження й використання наукових результатів дисертаційної роботи Кирика М.І. при побудові мережі доставки контенту на основі мережевої інфраструктури компанії OVH Telecom, а саме, методології синтезу та побудови мереж доставки контенту на основі глобальної інформаційної інфраструктури.

Розроблені п. Кириком М.І. методи ефективного використання мережевих ресурсів, управління контентом, балансування навантаження та контролю якості послуг, дали можливість зменшити в 2-2.5 рази завантаженість основного сервера, в 1.5-2 рази затримки, яку отримує кінцевий користувач при одержанні контенту, а також зменшити втрати пакетів в середньому на 15% із забезпеченням необхідної якості обслуговування абонентів.

Головний інженер ТзОВ «ЛІТЕХ» *В.Калиняк* /Калиняк В.Я./

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Кандидат технічних наук

Кирик М.І.
“25” вересня 2017р.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Директор
ТзОВ ВКФ «Радіо сервіс», лімітед
Тишин В. О.
“25” вересня 2017р.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
докторанта кафедри “Телекомунікацій”
Національного університету “Львівська політехніка”
Кирика Мар’яна Івановича

Даний акт складений про те, що у ТзОВ ВКФ “Радіо сервіс”, лімітед використані результати дисертаційної роботи Кирика Мар’яна Івановича “Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах”. На безпровідній мережі ТзОВ ВКФ “Радіо сервіс”, лімітед впроваджені наступні результати:

1. Метод оцінювання ефективності вибору радіочастотного каналу в когнітивній безпровідній мережі доступу з урахуванням ймовірності зайняття визначених ділянок радіочастотного спектру на основі результатів його сканування, що дає змогу оцінити середній час доставки даних та покращити швидкодію системи керування когнітивною радіомережею і також мінімізувати тривалість прийняття рішення про зміну радіочастотних каналів.

2. Імітаційну модель керування радіомережею доступу, яка використовує збір та моніторинг параметрів радіочастотних каналів та методи прогнозування їх стану.

Розроблений на базі запропонованих методів та моделей програмний комплекс дає змогу проводити дослідження та порівняння ефективності роботи алгоритмів сканування, вибору та спільного використання радіочастотного спектру та використаний при модернізації безпровідної мережі.

Результати дисертаційної роботи “Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах” використовувались на безоплатній основі.

25 вересня 2017, м. Львів

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Кандидат технічних наук
Кирик М.І.
“15” листопада 2017р.



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Заступник директора
ДІПЛОМОВА РАБОТА
ДП НТЦ “УАРНЕТ”
Коваль Б.І.
“15” листопада 2017р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
докторанта кафедри “Телекомунікацій”
Національного університету “Львівська політехніка”
Кирика Мар’яна Івановича

Даний акт складений про те, що у ДП НТЦ “УАРНЕТ” використані результати дисертаційної роботи “Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах”. На телекомунікаційній мережі ДП НТЦ “УАРНЕТ” впроваджені наступні результати:

1. Модель оцінки статистичних характеристик процесів обслуговування мультисервісного трафіку, що дозволяє враховувати завантаженість мережі та ступінь самоподібності мультисервісного трафіку за рахунок поєднання методів аналітичного та імітаційного моделювання.

2. Математична модель ймовірнісно-часових характеристик мультисервісної мережі, яка враховує структурно-функціональні особливості архітектури рівня доступу в мережах доставки контенту та дозволяє отримати точніші значення затримки та джиттеру.

Результати математичного та імітаційного моделювання дозволили здійснити підбір параметрів мережевого обладнання для обслуговування мультисервісних інформаційних потоків абонентського навантаження та підвищити показники якості сервісу на 12-15%.

Впроваджені моделі та алгоритми керування передачею інформаційних потоків є науковими результатами дисертаційної роботи Кирика М.І. і використані при модернізації магістральної транспортної мережі підприємства.

Результати дисертаційної роботи “Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах” використовувались на безоплатній основі.

