

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КИРИК МАР'ЯН ІВАНОВИЧ

УДК 621.391

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ КОНТЕНТОМ
В РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів - 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор
Климаш Михайло Миколайович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри телекомунікацій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лісовий Іван Павлович,
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова,
професор кафедри телекомунікаційних систем;

доктор технічних наук, професор
Коваль Валерій Вікторович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України,
професор кафедри автоматизації та робототехнічних
систем ім. акад. І.І.Мартиненка;

доктор технічних наук, доцент
Дуравкін Євген Володимирович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри інфокомунікаційної інженерії.

Захист дисертації відбудеться “02” липня 2018 р. о 12:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “31” травня 2018 р.

*Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради*



І.В. Демидов

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 використання 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 напрямком 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 більш наближеними до характеристик реальних потоків даних, зокрема у CDN, розробленням нових моделей та методів управління різноманітними 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), № держреєстрації 0115U000444; а також госпдоговірної тематики «Оптимізація параметрів прокладки оптичного кабелю в міській телефонній каналізації» (2014р.), ГД № 0489; «Розробка алгоритму роботи кешуючого медіасервера з авторизацією на базі Nginx» (2015р.), 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» (2017р.), 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.

Наукова новизна отриманих результатів.

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 ймовірно-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 користувацького 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 «ЛПТех» 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: [1] – дослідження принципів передавання інформації в розподілених інфокомунікаційних мережах, алгоритми буферизації для зменшення рівня втрат та мінімізації затримки обслуговування мережевих даних, аналіз самоподібного трафіку; [17, 37] – імітаційна модель для вибору оптимальних алгоритмів обслуговування черг у мультисервісних мережах; [11, 13, 34, 38, 52] – дослідження методів та принципів буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку; [16, 43, 44, 45] – дослідження та моделювання самоподібного трафіку та визначення його ймовірно-часових характеристик; [18, 47] – метод оцінки впливу параметрів кодера на якість відеосигналу та підбір параметрів для проведення ефективного кодування; [14, 15, 41] – розроблення алгоритму обслуговування черг у безпроводному середовищі, запропонований інтегральний критерій для оцінювання ефективності обслуговування черг та управління розподілом навантаження; [19, 46] – дослідження та моделювання впливу буферизації на якість сприйняття послуг кінцевими користувачами, модель процесу переспрямування потокового контенту; [22, 24, 49, 51] – дослідження механізмів оцінки якості сприйняття послуги; [21, 23, 27, 50] – методи оцінки якості надання мультисервісних послуг; [20, 43, 48] – дослідження впливу самоподібності трафіку на продуктивність роботи мережі доставки контенту; [28, 36, 39] – модель для оцінювання ефективності методів вибору радіочастотного каналу в когнітивній радіомережі; [4, 29] – аналіз методів вибору ділянок спектру для когнітивного радіо

та порівняння алгоритмів перемикання каналів за критерієм мінімізації загальної тривалості цього процесу в умовах балансування навантаження; [8, 12, 32] – дослідження продуктивності процесів передавання ділянок спектру для обслуговування користувачів при застосуванні проактивного і реактивного методів спектральної мобільності та розроблення відповідних алгоритмів; [10] – теоретичні основи розроблення імітаційної моделі системи виявлення енергії сигналу для оцінювання спектральної густини потужності; [33, 35, 42] – дослідження принципів побудови когнітивної радіомережі на основі OFDM; [3, 5] – аналіз та дослідження механізмів управління трафіком в мережах LTE/5G; [6, 7, 25, 30, 40] – 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; [2, 20, 26, 31, 48] – результати імітаційного моделювання та дослідження продуктивності роботи CDN.

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 рр.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2013, 2015, 2017 рр.); Науково-практичних конференціях «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2009, 2011, 2012, 2014» (м. Львів, 2009, 2011, 2012, 2014рр.); 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 «Моделювання» ІПМЕ 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

Scopus, Google Scholar), 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і визначено основні завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, подано наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів із вказівкою відомостей про впровадження результатів роботи, описано особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів роботи і про публікації за темою роботи, подано короткий опис структури і обсягу дисертації.

Перший розділ – «Аналіз стану та тенденцій розвитку розподілених інфокомунікаційних систем» – містить огляд літературних джерел за темою дисертації в рамках проведення аналізу стану та тенденцій розвитку розподілених інфокомунікаційних систем. Проаналізовано процеси конвергенції телекомунікаційних та інформаційних мереж, розглянуто основні моделі інфокомунікаційних мереж та принципи передавання інформації, механізми забезпечення якості передачі користувацького контенту та визначено вимоги до управління трафіком і розподілу ресурсів в сучасних інфокомунікаційних мережах.

Розвиток інформаційних та комунікаційних технологій започаткував нову еру, яка характеризується стрімкою інформатизацією суспільства із розвитком глобальної інформаційної інфраструктури (ГІ), завданням якої є впровадження та сумісність наявних і майбутніх телекомунікаційних та інформаційних послуг і прикладного програмного забезпечення всередині 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.

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). З точки зору суб'єктів цієї індустрії, контент – це все, що можна продати / віддати абоненту (відео- та аудіо матеріали, потокове мовлення, картинки, ігри та ін.) і вони претендують на отримання частини оплачених абонентами коштів інтернет-провайдера, 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 [1].

Усі ці складові формують нове середовище, на якому має базуватися ГІІ. У свою чергу, доступ до інформаційних ресурсів ГІІ 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.

Очевидно, що основою для побудови високоефективної інформаційної інфраструктури будуть наявні телекомунікаційні системи, тому створення відповідного телекомунікаційного середовища є важливою національною проблемою. Розвиток Національної інформаційної інфраструктури (НІІ) є необхідною умовою інтеграції України у світовий інформаційний простір на рівноправній основі. 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 інших галузях народного господарства.

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

Загалом ускладнюється архітектура IP-мереж, вони стають мультисервісними мережами, розробляються нові алгоритми, протоколи та технології, які в значній мірі покращують якість передачі мультимедійного трафіку, особливо трафіку реального часу, при цьому потреба в пропускній здатності різко зростає зі збільшенням кількості споживачів зазначених вище послуг[46].

Виконати ці вимоги можна за допомогою наступних методів:

1. Збільшення пропускної здатності мережі за рахунок модернізації мережевого обладнання та збільшення пропускних здатностей каналів передавання.
2. Забезпечення необхідної QoS за рахунок підтримки відповідних параметрів мережі за допомогою пріоритезації трафіку, алгоритмів керування чергами, запобігання перевантаженням, оптимізації алгоритмів маршрутизації.
3. Використання систем, які б забезпечували прийнятну якість сервісу та були б мінімально залежні від параметрів мережі. Такий підхід можна забезпечити за рахунок вдосконалення методів управління і передавання незалежно від характеру відеоінформації або за рахунок використання методів стиску, які враховують семантику зображень [22, 24].

Методологія забезпечення якості послуг Diffserv передбачає використання методів розподілу трафіку за категоріями і пріоритетами, завдяки чому трафік з високим пріоритетом одержує необхідні мережеві ресурси та може використовуватися для забезпечення заданої якості передачі відеотрафіку послуги

«відео на замовлення». Такий підхід, на відміну від IntServ, не вимагає витрат часу на попереднє визначення параметрів транспортування трафіку по маршруту проходження інформаційного потоку [23, 50].

Для розв'язання завдань доставки цифрових відеопотоків та вимірювання показника якості надання сервісу (QoS) і показника сприйняття послуги (QoE) необхідно сформулювати підхід для оцінки QoE та створити механізм керування QoE з кінця в кінець, тобто на всіх ланках проходження відеотрафіку від джерела до користувача (див. рис.1).

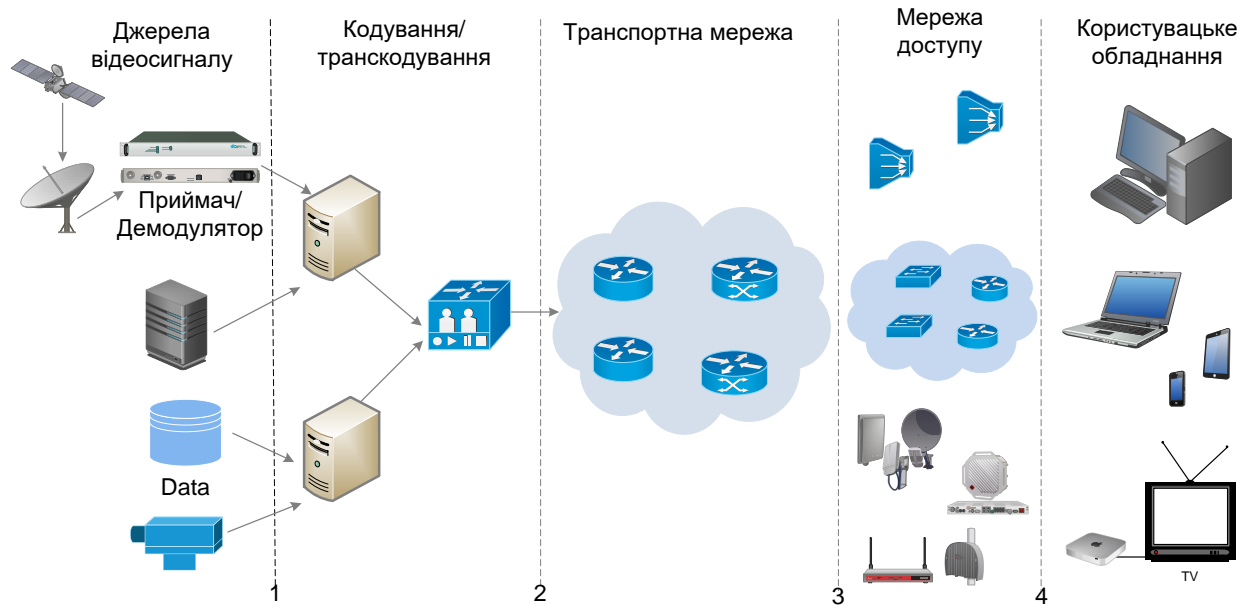


Рис. 1. Спрощена схема проходження відеотрафіку в мережі Інтернет [21].

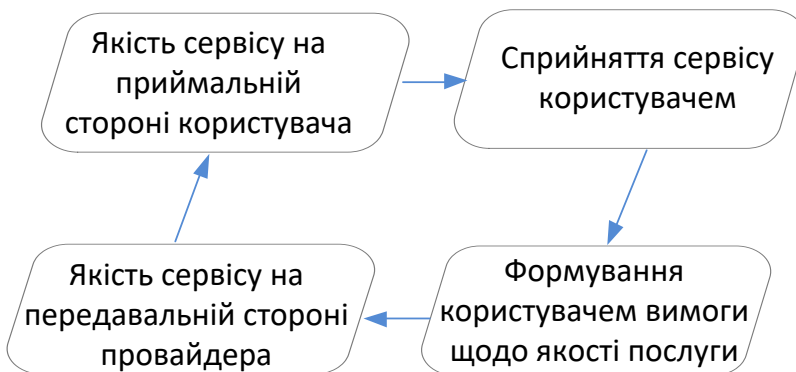


Рис. 2. Схема етапів оцінювання QoE.

