

07-72-73/2  
20.06.2019р.

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**  
**на дисертаційну роботу Кирика Мар'яна Івановича на тему: «Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.12.02 - телекомунікаційні системи та мережі**

**Актуальність теми.**

Динаміка розвитку інфокомунікаційних технологій та збільшення різноманітності послуг неминує веде до побудови вискоефективної інформаційної інфраструктури, основою для якої слугуватимуть існуючі телекомунікаційні системи. Дуже актуальним та водночас непростим завданням є створення відповідного інфокомунікаційного середовища, за допомогою якого відбуватиметься впровадження новітніх інфокомунікаційних технологій. Адже формування чіткої та продуманої стратегії розбудови сфери інфокомунікацій сприятиме розвитку ринку інноваційних мультимедійних послуг та його успішній комерціалізації, а, відтак, і підвищенню інноваційної активності та забезпеченню інноваційної діяльності суб'єктів цієї галузі, оскільки інформація стає таким же стратегічним ресурсом, як традиційні матеріальні та енергетичні ресурси.

Особливої уваги, при інтеграції сучасних інфокомунікаційних сервісів в існуючі телекомунікаційні мережі, потребує розгляд питань управління передаванням інформації в розподілених інфокомунікаційних системах, оскільки оператори фіксованих та мобільних мереж говорять про щорічне зростання обсягів трафіку та зростання вимог до якості надання послуг. Очевидно, що надалі операторам доведеться постійно працювати в напрямку забезпечення бажаної якості обслуговування для кожної складової гетерогенного трафіку, постійно вирішуючи досить складне багатопараметричне завдання визначення прийняттого рівня якості в умовах постійного зростання числа користувачів та появи нових видів послуг. Зайве говорити, що все пов'язано інвестиціями, які необхідні оператору для забезпечення відповідних технічних параметрів телекомунікаційної інфраструктури.

Світова практика показує, що мережеві ресурси, зокрема канали зв'язку і їх пропускна здатність, будуть являти собою різновид дефіциту протягом ще досить тривалого часу на багатьох транспортних телекомунікаційних мережах. При цьому мінімізація наявних у оператора мережевих ресурсів завжди буде бажаною з точки зору економії каналної ємності та відповідних капіталовкладень.

Ці та інші важливі питання, які є передумовами створення вискоефективної інформаційної інфраструктури із забезпеченням відповідного рівня продуктивності мереж і належної якості та часу доставки всього спектру сучасних інфокомунікаційних послуг, детально розглянуті, опрацьовані та проаналізовані в докторській дисертації Кирика Мар'яна Івановича на тему «Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах». Проведені автором дослідження є актуальними та своєчасними і мають високу практичну цінність для застосування в сфері інфокомунікацій.

Дисертаційні дослідження виконувались у межах ряду держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт Національного університету «Львівська політехніка», в яких здобувач брав участь як виконавець.

**За структурою** дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, а також 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.

У **вступі** обґрунтовано напрям дисертаційних досліджень, актуальність теми роботи, сформульовано наукову проблему, мету та завдання досліджень. Докладно подано відомості щодо наукового та практичного значення виконаних автором досліджень, а також відомості про апробацію, впровадження результатів дисертаційної роботи, їх опублікування.

У **першому розділі** дисертації проведено ґрунтовний аналіз розвитку інфокомунікаційних систем і процесів конвергенції телекомунікаційних та інформаційних мереж, представлено властивості та класифікацію основних інфокомунікаційних послуг. Сформульовано проблеми розподілу ресурсів та обґрунтовано завдання досліджень у галузі розподілених інфокомунікаційних систем згідно тематики дисертаційної роботи та визначено вимоги до управління трафіком в сучасних інформаційно-телекомунікаційних мережах та системах.

У **другому розділі** дисертаційної роботи основна увага приділяється методам та моделям підвищення ефективності передавання інформації. Здійснено дослідження мультисервісного трафіку та визначено його ймовірно-часові характеристики, удосконалено модель самоподібного мультисервісного трафіку, наведено результати імітаційного та аналітичного моделювання та проведено їх порівняльний аналіз. Представлено методи, які використовуються для визначення ступеню самоподібності мережевого трафіку. Запропонована комплексна методика ідентифікації трафіку в інфокомунікаційних мережах.