15 листопада 2017, м. Львів

ЗАТВЕРДЖУЮ”
директор ТЗОВ ТРК
“Західтелесервіс”
Гірна А. М.
2017р.



АКТ
про використання результатів дисертаційної роботи
докторанта кафедри телекомунікацій Національного університету
“Львівська політехніка”

Кирика Мар’яна Івановича

Ми, представники Товариства з обмеженою відповідальністю Телерадіокомпанія “Західтелесервіс”, в особі технічного директора Віхрецького Леоніда Костянтиновича та головного спеціаліста Маліченко Володимира Олексійовича даним актом стверджуємо впровадження й використання результатів дисертаційної роботи Кирика М.І., а саме методу передавання і доставки мультисервісного контенту в розподілених інфокомунікаційних ситемах із використанням технології CDN та моделі процесу переспрямування замовленого потокового контенту.

Розроблені Кириком М.І. методи та моделі передавання та кешування даних враховують тип інформаційного потоку, що в свою чергу, дає змогу підвищити ефективність використання мережевої інфраструктури і підвищити якість надання послуг при передаванні потокового мовлення в реальному часі та дозволяють покращити якість сприйняття послуг кінцевими користувачами (QoE) за рахунок пришвидшення в 1.5-2 рази часу перемикання між відеопотоками.

Впроваджені моделі та методи є науковими результатами дисертаційної роботи Кирика М.І. і будуть використані при модернізації телекомунікаційної мережі ТОВ ТРК «Західтелесервіс».

Технічний директор



/ Віхрецький Л.К.



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор
з науково-педагогічної роботи
Національного університету
“Львівська політехніка”
доц. Давидчак О. Р.
“26” 12 2017р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи к.т.н., доцента Кирика Мар'яна Івановича «Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах» у навчальному процесі кафедри телекомунікацій

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри «Телекомунікації», професор, д.т.н. Климаш М.М., професор, д.т.н. Пелішок В.О. склали даний акт, який засвідчує, що у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» використано результати докторської дисертаційної роботи доц. Кирика М. І., а саме:

1) модернізовано курси лекцій з дисциплін «Телекомунікаційні та інформаційні мережі», «Системне адміністрування телекомунікаційних мереж», у яких використано запропоновані у роботі методи ефективного використання мережевих ресурсів і методологію синтезу мереж доставки контенту на основі сегменту глобальної мережевої інфраструктури, яка враховує методи ресурсного управління, наскрізного оцінювання їх параметрів, якості сервісу та стану активного мережевого обладнання;

2) створено курс лекцій та лабораторний практикум для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» з дисципліни «Маршрутизація та розподіл потоків у телекомунікаційних мережах» у якому використано методи пріоритетного управління контентом, балансування навантаження та забезпечення QoS при передаванні інформації в CDN мережах.

Використані результати дисертаційної роботи надали можливість студентам отримати нові теоретичні та практичні знання у дослідженні методів управління передаванням інформації в розподілених інфокомунікаційних системах та мережах доставки контенту з метою ефективного використання мережевих ресурсів.

Завідувач кафедри «Телекомунікації»,
професор, д.т.н.

Климаш М.М.

Професор кафедри «Телекомунікації»,
доцент, д.т.н.

Пелішок В.О.

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

№ 111284

**СПОСІБ БУФЕРИЗАЦІЇ МУЛЬТИСЕРВІСНОГО ТРАФІКУ У
ВУЗЛАХ ОБСЛУГОВУВАННЯ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи
11.04.2016.

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України

А.А. Малинич



ДОДАТОК Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографія:

1. Кирик М. І. Методи та моделі управління трафіком в розподілених інфокомунікаційних системах : моногр. / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, О. В. Тимченко. – Львів : Укр. акад. друкарства, 2017. – 264 с. ISBN 978-966-322-473-2.