Оцінювання показника QoE включає етапи, наведені на рис. 2. 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, що дозволяє окреслити джерела погіршення якості та

ідентифікувати причини їх виникнення [32].

Розвиток інфокомунікаційних мереж та підвищення вимог до забезпечення якості надання послуг вимагають розв'язання проблеми ефективного використання мережеских ресурсів. Це завдання можна вирішити шляхом оптимального управління трафіком (TE), пропускнуою здатністю каналів передавання даних, буферним простором мережеских пристроїв [33], маршрутизацією. Проте, статистичні моделі не дозволяють враховувати зміни стану мережі при передачі мультимедійного трафіку, особливо це відчутно при передачі трафіку реального часу, однією з характерних особливостей якого є чутливість до затримок.

Оптимальний розподіл мережевих ресурсів в процесі експлуатації мережі дозволяє підвищити ефективність використання вже існуючого мережевого обладнання та ліній зв'язку. 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 [37].

Другий розділ – «Методи та моделі підвищення ефективності передавання інформації в розподілених інфокомунікаційних системах» – 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, яка дозволяє отримати динамічну модель трафіку, що, в свою чергу, дало змогу адекватно підбирати алгоритми керування процесами передавання даних в інфокомунікаційних мережах. Представлено підходи, які використовуються для визначення ступеня самоподібності мережевого трафіку. Проведено математичне моделювання для визначення параметрів якості обслуговування, яке підтвердило, що використання довільної методики обрахунку параметрів якості сервісу є недопустимим для трафіку, що володіє властивістю самоподібності.

Трафік в сучасних інфокомунікаційних мережах можна розділити на чотири основних класи: трафік реального часу (нееластичний), потоковий трафік, трафік передачі даних (еластичний) та трафік сигналізації, кожен з яких відрізняється за рівнем чутливості до характеристик мережі. В мультисервісній мережі, зазвичай, наявні різні комбінації перелічених видів трафіку і кожен тип трафіку висуває свої вимоги до якості обслуговування.

Характерним є те, що при переході до мереж наступного покоління, які побудовані на основі протоколу IP, зростає частка трафіку реального часу, в порівнянні з традиційним трафіком передачі даних. Це пояснюється зростанням інтересу до сервісів, які дозволяють передавати по мережі звук та відео високої якості, таких як VoD та IPTV [47].

Для неінтерактивних сервісів згладження коливання затримок можливе завдяки здійсненню буферизації даних на клієнтському термінальному обладнанні. Вибір розміру буфера відбувається, виходячи з максимально можливої затримки пакетів даних [11, 13].

Проаналізовано результати досліджень трафіку в мультисервісних мережах, проведена його класифікація та визначено закони розподілу для кожного його типу, які дозволяють описати характер трафіку на певному рівні протокольного стеку TCP/IP. Запропоновано комплексну методику оцінювання трафіку, яка дозволяє прийняти рішення відносно того, чи є процес самоподібним (фрактальним), хаотичним та нелінійним і, чи включає часо-частотний, статистичний та фрактальний аналіз. В якості основних критеріїв класифікації прийняті три характеристики трафіку: відносне передбачення швидкості передачі даних, чутливість трафіку до затримок пакетів, чутливість надходження до втрат і спотворень пакетів.

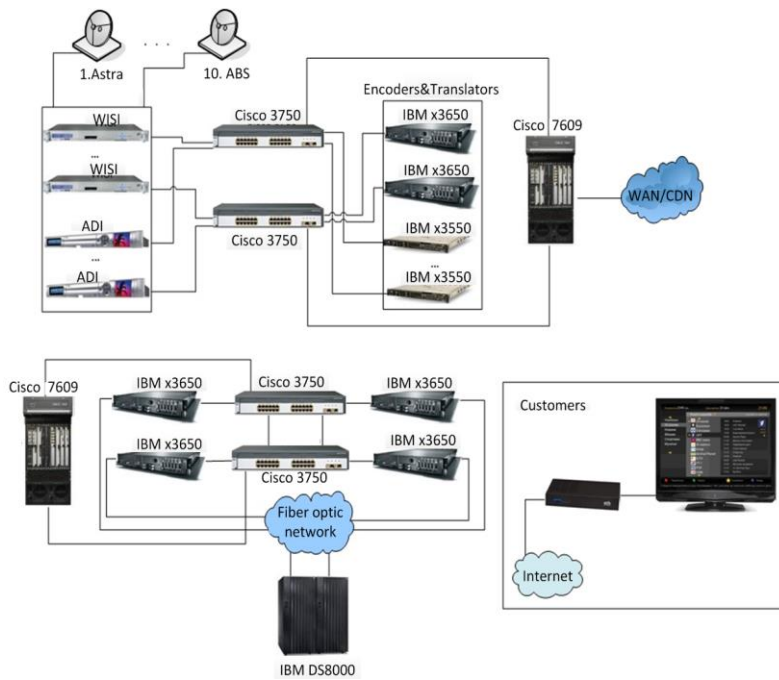


Рис. 3. Структура мережі доставки контенту.

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.

Властивість самоподібності мережевого трафіку призводить до певної некоректності та похибок результатів, отриманих при розрахунку параметрів якості обслуговування пакетів за класичними методами розрахунків. Далі наведені основні підходи до розрахунків та моделювання систем з самоподібним трафіком. З властивості самоподібності мережевого трафіку випливає, що відомі 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. Саме ці сплески викликають значні затримки і втрати пакетів навіть тоді, коли середнє значення інтенсивності потоків далеке від максимально допустимих значень [20].

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 призвести до їх втрати при обмеженості обсягу буфера, який розрахований за класичними методиками. Не дивлячись на велику популярність цієї 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 і прогнозування поведінки самоподібного трафіку, методи проектування мультисервісних мереж.

Для визначення параметрів мережевих потоків проводилось дослідження трафіку, який був представлений у вигляді потоків, що пересилалися через мережу доставки контенту CDN. Структура мережі, на якій проводились дослідження, представлена на рис. 3. У ході проведення дослідження відстежувався весь трафік, який проходив між серверами протягом кількох днів. Далі було проведено детальне дослідження типів потоків, що передавались, визначено основні характеристики та властивості цих потоків.

Оскільки трафік мультисервісних мереж є самоподібним, то його моделювання вимагає відповідних підходів. На сьогоднішній день розроблено багато різноманітних моделей, призначених для імітації фрактального трафіку.

За формулою Полячека-Хінчіна 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 рівний 0.

Середня кількість заявок в системі M/M/1 визначається за формулою:

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

Для системи M/D/1, коефіцієнт варіації якої рівний 0, середня кількість заявок в системі з формули Полячека-Хінчіна набуде вигляду:

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

Щоб знайти середню кількість заявок у черзі для цих систем, можна скористатися співвідношенням:

$$Q = N - \rho, \quad (3)$$

де ρ – коефіцієнт завантаженості мережі.

Загальний вираз для визначення ймовірності втрат пакетів для системи G/G/1 має вигляд:

$$P_{\text{loss}} = \frac{(1-\rho)}{1-\rho} * \rho^{\frac{W * \frac{2}{C_\lambda^2 + C_\mu^2}}{(W+1) * \frac{2}{C_\lambda^2 + C_\mu^2}}}, \quad (4)$$

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.

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

$$P_{\text{loss}} = \frac{(1-\rho)}{1-\rho(W+1)^{2*(1-H)}} * \rho^{W^{2*(1-H)}}. \quad (5)$$

При невідомих розподілах часу між надходженнями пакетів та часом їх обслуговування, 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 складають b та β відповідно. Тоді, середній час очікування можна знайти за формулою:

$$W = \frac{\rho * b}{2*(1-\rho)} * (\alpha^2 + \beta^2) * f(\rho, \alpha, \beta), \quad (6)$$

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

$$f(\rho, \alpha, \beta) = \begin{cases} \exp\left\{-\frac{2*(1-\rho)}{3*\rho} * \frac{(1-\alpha^2)^2}{\alpha^2+\beta^2}\right\} \\ \exp\left\{-(1-\rho) * \frac{\alpha^2-1}{\alpha^2+4*\beta^2}\right\} \end{cases} \quad (7)$$

Перший вираз у формулі (7) 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 буде дорівнювати тривалості обслуговування заявки в системі:

$$T = W + \left(\frac{1}{\mu}\right). \quad (8)$$

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

$$N = \lambda * T. \quad (9)$$

Знаючи значення виразу (9), за формулою (3) 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.

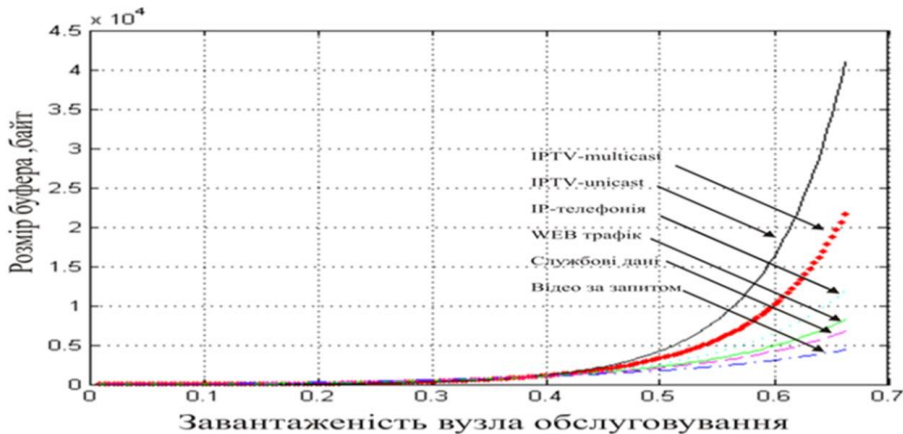
Обмеженість пуассонівських моделей підтверджує безліч публікацій на тему самоподібного трафіку з розподілом виду «важкий хвіст». В більшості цих робіт стверджується, що трафік мультисервісних мереж не може бути адекватно описаний пуассонівськими моделями, оскільки висновки, отримані на їх основі, є досить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

Одним із найважливіших параметрів, при визначенні якості обслуговування, є ймовірність втрат повідомлення за рахунок переповнення буфера запам'ятовуючого пристрою. Буфер призначений для згладжування короткотривалих пульсацій мережевого трафіку та запобігання втраті пакетів при цьому. Необхідність у буферній пам'яті чітко проявляється саме в моменти пікових навантажень мереж передачі даних та обслуговуючих пристроїв [17].