**Третій розділ** присвячено моделювання та дослідження методів передавання контенту в безпроводних мережах доступу. Проведено аналіз систем з використанням технології когнітивного радіо, запропоновано імітаційну модель системи керування когнітивною мережею та виконано моделювання когнітивної радіомережі. Розроблено імітаційну модель процесу оцінювання ефективності методів вибору вільних радіоканалів. Описано розроблений на основі імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею програмний комплекс для дослідження ефективності роботи запропонованих алгоритмів сканування, спільного використання та забезпечення мобільності спектру. Запропоновано новий підхід для агрегації частот у ліцензованій та неліцензованій смугі для мереж LTE та WiFi з метою підвищення пропускних здатностей безпроводних мереж доступу.

**Четвертий розділ** дисертації присвячено розробці методів управління контентом в інфокомунікаційних мережах. Проведено дослідження архітектури мереж доставки контенту та методів забезпечення передачі даних з необхідною якістю, розроблено метод передавання мультисервісного контенту через CDN мережу. Виконано експериментальне дослідження методів балансування навантаження та запропоновано метод балансування навантаження між серверами роздачі контенту, що забезпечує розподіл навантаження між серверами та покращення якості обслуговування. Доведено необхідність використання експертної оцінки сприйняття якості послуг споживачами та здійснено експериментальні дослідження найбільш поширених проблем якості сприйняття послуг.

У **п'ятому розділі** роботи проведено дослідження механізмів формування черг та їх обслуговування в провідних та безпроводних мережах, розроблено модель процесу обслуговування черг та представлено результати моделювання для різних типів потоків. Розроблено алгоритм обслуговування черг та імітаційну модель для визначення найкращого механізму обслуговування мультимедійного трафіку. Запропоновано інтегральний критерій оцінювання якості роботи механізмів формування черг та механізмів управління перевантаженнями з урахуванням ймовірності втрат, часу затримки та джитера. Проведено експериментальне дослідження впливу розміру буферів на параметри передачі трафіку та визначення оптимального розміру буфера.

**Шостий розділ** дисертації присвячено реалізації мереж доставки контенту на основі діючої глобальної мережевої інфраструктури. Запропоновано багаторівневу модель побудови мереж доставки контенту та описано функції відповідних рівнів. Проведено дослідження ефективності використання мережі CDN та особливостей передавання мультисервісного трафіку. Розроблено метод покращення параметрів QoE та модель процесу переспрямування замовленого потокового контенту. Для підвищення продуктивності та якості надання інфокомунікаційних послуг за рахунок більш ефективного використання мережевих ресурсів запропоновано методологію синтезу мереж доставки контенту.

У **висновках** надано загальну характеристику результатів, отриманих у результаті виконання дисертаційної роботи, числові оцінки ефективності застосування запропонованих методологій та рішень.

У **додатках** до дисертаційної роботи представлено код програм, реалізованих в середовищі GPSS World для моделювання процесів обслуговування мультисервісного потокового навантаження, фрагменти програмного коду реалізації програмного комплексу на основі імітаційної моделі системи керування когнітивною радіомережею, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

**Практичне значення** одержаних у дисертації результатів полягає в удосконаленні методології побудови та багаторівневій моделі 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 більш ефективного використання мережевих ресурсів.

Варто відзначити такі практичні особливості розроблених методів і моделей. На основі математичного моделювання та розробленої імітаційної моделі одержано співвідношення для розрахунку оптимальних параметрів якості обслуговування мультисервісного трафіку. На 12-15% підвищено показники якості сервісу та забезпечено підтримку вказаних значень упродовж усього періоду експлуатації мережевої системи. 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. 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. 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. За результатами моделювання для оцінювання ефективності запропонованих безпроводних рішень, показано тенденцію до збільшення середньої швидкості передавання користувацьких даних до 40%. Також уперше 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. Це 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), ТзОВ «ЛІТех», OVH Telecom (Франція, Канада), у ТзОВ ВКФ «Радіо Сервіс «Лімітед», у ТзОВ «ТРК Західтелесервіс», що свідчить про науково-практичну цінність одержаних у дисертації результатів. Також їх використано у навчально-науковому процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсів лекцій зі спеціалізованих дисциплін.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в тому, що:

Вперше запропоновано:

- метод для оцінювання ефективності вибору радіочастотного каналу в когнітивній безпроводній мережі доступу, який 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;

- 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;

- модель процесу переспрямування замовленого потокового контенту, яка враховує QoE оцінку користувачів при одержанні послуг, що дало змогу визначити найбільш ефективну PaaS реалізацію методу побудови CDN мережевої системи;

- 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.