Статті у наукових періодичних виданнях:

2. Кирик М. І. Аналіз роботи та дослідження ефективності використання мережі CDN / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, М.В. Плєсканка // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Радіоелектроніка та телекомунікації». – Львів, 2017. – №885. – С. 42-48 р. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

3. Maksymyuk T. Designing the new bakhaul for 5G Heterogeneous Network Based / Taras Maksymyuk, Olena Krasko, Maryan Kyryk, Vasyl Romanchuk, Roman Kolodiy // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2017. – Vol. 17, No. 4. – P. 9–13. – DOI: 10.15546/aei-2017-0028 (іноземне наукове періодичне видання з напряму, ISSN 1335-8243 (Print))

4. Климаш М.М. Модель оцінки ефективності алгоритмів переключення радіочастотних каналів для вибору спектру у когнітивних радіомережах / М.М. Климаш, М. І. Кирик, В. Б. Янишин // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Радіоелектроніка та телекомунікації». – Львів, 2017. – №874. – С. 87-95. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

5. Fekade B. Probabilistic Recovery of Incomplete Sensed Data in IoT / Berihun Fekade, Taras Maksymyuk, Maryan Kyryk, Minho Jo.. IEEE Internet of Things Journal. – Issue 99, pp. 1-11, Jul. 2017. (іноземне наукове періодичне видання з напряму, ISSN 2327-4662 (Electronic), Scopus)

6. Maksymuk T. Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed spectrum for multi-operator 5G hetnet / Taras Maksymuk ; Maryan Kyryk; Mykhailo Klymash; Minho Jo; Ryszard Romaniuk; Andrzej Kotyra; Aizhan

Zhanpeisova; Ainur Kozbekova; // Proceedings of SPIE: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, USA. – 2017. – Vol. 104455T. – doi: 10.1117/12.2280795.(іноземне наукове періодичне видання з напрямку, ISSN 0277-786X (Print), Scopus)

7. Maksymyuk T. Comprehensive Spectrum Management for Heterogeneous Networks in LTE-U / T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo // IEEE Wireless Communications. – 2016. – vol.23 – DOI: 10.1109/MWC.2016.1600042WC, Issue: 6, pp. 8-15, Dec. 2016. (іноземне наукове періодичне видання з напрямку, ISSN: 1536-1284 (Print, Scopus).

8. Кирик М. І. Оцінка ефективності методів спектральної мобільності у когнітивних радіомережах / М.І. Кирик, В.Б. Янишин, М.В. Піцик// Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – № 849. – С. 194–202. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499).

9. Кирик М. І. Дослідження механізмів управління контентом у мережах CDN/ М.І. Кирик // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – № 849. – С. 229–236. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499).

10. Кирик М. І. Оцінка спектральної густини потужності на основі методу періодограми Уелча для когнітивного радіо / М.І. Кирик, В.Б. Янишин, Р.С. Колодій // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – №818. – С. 86-93. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

11. Климаш М.М. Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку / М.М. Климаш, М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка, І.О. Кагало // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2014. – №796. – С. 182-194. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

12. Кирик М. І. Модель оцінки пропускної здатності когнітивної радіомережі на основі OFDM / М. І. Кирик, В. Б. Янишин, І. Б. Стрихалюк // Радіоелектроніка та телекомунікації . Вісник Національного Університету

«Львівська політехніка». – Львів, 2014. – №796. – С. 104-112. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

13. Klymash Mykhailo. Data Buffering Multilevel Model at a Multiservice Traffic Service Node / Mykhailo Klymash, Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka, Volodymyr Yanyshyn // Smart Computing Review. Korea, August 31, 2014 – Vol. 4. No. 4.. – p. 294-306. (CrossRef, DBLP, DBPIA, Google Scholar, EBSCO, ISSN 2234-4624 (Electronic))

14. Кирик М. І. Алгоритм обслуговування черг у безпроводних мережах / М. І. Кирик, Н.М. Плєсканка // Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова. Збірник наукових праць. – К., 2014. – Вип. 70. – С. 159-162. (наукове фахове видання, ISSN 2309-7655, Google Scholar)

15. Кирик М. І. Дослідження і моделювання механізмів формування та обслуговування черг у мережевих пристроях / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, Д. В. Кожуров // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – №766. – С. 179-186. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