Використовуючи отримані параметри вхідного потоку, значення параметра Херста та формулу Полячека-Хінчіна, можна розрахувати необхідний розмір буферної пам'яті. Залежність розміру буфера від завантаженості обслуговуючого пристрою зображено на рис. 4(а). Як видно з графіка, для самоподібного трафіку є необхідним буфер більшого розміру за умов меншої завантаженості мережі. Залежність ймовірності втрат для різних типів досліджуваного трафіку від завантаженості обслуговуючого пристрою представлена на рис. 4(б).

Ймовірність втрат для системи $G/G/1$ при різних значеннях величини буфера можна розрахувати за формулою (4). Отриману залежність, при різних значеннях розміру буфера, представлено на рис. 5. 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 ступені завантаженості каналу вище 0.7, є меншими, ніж для інших систем. 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%.



а)



б)

Рис. 4. Залежність а) розміру буфера та б) ймовірності втрат пакетів від завантаженості вузла обслуговування [16].

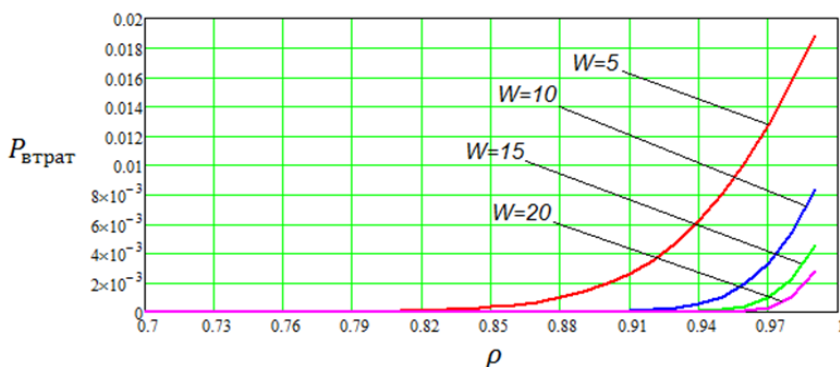


Рис. 5. Залежність ймовірності втрат від завантаженості мережі при різних значеннях величини буфера (система G/G/1).

що може спричиняти 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 [43]. Проте, часто такі розрахунки є досить складними, а інколи навіть можуть не мати аналітичних розв'язків, що зумовлює необхідність введення спрощень та припущень [44].

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 [45]. Проте, як вже зазначалося, розрахунок для цих систем здійснюється за спрощеними формулами,

Для підтвердження результатів, отриманих методом аналітичного моделювання, в роботі було проведено також імітаційне моделювання системи масового обслуговування на програмному забезпеченні GPSS World, за допомогою якого було отримано необхідні характеристики системи. Перед початком процесу імітаційного моделювання було створено його блокову модель, а вже потім здійснено реалізацію цієї системи програмно (рис. 6).

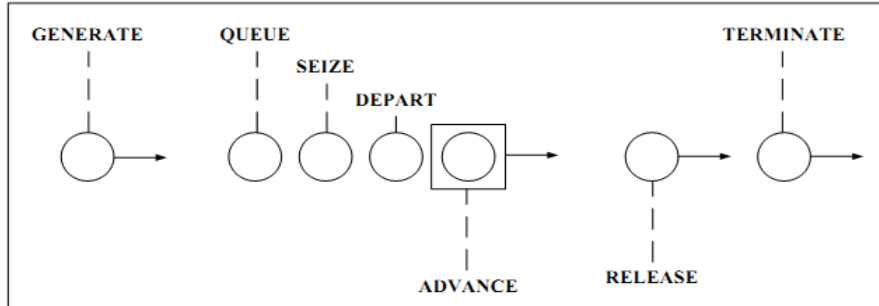


Рис. 6. Модель процесу імітаційного моделювання в середовищі GPSS World.

Результати, отримані при розрахунках та за допомогою імітаційної моделі для наглядного порівняння, наведено на рис. 7, 8 (взято не всі отримані значення, а лише незначну їх кількість, для здійснення порівняння). Порівняння результатів, отриманих методами аналітичного та імітаційного моделювання показує, що ці результати між собою відрізняються несуттєво з похибкою менше 10%.

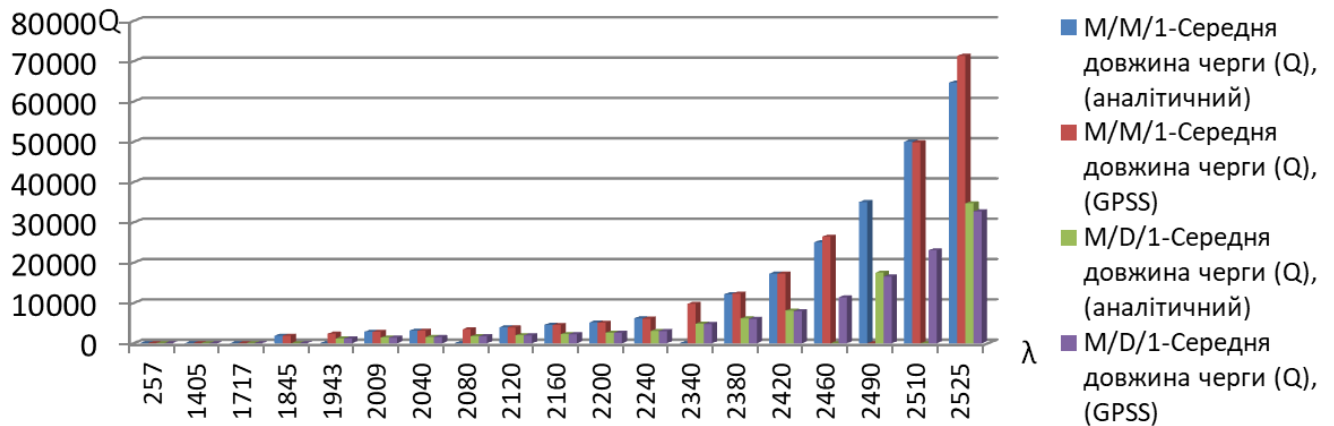


Рис. 7. Результати порівнянь параметрів системи М/М/1 та М/Д/1, отримані аналітичним та імітаційним методами моделювання.

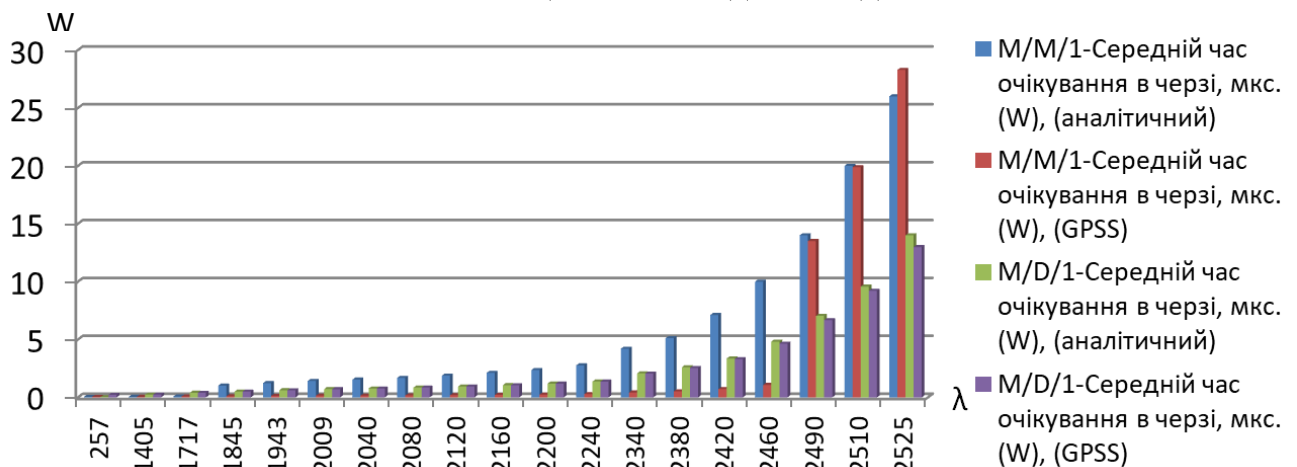


Рис. 8. Результати порівнянь параметрів системи М/М/1 та М/Д/1, отримані аналітичним та імітаційним методами моделювання.

У третьому розділі – «Моделювання та дослідження методів передавання контенту в безпроводних мережах доступу» – 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 множини своїх внутрішніх приймально-передавальних параметрів відповідно до змін радіосередовища.

Розглянуто і досліджено запропонований метод управління використанням радіочастотного спектру в когнітивній безпроводній мережі доступу із можливістю адаптивного налаштування параметрів обладнання.

Удосконалено модель оцінювання ефективності методів вибору спектру на основі введення нового показника продуктивності – тривалості прийняття системою рішення про перерозподіл каналів вторинного з'єднання для алгоритмів балансування вхідного навантаження та проведено оцінювання ефективності застосування пропонованих алгоритмів, шляхом моделювання когнітивної радіомережі, для визначення пропускної здатності при роботі системи в умовах, наближених до реальних, та встановлено, що навіть при максимальній завантаженості абонентами первинної мережі, середня сумарна пропускна здатність когнітивної радіомережі зростає в середньому на 10% [10].

Показано, що незважаючи на те, що значну частину радіочастотного діапазону в даний момент вже розподілено, виділені частоти не завжди використовуються ефективно, а здебільшого – в міру необхідності. Отже, велика частина діапазонів частот нерегулярно і неповністю завантажуються в просторовій і часовій областях і може бути додатково використана. Технологія когнітивного радіо потребує нової архітектури прийомо-передавачів для того, щоб забезпечити ці можливості.

Для побудови когнітивної системи передачі даних пропонується використання технології просторового рознесення MIMO та технології мультиплексування OFDM, які забезпечують підвищення інформаційної ефективності та завадозахищеності. Технологія OFDM є методом модуляції сигналу та кодування цифрової інформації з використанням декількох несучих частот. Залежно від кількості частот, що зайняті первинною мережею в певному місці, вона дозволяє

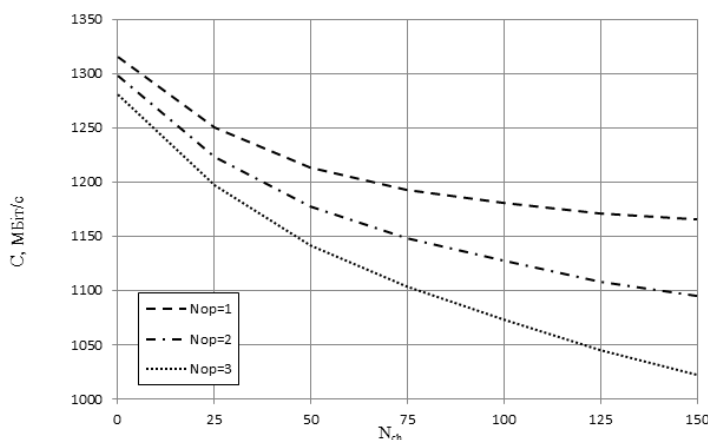


Рис. 9. Залежність пропускної здатності мережі (C), для різної кількості операторів (N_{op}), від кількості радіоканалів (N_{ch}) [35].