Набули подальшого розвитку:

- модель самоподібного мультисервісного трафіку в розподілених мережах передавання потокового користувацького навантаження, яка 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;

- математична модель ймовірно-часових характеристик мультисервісної мережі, яка враховує структурно-функціональні особливості архітектури рівня доступу в мережах доставки контенту, що дало змогу більш точно описати його затримку та джитер;

- 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.

Таким чином, за сукупністю одержаних автором науково-практичних результатів розроблено 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.

## **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації, їх достовірність.**

Ступінь обґрунтованості отриманих у дисертації наукових положень і висновків є достатнім та підтверджується проведенням досліджень із коректним застосуванням відомих теоретичних та чисельних методів, співпадінням теоретичних результатів із експериментальними даними та практичним ефектом у телекомунікаційній та ІТ-галузях, що підкріплено актами впровадження. Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи базуються на загальновідомих фундаментальних положеннях теорії ймовірності та математичної статистики, теорії системного аналізу, теорії телекомунікаційних систем, методах моделювання, а отже є достовірними.

Ступені наукової новизни положень дисертації, що представлена здобувачем визначено коректно. В роботі запропоновано низку методів, підходів, програмних механізмів, які підвищують технічні, та й, в цілому, економічні показники розглянутих інфокомунікаційних систем і мереж доставки користувачького контенту.

Результати дисертаційної роботи є науково-обґрунтованими, оригінальними, підтвердженими шляхом моделювання та експериментально. Застосовані автором методи дослідження відповідають її проблематиці, є використаними якісно. Стиль викладення результатів дослідження є науковим, якість редагування – достатньо високою.

**Публікації та апробація результатів дисертаційної роботи.** За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 52 наукових праці, серед них 1 – монографія, 23 статті у наукових фахових виданнях (всі статті у науковій періодиці, що входить до міжнародних наукометричних баз різного рівня, включаючи Web of Science, Scopus, Index Copernicus, Google Scholar тощо), 1 патент України, у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 27, з них індексованих у наукометричній базі Scopus – 11.

Автореферат ідентично розкриває основні положення дисертації, її наукові результати, які отримані особисто здобувачем.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Перша частина п. 2.1. носить оглядовий характер та могла б бути перенесена у перший розділ дисертаційної роботи.

2. Не зовсім зрозумілою є схожість отриманих залежностей наведених на рис. 2.21 та 2.22.

3. У формулі 2.40 змінна  $W$  позначає середній час перебування заявки в черзі, а в формулі 2.41 та ж змінна позначає ємність запам'ятовуючого пристрою.

4. На с.119 сказано, що розрахунок для певних систем масового обслуговування здійснюється за спрощеними формулами, що може спричиняти певні похибки. Проте, не вказано рівень цих похибок чи їх допустимі межі

5. В п.3.3.4. описана математична модель OFDM сигналу, проте не зрозуміло, яким чином вона використовується у роботі.

6. Наведенні на рис. 4.8 (а, б) та рис. 4.9 (а, б) графічні залежності для кращого наочного сприйняття отриманих результатів доцільніше було б об'єднати на одному графіку відповідно.

7. На с.237 наведено алгоритм адаптації розміру пакету згідно вимог якості сервісу, який використовує такі параметри якості сервісу як затримка пакетів та джитер. Доречним було б врахувати ще й ймовірність втрат пакетів.

До суті дисертаційної роботи зауважень немає. Робота є оригінальною. Незначна кількість наведених недоліків не применшує позитивного враження від роботи. Дисертація відповідає чинним вимогам МОН, які пред'являються до докторських дисертаційних робіт, а також заявленій спеціальності.

### Загальні висновки.

Дисертаційна робота Кирика Мар'яна Івановича «Методи та моделі управління контентом в розподілених інфокомунікаційних системах», є завершеним, самостійним, виконаним на високому науковому рівні дослідженням, в якому автором представлено новий підхід до вирішення наукової проблеми 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. Дисертаційна робота є актуальною, відрізняється науковою новизною, практичним значенням, виконана на достатньому фактичному матеріалі з використанням сучасних методів дослідження і методики наукового дослідження, її положення науково обґрунтовані.

Наведене вище дозволяє зробити висновок про те, що дисертаційна робота цілком відповідає вимогам пункту 10 Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567 (зі змінами), щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук - містить наукові положення та нові науково обґрунтовані теоретичні і практичні результати, що забезпечили розв'язання важливої науково-прикладної проблеми - а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 - телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент:  
професор кафедри автоматики та  
робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка  
Національного університету  
біоресурсів і природокористування України  
доктор технічних наук, професор

В.В. Коваль