16. Климаш М. М. Дослідження та моделювання якісних та часових параметрів вузла обслуговування трафіку мультисервісної мережі / М. М. Климаш, М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, В. Б. Янишин // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – Київ, 2012. – №4(24). – С.31-37. (наукове фахове видання, індексується МНБ, ISSN 2518-7678)

17. Кирик М.І. Дослідження буферизації мультимедійного трафіку в мережах передачі даних / М. І. Кирик, Т. В. Андрухів, В. В. Червенець, Н. М. Плєсканка // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного Університету «Львівська політехніка». – Львів, 2012. – №738. – С. 100-106. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

18. Кирик М. І. Дослідження впливу параметрів кодеку h264 на якість відеосигналу / М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 705. – С. 161–166. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

19. Кирик М. Алгоритм адаптивного забезпечення QoS шляхом регулювання довжини IP пакета / М. Кирик, Н. Плєсканка // Зб. наук. пр. – К.: ІПМЕ НАН України, 2011. – Вип.59. – С. 161-165. (наукове фахове видання, ISSN 2309-7647, Google Scholar)

20. Тимченко О.В. Аналіз проходження мультимедійного трафіку в мережі доставки контенту / О. Тимченко, М. Кирик, Н. Плєсканка // Комп'ютерні технології друкарства. Зб. наук. пр. – Львів: Українська Академія Друкарства, 2011. – Вип. 25. – С.109-115. (наукове фахове видання, індексується МНБ, ISSN 2411-9210)

21. 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. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – №680 – С.132-135. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

22. Тимченко О.В. Механізми забезпечення якості передачі відеотрафіку в мультисервісних мережах/ О.В. Тимченко, М.І. Кирик, В.В. Червенець // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр.– К.: ІПМЕ НАН України, 2009. – Вип.54. – с. 247-251. (наукове фахове видання, ISSN 2309-7647)

23. Тимченко О.В. Співвідношення між якістю послуг мереж передачі даних і рівнями OSI/ О.В. Тимченко, М.І. Кирик, Б.М. Верхола, Аскар Самі. // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.49. – К.: 2008. – С. 150-157. (наукове фахове видання, ISSN 2309-7647)

24. Тимченко О.В., Кирик М.І., Верхола Б.М., Самі Аскар. Дослідження якості багатоадресної передачі мультимедійного трафіку. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.48. – К.: 2008. – С. 161-169. (наукове фахове видання, ISSN 2309-7647)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

25. Maksymyuk Taras. Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks / Taras Maksymyuk; Mykola Brych; Yulia Klymash; Maryan Kyryk; Mykhailo Klymash // Problems of Infocommunications. Science and Technology, (PIC S&T), 2017 4th International Scientific-Practical

Conference, 10 - 13 October, Kharkiv, Ukraine. – P. 515-518. (Scopus) (заочна участь, доповідь співавтора)

26. Kyryk M. The efficiency and productivity of the CDNs. / Maryan Kyryk, Maryana Pleskanka, Nazar Pleskanka // 2nd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT 2017) : Conference Proceedings, 4-7 July 2017, Lviv, Ukraine. – P. 270-273. (МНБ, Scopus) (очна участь із доповіддю)

27. Kyryk M. Content Delivery Network Usage Monitoring / M. Kyryk, N. Pleskanka, M. Pleskanka // Proceedings of 14th International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2017, 21-25 February 2017, Poljana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 306-308. (МНБ, Scopus) (очна участь із доповіддю)

28. Kyryk M. Performance Evaluation Model for Spectrum Decision Methods in Cognitive Radio / M. Kyryk, V. Yanyshyn, N. Pleskanka // Proceedings of 14th International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2017, 21-25 February 2017, Poljana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 289-291. (МНБ, Scopus) (очна участь із доповіддю)