гнучко керувати смугою пропускання сигналу, що передається, і покращити ефективність приймання даних [12].

Для оцінки пропускної здатності радіоканалів запропоновано імітаційну модель когнітивної мережі, в якій первинна (ліцензійна) мережа представляє собою одну з комірок системи LTE, де працює декілька операторів на різних виділених частотних смугах. Експериментальні результати моделювання відображено на рис. 9.

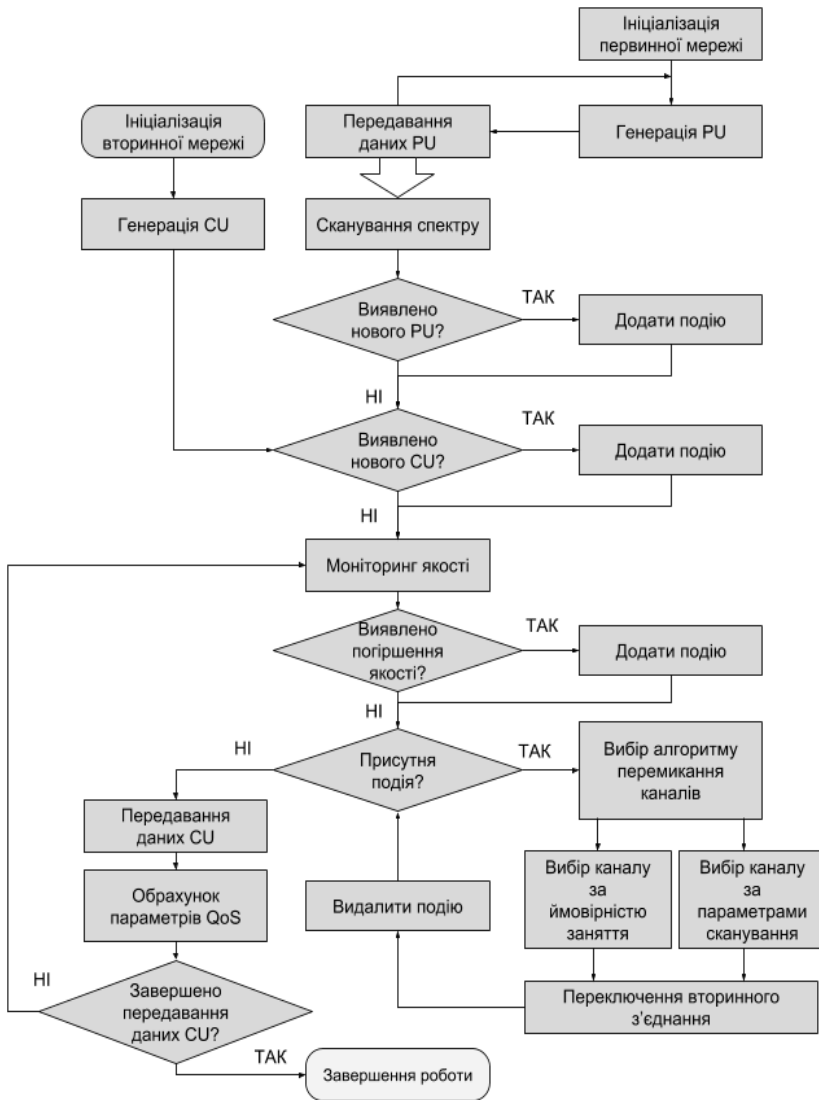


Рис. 10. Блок-схема алгоритму реалізації методу вибору радіочастотного каналу в когнітивній безпроводній мережі.

Блок-схему алгоритму реалізації методу управління радіочастотним спектром в когнітивній безпроводній мережі зображено на рис.10.

На рис. 11 наведено модель процесу оцінювання ефективності методів вибору спектру для різних алгоритмів перемикання каналів. Запропонована модель базується на основі спрощеної загальної моделі когнітивної радіомережі [8]. 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 $f_s(l)$.

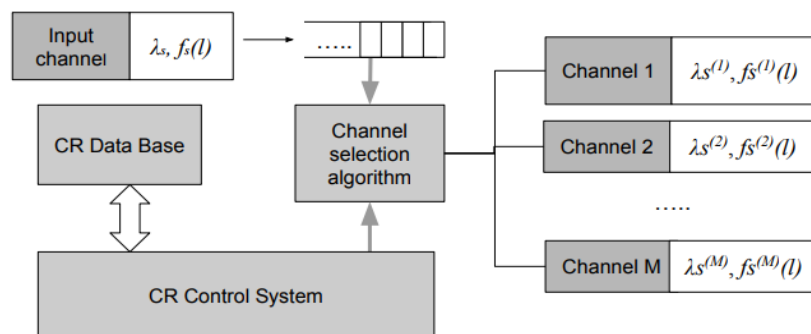


Рис. 11. Модель процесу оцінювання ефективності методів вибору спектру для різних алгоритмів перемикання каналу [4].

Тривалість перерозподілу каналів (S) є важливою метрикою якості обслуговування (QoS) для оцінки ефективності з'єднання вторинних користувачів. Вона складається з тривалості очікування (W) і тривалості доставки даних (T).

Таким чином, отримаємо:

$$E[S] = E[W] + E[T], \quad (10)$$

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

Тут час очікування визначаємо, як тривалість від моменту, коли запит на передачу даних надходить в систему, до моменту запуску передачі даних. Тривалість часу очікування залежить від алгоритму переключення каналу, що вибраний вторинними користувачами. 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 передачі обслуговування впливає на тривалість часу доставки даних. Відповідно до формули (10), загальний системний час для алгоритму вибору каналу на основі оцінювання ймовірності його зайняття визначається як:

$$E[S_{pb}] = E[W_{pb}] + E[T_{pb}]. \quad (11)$$

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

$$E[S_{sb}] = E[W_{sb}] + E[T_{sb}]. \quad (12)$$

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

$$p = \arg \min E[S_{pb}(p_{pb})] \quad (13)$$

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

де $\Omega = \{1, 2, \dots, M\}$ – набір можливих каналів-кандидатів; $E[S_{pb}]$ – тривалість перерозподілу каналів для вторинного з'єднання.

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

$$E[T_{pb}] = \sum_{k=1}^M p_{pb}^{(k)} E[T^{(k)}], \quad (14)$$

$$E[W_{pb}^{(k)}] = \frac{E[R^{(k)}]}{(1 - p_p^{(k)})(1 - p_p^{(k)} - p_s^{(k)})}, \quad (15)$$

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

$$E[R^{(k)}] = \frac{1}{2} \lambda_p^{(k)} E[(X_p^{(k)})^2] + \frac{1}{2} p_{pb}^{(k)} \lambda_s E[(X_s^{(k)})^2]. \quad (16)$$

Середній час доставки даних для алгоритму вибору каналу на основі сканування його параметрів, складає:

$$E[T_{sb}] = \sum_{k=1}^M p_{sb}^{(k)} E[T^{(k)}], \quad (17)$$

$$E[W_{sb}] = n\tau + \Pr\{\varepsilon^c\} \times E[W_{sb}'], \quad (18)$$

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

$$\Pr\{\varepsilon\} = \sum_{k=1}^n [\Pr\{\varepsilon | k_{idle}\} \times \Pr\{k_{idle}\}] = \sum_{k=1}^n [(1 - (P_F)^k) \times \sum_{\mathfrak{S} \subseteq \Omega, |\mathfrak{S}|=k} \left[\prod_{i \in \mathfrak{S}} (1 - p^{(i)}) \prod_{j \in \Omega - \mathfrak{S}} p^{(j)} \right]], \quad (19)$$

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

$$\Pr\{\varepsilon^c\} = 1 - \Pr\{\varepsilon\}. \quad (20)$$

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

На основі запропонованої моделі проведено порівняння алгоритмів без балансування навантаження із запропонованими алгоритмами вибору радіочастотних каналів на основі оцінювання ймовірності зайняття каналів та на основі сканування їх параметрів. Порівняння проведено за введеним показником тривалості перерозподілу каналів для кожного з алгоритмів в залежності від інтенсивності вхідного навантаження для різних значень параметра тривалості сканування одного каналу τ .

Результати моделювання залежності загального часу прийняття рішення $E[S]$ від інтенсивності вхідного навантаження λ_s графічно представлені на рис. 12. З використанням методів балансування навантаження можна мінімізувати загальний системний час прийняття рішення про зміну каналу до 25% при низькому та на понад 50% при високому вхідному навантаженні.

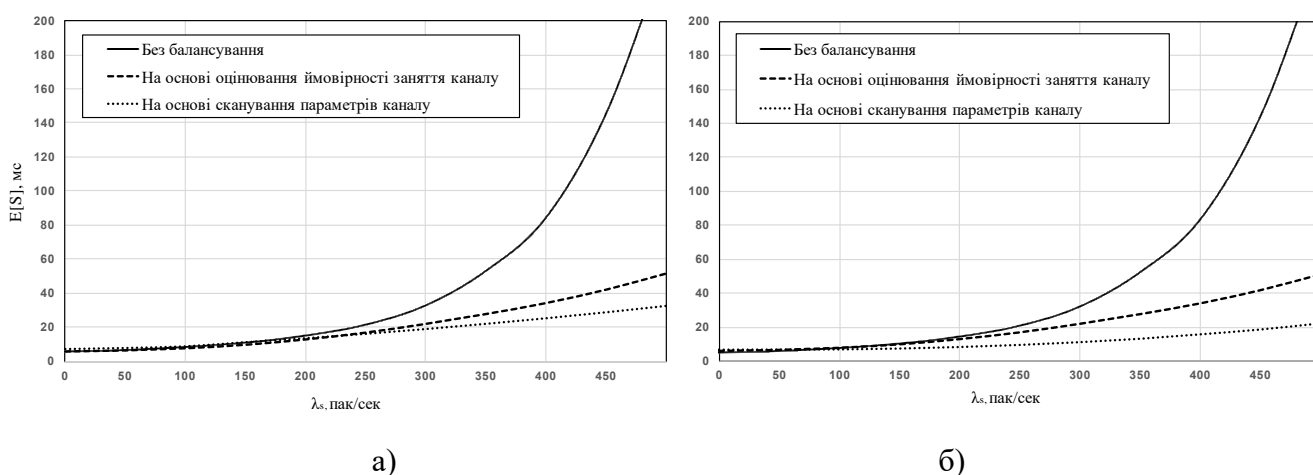


Рис. 12. Залежність тривалості перерозподілу каналів від інтенсивності вхідного навантаження для: а) $\tau=4$, $P_M=0.05$, $P_F=0.05$, $E[X_s]=10$; б) $\tau=2$, $P_M=0.05$, $P_F=0.05$, $E[X_s]=10$ [28].

Для дослідження ефективності роботи алгоритмів сканування, вибору та спільного використання радіочастотного спектру на основі запропонованої моделі системи керування когнітивною радіомережею розроблено програмний комплекс.

Запропоновано метод для покращення управління радіоресурсами в мультиоператорських гетерогенних мережах з технологією LTE-U на основі комплексного моніторингу мережі та програмного планування, для збільшення ємності мережі при обмежених спектральних ресурсах шляхом поєднання пропускної здатності радіоканалів у ліцензійних та неліцензійних смугах [3, 6, 40]. Дані, що допускають наявність лише низької кількості помилок, такі як дані сигналізації та голосові, як і раніше, передаються по ліцензованій смузі спектру, тоді як неліцензійна смуга використовується з метою збільшення пропускної

здатності для сервісів, які допускають більші втрати пакетів. Запропонований метод доступу до середовища, який називається CASLUA (carrier sense LTE unlicensed access) може бути реалізований як з використанням традиційних рішень, так і за допомогою SDN. Результати моделювання показують, що використання CASLUA може забезпечити збільшення середньої швидкості передавання даних до 40%. Алгоритм може бути реалізований програмно як окремо, так і як частина програмно-визначеної мережі. Більш детальний опис наведено в роботі [7].

В четвертому розділі – «Розроблення методів управління навантаженням в мережах розповсюдження контенту» – проведено дослідження технології передавання мультимедійного контенту, представлено концепцію та архітектуру мережі доставки контенту CDN. Розглянуто особливості послуг IPTV та OTT. Запропоновано механізми управління навантаженням в CDN-мережах для вибору оптимального маршруту та забезпечення заданої якості сервісу на основі цільової функції, основними критеріями якої 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 та покращити якість обслуговування (QoS).

Мережа розповсюдження контенту представляє собою географічно розподілену мережу передавання даних, яка містить велику кількість серверів обробки і трансляції контенту та альтернативних мережевих маршрутів. Основна задача такої мережі – забезпечення якісної доставки інформації до кінцевого користувача. Як правило, CDN складається із головного сервера, на якому знаходиться контент, та кешуючих серверів, які рознесені географічно.

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. Методи вибору є необхідними для забезпечення ефективного використання ресурсів мережі та вузлів доставки контенту [20].

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:

$$F = \min(t_i, l_i, p_i), \quad (21)$$

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 їх передавання повинні відповідати певним вимогам, а саме:

$$t_i < T_i, l_i < L_i, p_i < P_i, \quad (22)$$

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.

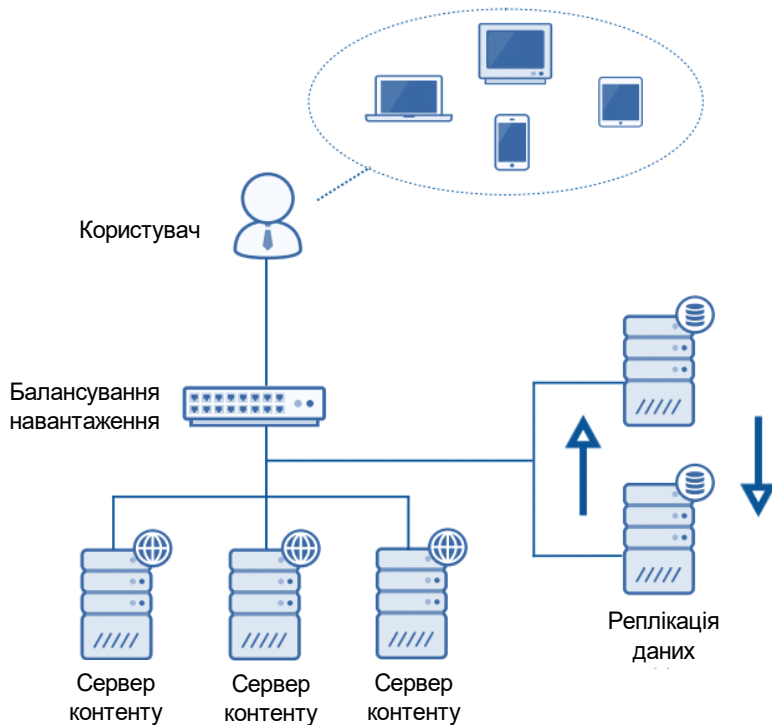


Рис.13. Схема балансування навантаження у CDN мережі [9].

завантаженості серверів обробки запитів кінцевих користувачів є використання балансування навантаження між серверами CDN мережі [26].

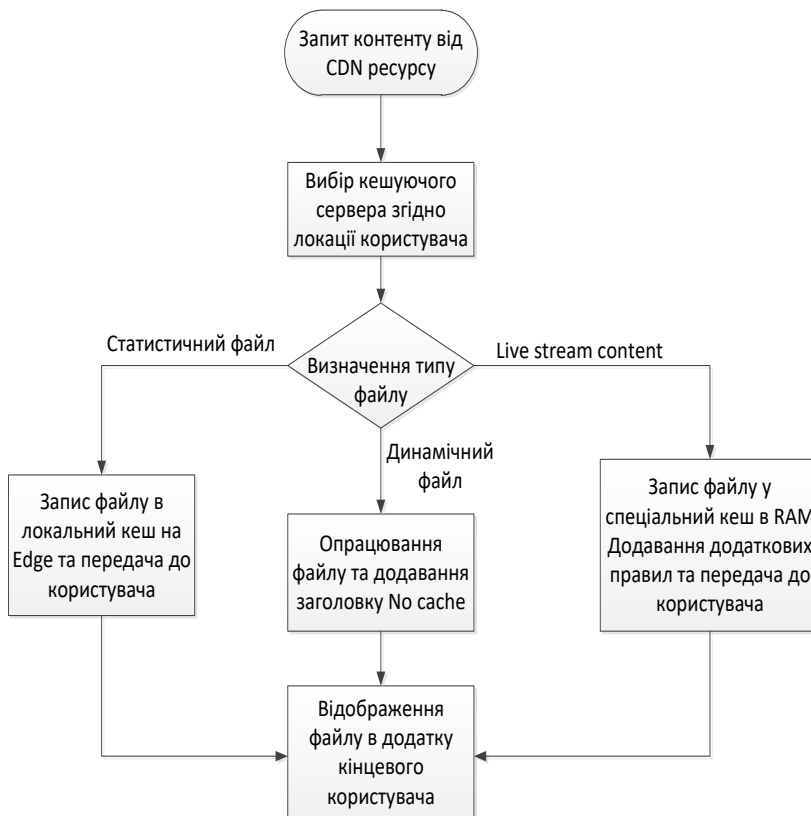


Рис. 14. Алгоритм реалізації методу передавання мультисервісного трафіку через мережу доставки контенту.

Таким чином, використання цільової функції дає змогу вибрати оптимальний кешуючий сервер, який буде опрацьовувати запити користувачів.

На рис. 13 представлено схему балансування навантаження у мережі CDN, яка містить n серверів. Для того, щоб мінімізувати значення затримки та джитера, потрібно збільшити продуктивність обслуговуючих пристроїв, або ж мінімізувати затримки між кешуючими серверами. Оскільки не завжди доцільним є нарощення ресурсів обслуговуючих пристроїв, то варіантом зменшення

Механізм балансування навантаження (алгоритм роботи якого наведено на рис.14) 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. В процесі зростання навантаження на кешуючі сервери, виникає потреба у підвищенні продуктивності, або ж збільшенні їх кількості. При використанні другого варіанту, навантаження між серверами можна рівномірно розподіляти, використовуючи технологію балансування навантаження, яка є одним з

основних елементів в CDN. 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.

Виконано експериментальне дослідження роботи кешуючих серверів мережі доставки відеоконтенту та перевірено її на відповідність критеріям цільової функції, що дало змогу покращити якість сервісу у мережах доставки контенту.

У п'ятому розділі – «Дослідження процесів обслуговування та управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах» – проаналізовано механізми формування та пріоритетного обслуговування черг в провідних та безпроводних мережах. Представлено системну модель обслуговування в безпроводних мережах, яка повинна використовуватись для ефективного розподілу ресурсів в безпроводному середовищі [41]. Проведено експериментальне визначення розміру буфера та дослідження впливу його розміру на параметри передачі трафіку. Запропоновано алгоритм регулювання параметрів якості сервісу на основі забезпечення ефективного використання протоколу каналного рівня шляхом адаптації розміру IP пакета [19].

Розроблено імітаційну модель процесу обслуговування черг в мультисервісній мережі з використанням пріоритетизації даних (рис.16). Модель реалізовано в програмному середовищі Matlab. Розроблено алгоритм оцінювання якості обслуговування в мультисервісній мережі, який враховує роботу кількох механізмів формування черг та механізмів управління перевантаженнями. Проведено

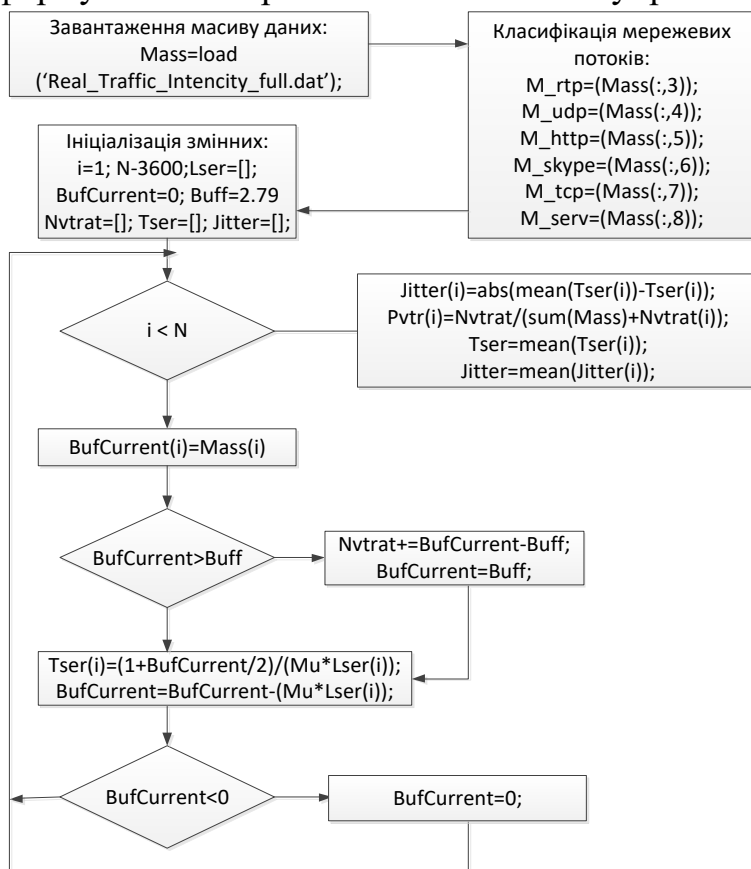


Рис. 15. Алгоритм процесу обслуговування черг з пріоритетизацією даних [15].