29. Kyryk Maryan. Proactive spectrum handoff performance evaluation model for cognitive radio / Maryan Kyryk, Volodymyr Yanyshyn // Problems of Infocommunications. Science and Technology, (PIC S&T), 2016 Third International Scientific-Practical Conference, 4 - 6 October, Kharkiv, Ukraine. – P. 18-20. (Scopus) (заочна участь, доповідь співавтора)

30. Maksymyuk T. Opportunistic Tri-Band Carrier Aggregation in Licensed and Unlicensed Spectrum for Multi-Operator 5G HetNet / T. Maksymyuk, M. Kyryk, Minh Jo // Матеріали міжнародної конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016): Збірник тез. – К.: НТУУ «КПІ», 11–15 вересня 2016 р. – P.315-317. (Scopus) (заочна участь, доповідь співавтора)

31. Kyryk M. QOS mechanism in content delivery network / M. Kyryk, N. Pleskanka, M. Pitsyk // Proceedings of the XIIIth International Conference

TCSET'2016, February 23 – 26, 2016 Lviv-Slavske, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic.- P. 658-660. (МНБ, Scopus) (очна участь із доповіддю)

32. Kyryk M. Performance Comparison Of Cognitive Radio Networks Spectrum Sensing Methods / М. Kyryk, L. Matiishyn, V. Yanyshyn, V. Havronskyu // Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016. February 23 – 26, 2016 Lviv-Slavske, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic.- P. 597-600. (МНБ, Scopus) (очна участь із доповіддю)

33. Kyryk M. The spectrum sensing techniques efficiency analysis in cognitive radio networks / М. Kyryk, V. Yanyshyn // 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015): Conference Proceedings, October 29 – November 1, 2015, Lviv, Ukraine. – P. 41-43. (Google Scholar) (очна участь із доповіддю)

34. Kyryk M. Data Buffering Multilevel Model with Adaptive Changes of Buffer Size Technology / М. Kyryk, N. Pleskanka, O. Urikova // Proceedings of XIIIth International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2015, 24-27 February 2015, Lviv-Poljana, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 448-451. (МНБ, Scopus) (очна участь із доповіддю)

35. Kyryk M. OFDM-based Cognitive Radio System Capacity Evaluation Model / М. Kyryk, V. Yanyshyn // Proceedings of XIIIth International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2015, 24-27 February 2015, Lviv-Poljana, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 137-140. (МНБ, Scopus) (очна участь із доповіддю)

36. Кирик М.І. Дослідження ефективності кооперативного сканування в когнітивних радіомережах / М.І. Кирик, В.Б. Янишин // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – СПТЕЛ-2014», 30 жовтня-02 листопада 2014 р., Львів. – С.153-154. (очна участь із доповіддю)

37. Климаш М.М. Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку / М.М. Климаш, М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка, І.О. Кагало // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних

пристроїв, засобів телекомунікацій, нано та мікроелектроніки, IV міжнародна науково-практична конференція. – Чернівці, Україна, 23-25 жовтня 2014. – С.98-99. (Google Scholar) (заочна участь, доповідь співавтора)

38. Kyryk Maryan. The Buffering and Congestion Management in Multiservice Networks / Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25- March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 541-543.

39. Kyryk Maryan. The Cooperative Spectrum Sensing Performance Research in Cognitive Radio Networks / Maryan Kyryk, Volodymyr Yanyshyn, Dmitry Kozhurov // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25-March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 448-450.

40. Jo Minho. Advanced wireless access methods for 5G heterogeneous mobile networks / Minho Jo, Taras Maksymyuk, Maryan Kyryk, Mykhailo Klymash // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University. February 25- March 1, 2014 Lviv-Slavske, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. – P. 30-32.