імітаційне моделювання роботи запропонованого алгоритму та проаналізовано отримані результати моделювання.

Запропоновано інтегральний критерій для оцінювання якості роботи механізмів формування черг та управління перевантаженнями, який враховує значення ймовірності втрат, часу затримки та джитера.

Для визначення найкращого механізму обслуговування трафіку було вибрано шість алгоритмів обслуговування: FIFO, PQ, CQ, FQ, WFQ, IWFQ. Критерієм оцінки кожного з цих алгоритмів є можливість найкращого обслуговування для кожного сервісу, тобто забезпечення найкращих параметрів QoS (ймовірності втрати пакетів, затримки, джитера).

Ймовірність втрати пакетів визначається як:

$$P_{\text{втрат}} = \frac{1}{N} \sum_k n_k, \quad (23)$$

де $P_{\text{втрат}}$ – ймовірність втрати пакета; N – загальна кількість пакетів;
 n_k – кількість втрачених пакетів за k -ий період.

Затримка являє собою тривалість обслуговування пакета і визначається як сума часу опрацювання пакета і очікування ним обслуговування в буфері.

$$\Delta T_{\text{обс}} = \Delta T_{\text{буфер}} + 2 \cdot \frac{\Delta R_{\text{пак}}}{V_{\text{шини}}} + T_{\text{обробки}}, \quad (24)$$

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 пакета; $T_{\text{обробки}}$ – тривалість опрацювання пакета у процесорі обслуговуючого пристрою; $\Delta T_{\text{обс}}$ – тривалість обслуговування пакета.

Джитер визначається як різниця між середнім значенням затримки та конкретною затримкою.

$$dt = \frac{1}{N} \sum_i |T_{\text{сер}} - T_i|, \quad (25)$$

де dt – середнє значення джитера; T_i – затримка i -го пакета; $T_{\text{сер}}$ – середнє значення затримки.

Визначено параметр для оцінювання ефекту від покращення якості обслуговування. Цей параметр показує у скільки разів покращився якісний показник обслуговування із застосуванням вибраного алгоритму, та визначається за формулою:

$$K_x = \frac{1}{m} \sum_i \frac{A_{0i}}{A_{xi}} \cdot k_i, \quad (26)$$

де K_x – оцінка покращення параметра якості для x -го алгоритму; A_{0i} – початкове значення i -го параметра якості; A_{xi} – поточне значення i -го параметра якості для x -го алгоритму; k_i – коефіцієнт значущості i -го параметра якості; m – кількість параметрів, що порівнюються. Найкращий результат моделювання показав алгоритм IWFQ, який може забезпечити задовільну якість обслуговування за всіма критеріями [14]. Цей підхід може бути використано на етапі проектування, а також оптимізації роботи CDN мережі.

Шостий розділ – «Реалізація CDN-мереж на основі глобальної мережевої інфраструктури». Описано запропоновану багаторівневу модель CDN мережі, проведено дослідження особливостей проходження мультимедійного трафіку в мережі розповсюдження контенту, представлено результати експериментальних досліджень параметрів та характеристик передавання інформаційних потоків в розподілених інфокомунікаційних системах. Проведено дослідження запропонованого алгоритму покращення параметрів QoE, проаналізовано результати моделювання та експериментальних досліджень.

Запропоновано багаторівневу модель побудови мереж доставки контенту на основі сегменту глобальної мережевої інфраструктури (рис.16). Кожна з наведених площин моделі має чітке призначення та реалізує відповідні функції мережі доставки контенту. Алгоритм розподілу запитів контенту кінцевими користувачами в мережі CDN провайдера (рис.17) описує процеси переспрямування запитів кінцевих користувачів до ресурсів CDN.



Рис. 16. Багаторівнева модель функціонування мережі доставки контенту.

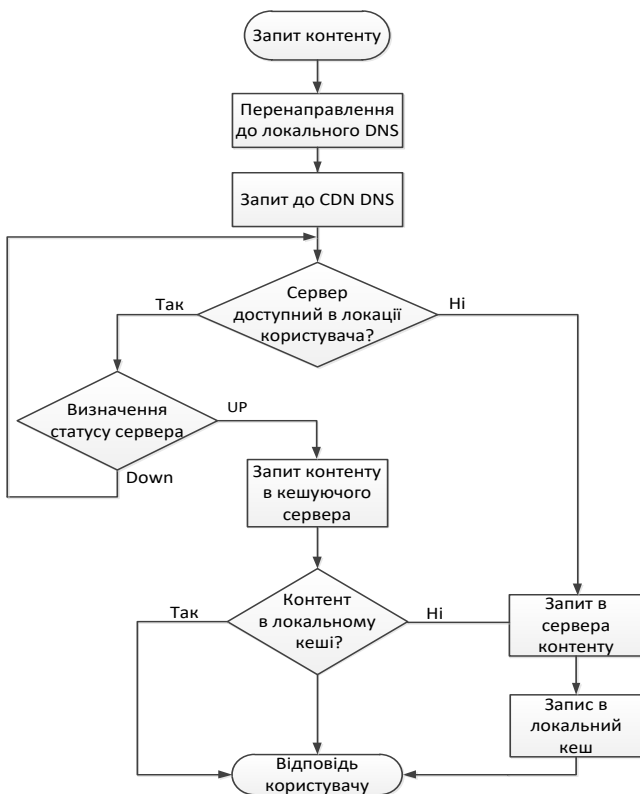


Рис. 17. Блок-схема алгоритму проходження запитів на контент.

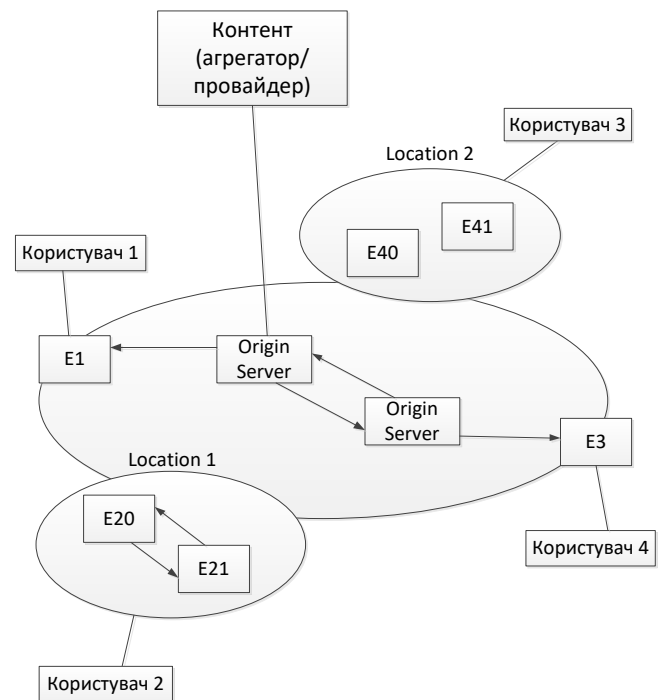


Рис.18. Платформа доступу до ресурсів.

Наступним модулем багаторівневої моделі є платформа доступу до ресурсів мережі доставки контенту (рис. 18), яка забезпечує взаємодію кінцевих користувачів із кешуючими серверами, взаємодію 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.

Платформа доступу взаємодіє із модулем перенаправлення запитів користувачів на основі DNS серверів. Схема цієї взаємодії зображена на рис. 19. Модуль перенаправлення взаємодіє із платформою доступу з однієї сторони та модулем метрик кешуючих серверів і модулем статусів кешуючих серверів з іншої. Структура даного модуля представлена на рис. 20.

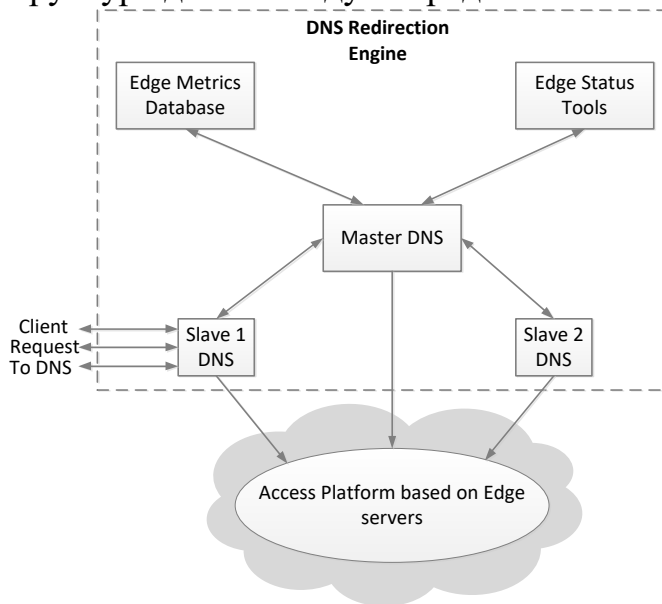


Рис. 19. Модуль перенаправлення на основі DNS.

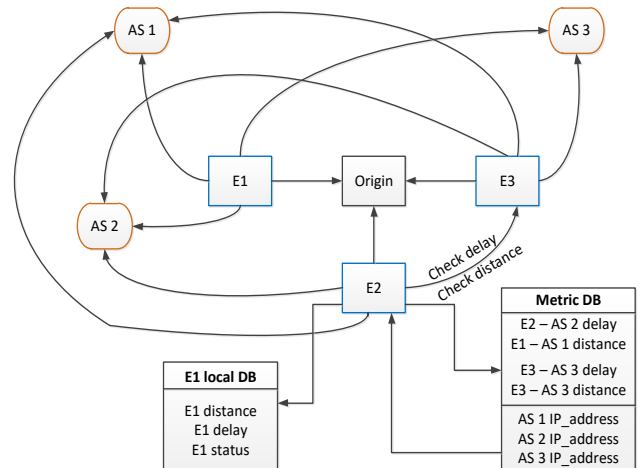


Рис.20. Структура системи контролю метрик кешуючих серверів.

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. 21. 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 передачі контенту кінцевим користувачам. Для забезпечення нормальної роботи та функціонування мережі доставки контенту запропонована система контролю роботи та функціонування сервісів, яка забезпечує моніторинг та працездатність мережевої системи в цілому та окремих її сервісів зокрема.

За результатами проведених дисертаційних досліджень було сформовано методологію синтезу мереж доставки контенту на основі глобальної інформаційної інфраструктури, елементами якої є методи, які умовно можна поділити на методи ефективного використання мережеских ресурсів, методи управління контентом та забезпечення якості послуг, а також методи балансування навантаження в інфокомунікаційних мережах (рис.22).

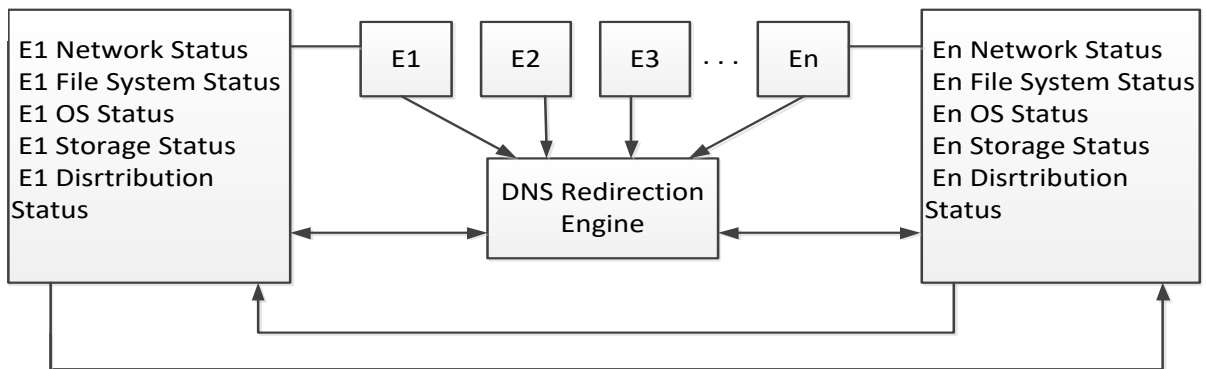


Рис.21. Система оцінки станів кешуючих серверів.

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. 22. Елементи методології синтезу мереж доставки контенту.

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 на основі сегментів ГІІ (рис. 23).

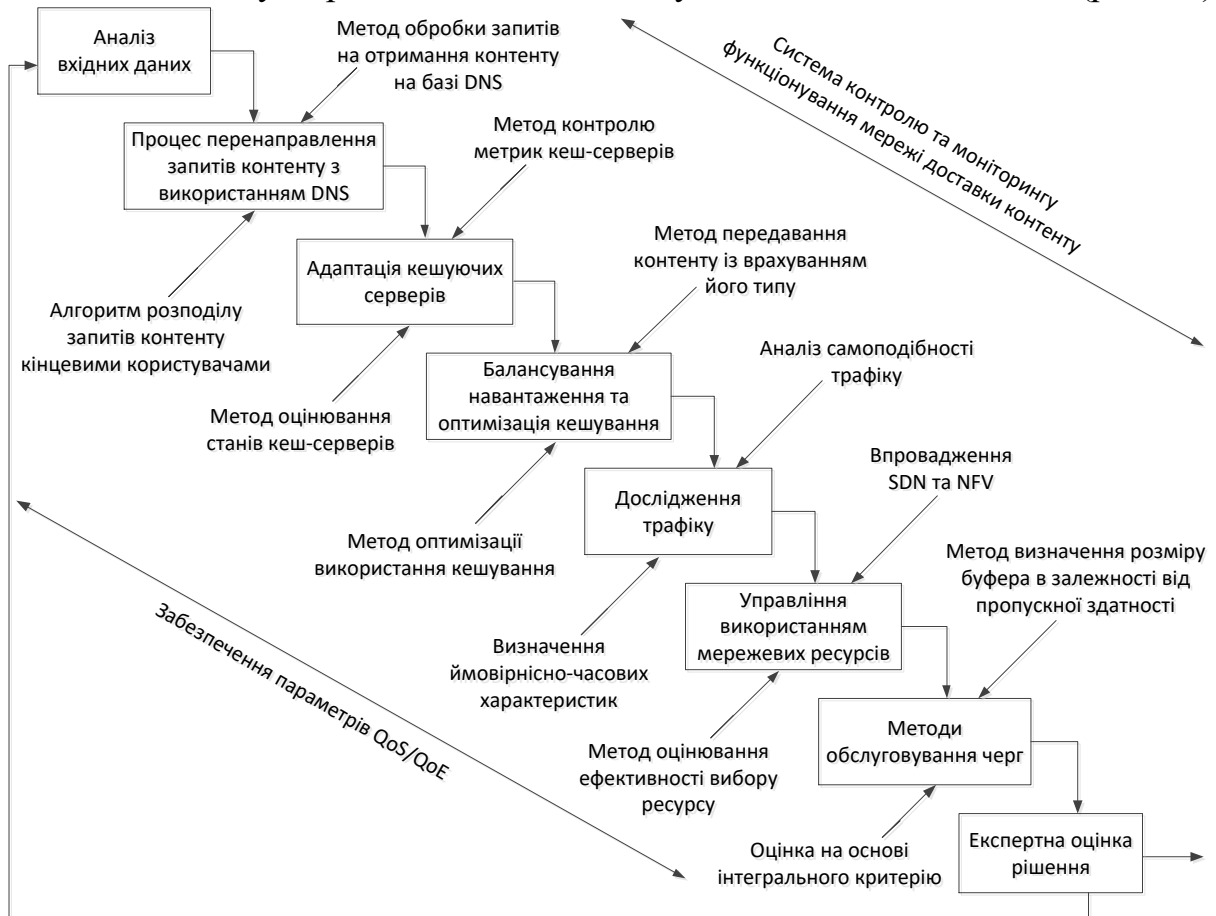


Рис. 23. Методологія синтезу мереж доставки контенту на основі сегментів ГІІ.

Дослідження ефективності застосування методології синтезу мереж доставки контенту (рис. 23) здійснювались під час впровадження мережі CDN на основі мережевої інфраструктури компанії OVH Telecom. Топологічна структура та пропускні здатності каналів компанії (європейський та північно-американський сегменти, на основі яких будувалась мережа доставки контенту) наведені на рис. 24.

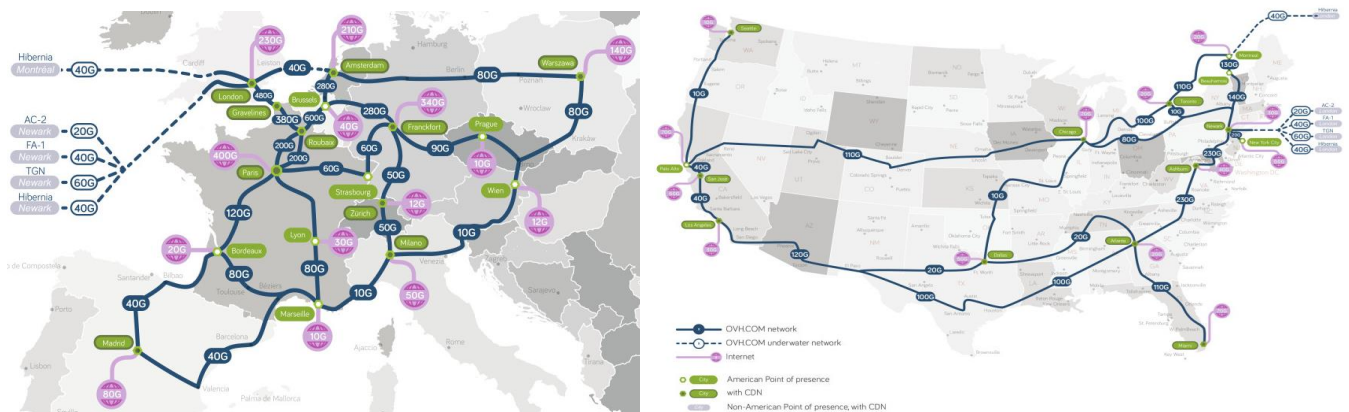
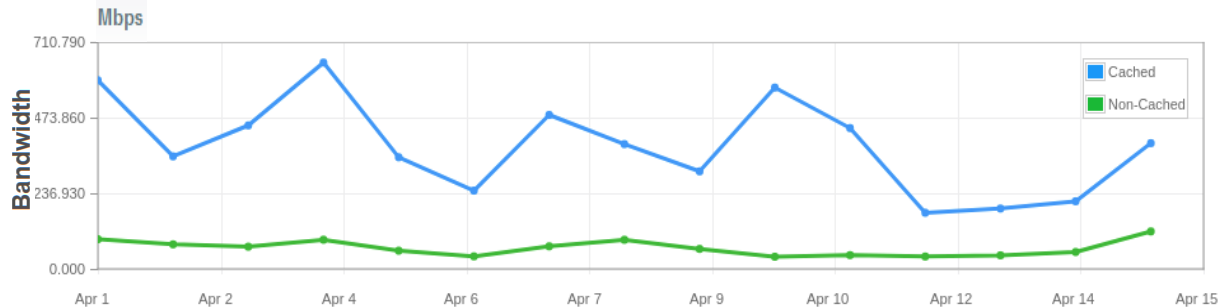
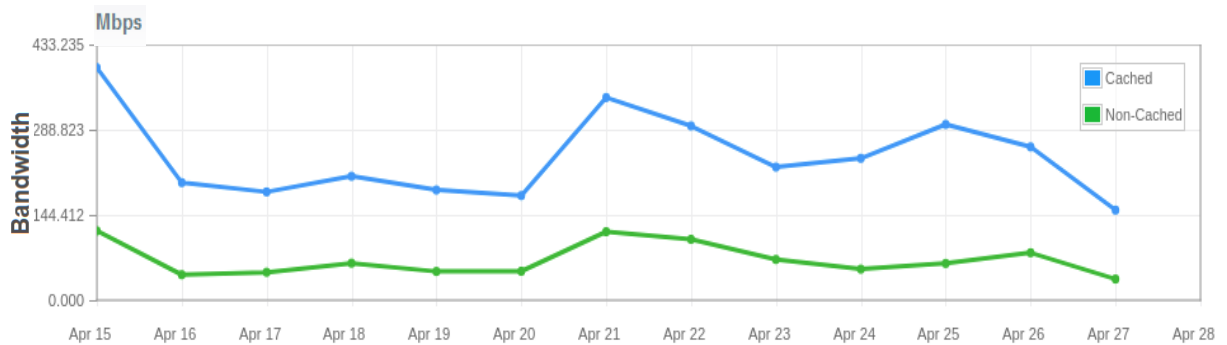


Рис. 24. Європейський та американський сегменти мережі OVH Telecom.

Результати дослідження ефективності впровадження запропонованої методології побудови мереж доставки контенту з використанням запропонованих методів управління контентом подані на рис.25. Для прикладу, на рис. 25(а) ми бачимо безпосередні результати застосування сукупності запропонованих методів, зокрема оптимізованого кешування у CDN мережі (у порівнянні із ситуацією без їх використання, див. рис. 25(б)).