41. Кирик М.І. Системна модель обслуговування черг в безпроводних мережах / М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка // Матеріали конференції, XXXIII науково-технічна конференція «Моделювання». ІПМЕ НАН України. 15-16 січня 2014 р., Київ. – С.42. (заочна участь, доповідь співавтора)

42. Jo Minho. Cognitive Radio Approach for LTE Deployment / Minho Jo, Maryan Kyryk, Taras Maksymyuk, Longzhe Han // Proceedings of the IX International Conference on The Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2013). April 16-20, 2013 Polyana, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. - P. 63-64. // Перспективні технології і методи проектування МЕМС: матеріали дев'ятої міжнар. конф. MEMSTECH 2013, 16-

20 квітня 2013, Поляна, Україна Нац.ун-т «Львів. політехніка». – Л.: Вежа і Ко, 2013. – С.151-152. (Google Scholar) (заочна участь, доповідь співавтора)

43. Kyryk Maryan. The model of evaluation quality and timing parameters service device in multiservice network / Maryan Kyryk, Volodymyr Yanyshyn // Proc. of the XII Intern. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013). February 19-23, 2013 Lviv – Polyana, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. - P. 198-199. (МНБ, Scopus) (очна участь із доповіддю)

44. Кирик М. І. Статистична модель самоподібного трафіку мультисервісної мережі / М.І. Кирик, Н. М. Плєсканка // VI Международный научно-технический симпозиум «Новые технологии в телекоммуникациях» ГУИКТ-КАРПАТЫ '2013. 21 - 25 января 2013 г., с. Вышков Долинского района Ивано-Франковской области. – С.89-90. (заочна участь, доповідь співавтора)

45. Климаш М. М. Визначення параметрів мультимедійного трафіку в мультисервісній мережі / М. М. Климаш, М.І. Кирик, Н. М. Плєсканка // Матеріали конференції, науково-методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2012», 01-04 листопада 2012 р., Львів. – С.34-37. (очна участь із доповіддю)

46. Kyryk Maryan. Reducing Channel Zapping Time Based on Predictive Tuning Method / Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka, Maryan Sylyuchenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the Xth International Conference TCSET'2012, Lviv-Slavske, Ukraine, February 21-24, 2012. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2012. – P. 244-245. (МНБ, Scopus) (очна участь із доповіддю)

47. Кирик М.І. Визначення залежності якості відеосигналу від параметрів кодека H264 / М.І. Кирик, Н. М. Плєсканка // Матеріали конференції, науково-методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій 2011», 27-30 жовтня 2011 р., Львів, с.9-11. (очна участь із доповіддю)

48. Кирик М.І. Вивчення властивостей мультимедійного трафіку, що передається по мережі CDN / М.І. Кирик, Н. М. Плєсканка // XXX Науково-

технічна конференція «Моделювання». ІПМЕ НАН України. Тези конференції. 12-13 січня 2011 року. – К.: 2011. – С. 56-57. (заочна участь, доповідь співавтора)

49. Климаш М. М. Контроль параметрів QoS мережі IP/MPLS на основі розподілу запасу ресурсів / М. М. Климаш, М.І. Кирик, Б.А. Бугиль // Збірник тез. Науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (04-08 жовтня 2010 р. Cominfo'2010-Livadia). – К.:ДУІКТ. - 2010 р.- С.22-23. (заочна участь, доповідь співавтора)

50. Курык М. Quality of Experience for IPTV / М. Курык, О. Kostiv // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the Xth International Conference TCSET'2010, February 23-27, 2010 Lviv-Slavske, Ukraine / Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv Polytechnic National Univeristy. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2010. – P. 214. (МНБ, Scopus) (очна участь із доповіддю)

51. Тимченко О.В. Аналіз методів передачі трафіку реального часу в телекомунікаційних мережах / О.В. Тимченко, М.І. Кирик, В.В. Червенець // Матеріали конференції, науково-методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій 2009», 28-30 жовтня 2009 р., Львів, с.51-53. (Google Scholar) (очна участь із доповіддю)

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

52. Пат. 111284 Україна, МПК51H04L 12/861. Спосіб буферизації мультисервісного трафіку у вузлах обслуговування/Климаш М.М., Кирик М.І.,Плесканка Н.Б., Стрихалюк Б.М., власник Нац. ун-т «Львів. політехніка». – № 201413995 ; заявл. 26.12.2014 ; опублік. 11.04.2016, Бюл. № 7.2016 – 5 с.