а)



б)

Рис. 25. Інтенсивність трафіку від сервера походження контенту та кешуючих серверів: результати з - а) та без - б) застосування запропонованої методології.

Як видно з рис. 25, 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. Крім цього вдалось у 1.5-2 рази знизити затримку на отримання контенту кінцевими користувачами та знизити ймовірність втрати даних на шляху передавання в середньому на 15%, що підтверджує ефективність запропонованих методів управління передаванням контенту та використання мережевої інфраструктури на підставі констатації факту загального підвищення продуктивності і якості надання послуг у мережах доставки контенту в умовах збільшення його обсягів.

У **висновках** дисертаційної роботи викладено основні результати і висновки, які випливають з проведених досліджень, представлено та охарактеризовано кількісні оцінки показників ефективності управління передаванням інформації в розподілених інфокомунікаційних системах та мережах доставки контенту.

У **додатках** до дисертації долучено обрані початкові коди розробленого програмного забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список наукових праць і апробацій автора за темою дисертації.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА 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 наукової 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 в інформаційних системах, які дають змогу оцінювати та вибирати параметри 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 трафіку, що 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 безпровідній 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 пропускну 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 знизити 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 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 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 одержанні послуг, що дало змогу обрати найбільш ефективну PaaS реалізацію методу побудови мережевої системи доставки контенту та зменшити в 1.5-2 рази час перемикання між відеопотоками.

10. У якості розвитку багаторівневої структурної моделі CDN-мережі, розроблено методологію її синтезу на основі сегменту існуючої глобальної мережевої інфраструктури, яка забезпечує ефективне використання мережевих ресурсів за рахунок динамічного балансування трафіку, уникнення перевантажень мережевого обладнання, що дало змогу підвищити системну продуктивність та загальну якість надання послуг.

11. На основі застосування розроблених в межах запропонованої методології методів ефективного використання мережевих ресурсів, управління контентом та забезпечення якості послуг і балансування навантаження в інфокомунікаційних мережах виявлено, що під час впровадження мережі доставки контенту на основі мережевої інфраструктури компанії OVH Telecom досягнуто зменшення в 2-2.5 рази завантаженості основного сервера, зниження в 1.5-2 рази затримки, яку отримує кінцевий користувач при одержанні контенту, а також, в середньому на 15%, зниження ймовірності втрати даних на шляху передавання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

(наведено згідно чинного Наказу МОНМС України № 1112 від 17.10.2012, п. 2.1)

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.
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. (наукове фахове видання, МНБ ICI, 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 напрямку, 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 ICI, ISSN 0321-0499)
5. 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. (іноземне наукове періодичне видання з напрямку, 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; 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.(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. Плєсканка М. В. Оцінка ефективності методів спектральної мобільності у когнітивних радіомережах/М.В. Плєсканка, М.І. Кирик, В.Б. Янишин // Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". — Львів, 2016. — № 849. — С. 194–202. (наукове фахове видання, МНБ ICI, 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 ICI, 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 // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія "Радіоелектроніка та телекомунікації"*. – 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 кодексу x264 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 пакету / 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. Плесканка // Комп'ютерні технології друкарства. Зб. наук. пр. – Львів: Укр. акад. 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. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.48. – К.: 2008. – С. 161-169. (наукове фахове видання, ISSN 2309-7647)

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)

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)

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 (Zakarpattya), Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 306-308. (МНБ, Scopus)

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, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. - P. 289-291. (МНБ, Scopus)

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)

30. Maksymyuk T. Opportunistic Tri-Band Carrier Aggregation in Licensed and Unlicensed Spectrum for Multi-Operator 5G HetNet / T. Maksymyuk, M. Kyryk, Minho 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)

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)

32. Kyryk M. Performance Comparison Of Cognitive Radio Networks Spectrum Sensing Methods / M. 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)

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. (Google Scholar)

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. (МНБ, Scopus)

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. (МНБ, Scopus)

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. (Google Scholar)

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 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.

41. Кирик М.І. Системна модель обслуговування черг в безпроводних мережах / М.І. Кирик, Н.М. Плєсканка // Матеріали конференції, XXXIII науково-технічна конференція “Моделювання”. ПІМЕ 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. (Google Scholar)

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)

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 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. (МНБ, Scopus)

47. Кирик М.І. Визначення залежності якості відеосигналу від параметрів кодек 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. Плєсканка // XXX Науково-технічна конференція “Моделювання“. ПІМЕ 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. 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. (МНБ, Scopus)

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)

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.

АНОТАЦІЯ

Кирик М.І. Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. 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 інформації в умовах збільшення її обсягів.

В 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.

Визначено критерії класифікації типів трафіку сучасних мультисервісних мереж та методику його ідентифікації, яка дозволяє отримати динамічну модель трафіку та адекватно підбирати алгоритми керування процесами передавання даних в інфокомунікаційних мережах.

Запропоновано методи підвищення ефективності використання радіочастотного спектру та покращення параметрів якості надання мультисервісних послуг в когнітивній безпроводній мережі доступу із можливістю адаптивного налаштування параметрів обладнання та мінімізацією тривалості прийняття рішення про зміну радіочастотних каналів.

Проведено дослідження технології передавання мультимедійного контенту,

представлено концепцію та архітектуру мережі доставки контенту. Запропоновано механізми управління навантаженням в CDN-мережах для вибору оптимального маршруту його передавання та забезпечення заданої якості сервісу на основі впровадженої цільової функції.

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 ефективнішого використання мережевих ресурсів.

Ключові слова: мережі доставки контенту, CDN, інфокомунікації, глобальна інформаційна інфраструктура, управління трафіком, QoS, QoE.

АННОТАЦИЯ

Кирик М.И. Методы и модели управления контентом в распределенных инфокоммуникационных системах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, г. Львов, 2018.

Диссертационная работа посвящена проблеме управления передачей информации в распределенных инфокоммуникационных системах и сетях доставки контента с целью эффективного использования сетевых ресурсов глобальной информационной инфраструктуры в целом, и ее национального сегмента в частности, путем повышения производительности процессов передачи информации в условиях увеличения ее объемов.

В работе представлено решение проблемы разработки методологического обеспечения управления передачей информации в распределенных инфокоммуникационных системах и сетях доставки контента с целью эффективного использования сетевой инфраструктуры, повышения системной производительности и качества предоставления услуг за счет динамической балансировки нагрузки.

Определены критерии классификации типов трафика современных мультисервисных сетей и методика его идентификации, которая позволяет получить динамическую модель трафика и адекватно подбирать алгоритмы управления процессами передачи данных в инфокоммуникационных сетях.

Предложены методы повышения эффективности использования радиочастотного спектра и улучшение параметров качества предоставления мультисервисных услуг в когнитивной беспроводной сети доступа с возможностью адаптивной настройки параметров оборудования и минимизацией длительности принятия решения об изменении радиочастотных каналов.

Проведено исследование технологии передачи мультимедийного контента, представлена концепция и архитектура сети доставки контента. Предложены механизмы управления нагрузкой в CDN-сетях для выбора оптимального маршрута

ее передачи и обеспечения заданного качества сервиса на основе внедренной целевой функции.

Предложена методология синтеза сетей доставки контента на основе сегмента глобальной сетевой инфраструктуры, учитывающая методы ресурсного управления, сквозного оценивания их параметров, качества сервиса и состояния активного сетевого оборудования, а также динамической балансировки нагрузки, что позволило повысить системную производительность и качество предоставления инфокоммуникационных услуг за счет более эффективного использования сетевых ресурсов.

Ключевые слова: сети доставки контента, CDN, инфокоммуникации, глобальная информационная инфраструктура, управление трафиком, QoS, QoE.

ABSTRACT

Kyryk M.I. Methods and models for content management in distributed infocommunication systems. – On the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Doctor of Engineering Science degree on specialty 05.12.02 - telecommunication systems and networks. - 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. Management of multiservice streams requires using system models and algorithms of traffic management to optimize the performance of networks.

The dissertation presents the solution to the 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.

In order to increase the productivity and efficiency of the information transmission control in the content delivery networks during content volume growth, there have been developed the model of self-similar multiservice traffic in distributed networks of streaming user load transmission as well as the mathematical model of probabilistic-time characteristics of the multiservice network. These models take into account the structural and functional features of the access level architecture.

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 select adequately the algorithms of transmission control in the infocommunication networks.

The approaches that are used to determine the degree of self-similarity for network traffic are presented. The mathematical modeling was carried out to determine the quality of service parameters, which confirmed that the use of arbitrary methodology for calculating service quality parameters is inadmissible for traffic with self-similarity characteristic.

The methods for increasing the efficiency of using the radio frequency spectrum and for improving the service quality in the cognitive wireless access network with the

possibility of equipment parameters' adaptive adjustment are proposed. As a result time used for decision on the change of radio frequency channels was reduced.

The multimedia content transmission technology, concept and architecture of the content delivery network are considered. The mechanisms of load management in CDN networks are proposed to choose the optimal route and provide quality of service with the usage of the contributed target function. The main load balancing methods are considered, which allow to rationally distribute the load between servers of the network and improve the quality of service.

The system service model in wireless networks is presented, which should be used for efficient allocation of resources in a wireless environment. The simulation model for servicing queues of the multiservice network with the use of data prioritization was developed. A comparative analysis of the operation of queuing algorithms in wired and wireless networks for different types of streams was conducted. An algorithm for assessing the quality of service in the multiservice telecommunication network, which takes into account the work of several mechanisms of queuing and overload management was developed.

The synthesis methodology of content delivery networks based on the segment of global network infrastructure was proposed. It takes into account resource management methods, cross-sectional evaluation of their parameters, quality of service and the state of active network equipment, as well as dynamic load balancing, which made it possible to increase the system productivity and quality of infocommunication services by more efficient use of network resources.

Key words: Content Delivery Network, CDN, infocommunication, Global Information Infrastructure, traffic engineering, QoS, QoE.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГІІ – глобальна інформаційна інфраструктура; CDN – Content Delivery Network – мережа доставки (розповсюдження) контенту; ISP – Internet Service Provider – провайдер послуг Інтернету, Інтернет-провайдер; LTE – Long Term Evolution – довготерміновий розвиток систем мобільного зв'язку (група концепцій та стандартів); MIMO (Multiple Input Multiple Output) – технологія просторового рознесення передавальних і приймальних антен; NaaS – Network as a service – мережа як послуга; NFV – Network Functions Virtualization – віртуалізація мережевих функцій; OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – метод мультиплексування; OTT – Over-The-Top Service – доставка відео та аудіо без причетності ISP; PaaS - Platform as a Service – платформа забезпечення, як сервіс; PoP – Point of Presence – точка (операторської) присутності; TE – Traffic Engineering – управління трафіком; QoE – Quality of Experience – якість сприйняття сервісу; QoS – Quality of Service – якість сервісу; SDN – Software-defined Networking – програмно-конфігурована мережа.

