

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

БЕШЛЕЙ МИКОЛА ІВАНОВИЧ



УДК 621.391

**СИНТЕЗ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕНЦІЙНО-ОРІЄНТОВАНИХ
ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ АДАПТИВНОГО НАДАННЯ
СЕРВІСІВ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2021

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
Ложковський Анатолій Григорович,
Одеська національна академія зв'язку імені О.С. Попова,
завідувач кафедри комутаційних систем;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Скулиш Марія Анатоліївна, Національний технічний
університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри
інформаційно-телекомунікаційних мереж;

доктор технічних наук, професор
Єременко Олександра Сергіївна, Харківський
національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри інфокомунікаційної інженерії імені
В.В. Поповського.

Захист дисертації відбудеться “6” травня 2021 р. о 12⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 217 головного навчального корпусу).

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

Автореферат розісланий “5” квітня 2021 р.

*В.о. ученого секретаря спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., професор*



Р.Л. Голяка

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із пріоритетних напрямів державної політики є розвиток інформаційного суспільства в Україні та впровадження новітніх інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) в усі сфери суспільного життя. Саме тому, вчені різних світових та українських шкіл особливу увагу приділяють вирішенню різноманітних наукових проблем в напрямку розвитку існуючих технологій безпроводних і провідних систем зв'язку, починаючи від оптимізації процесів управління трафіком та розподілу мережевих ресурсів пов'язаних з побудовою ефективних, гнучких структур – до підвищення надійності, якості обслуговування, безпечності передавання даних та швидкодії окремих компонент систем мережного управління.

Керівники департаментів розвитку телекомунікаційних технологій та зв'язку, що відповідають за інфраструктуру та експлуатацію інформаційних систем і мереж (2G-5G, IoT, LAN, WAN, Big Data, Cloud) одногосно приходять до висновку, що велика кількість, складність і частота введення нових функцій у мережі зв'язку потребували нового підходу, який би кардинально змінив всі аспекти створення мереж, надання послуг та експлуатаційного управління. За їх висновками встановлено, що можливості традиційних мереж обмежені, не відповідають сучасним вимогам і є стримуючим чинником на шляху впровадження нових інфокомунікаційних послуг, що базуються на адаптивному наданні сервісів, враховуючи наміри користувача чи корпоративної структури щодо захищеності та якості їх обслуговування. Розв'язання всього комплексу завдань адаптивного автоматичного управління потоками даних та цілою інфраструктурою в умовах змін значущості інформаційних бізнес-процесів складно реалізувати за допомогою існуючих методів та мережевих технологій. Оскільки зміна критеріїв оптимальності керуючих рішень вимагає постійного експертного та адміністративного втручання, яке в більшості призводить до значних операційних помилок і, як наслідок, часових та фінансових витрат на їх вирішення. Головна проблема більшості інфокомунікаційних мереж в тому, що вони побудовані на основі пропрієтарного обладнання, функціонал якого реалізований апаратно, вимагає спеціалізованих знань системного адміністратора та є закритим для внесення змін щодо функціонування мережі спрямованої на потреби користувачів. Кожне додавання або зміна функцій системним адміністратором в мережевій інфраструктурі, як правило, призводить до складних завдань розгортання, які необхідно заздалегідь ретельно спланувати. В іншому випадку це додавання або зміна можуть негативно вплинути на ефективність функціонування цілої мережевої інфраструктури.

Таким чином, невідповідність технічних можливостей адаптації традиційної інфраструктури ІКТ до швидких мінливих вимог ринку, зумовила появу принципово нового концептуального підходу – до створення програмно-конфігурованих інтенційно-орієнтованих мереж (Intent-Based Software-Defined Network), які в майбутньому дадуть змогу трансформувати існуючі в даний момент статичні мережі в гнучкі, програмовані платформи з інтелектом для динамічного розподілу ресурсів, з масштабованістю для підтримки великомасштабних центрів обробки даних та із віртуалізацією – для роботи в динамічному, автоматизованому і безпечному хмарному середовищі.

Із розвитком бізнесу, різноманітності сервісів та вимог користувачів до якості обслуговування, інтенційно-орієнтовані мережі (Intent-based Network, IBN) виходять

на перший план, як інструмент для інтелектуального управління гетерогенними мережами, який дає змогу абстрагуватися від деталей конфігурації і функціонування окремих елементів мережі та зосередитися на поведінці цілої мережі, як системи для надання сервісу відповідно до вимог та гарантування якості обслуговування на основі намірів користувачів. Основний принцип IBN полягає в перетворенні інформаційних бізнес-намірів користувачів до відповідних конфігурацій мережі для всіх пристроїв на основі мережної аналітики та машинного навчання. Саме тому, дослідження принципів функціонування таких мереж та розроблення методів та засобів їх впровадження є важливим завданням як для гравців телекомунікаційного ринку, так і для науковців.

Помітний внесок у розробку теоретичних аспектів та концептуальних моделей, щодо проблематики побудови програмно-конфігурованих інформаційних мереж широко досліджувалася українськими та зарубіжними вченими. Зокрема, варто виділити роботи українських вчених, а саме: Лемешка О.В., Єременко О.С., Ложковського А.Г. в яких пропонуються рішення стосовно оптимізації процесу маршрутизації інформаційних потоків та розподілу мережових ресурсів з метою покращення якості обслуговування кінцевих користувачів; Глоби Л.С., Скулиш М.А., Беркман Л.Н., Стрелковської І.В. в яких освітлено питання управління складною мережною інфраструктурою на основі технології SDN та NFV для забезпечення основних показників якості обслуговування; Толюпи С.В., Кулакова Ю.О., Конаховича Г.Ф., Радивилової Т.А. наукові праці яких, спрямовані на забезпечення захисту інформації в телекомунікаційних мережах. Серед численних напрацювань зарубіжних вчених, варто виділити напрацювання: D. Comert останні роботи якого присвячені дослідженню побудови концепцій інтенційно-орієнтованих мереж на основі технології SDN; F. Callegati, X. Li, які досліджують автоматизоване управління та захист даних в майбутніх програмно-конфігурованих мережах; O. Ozkasap, J. Galán-Jiméne S. Abdellatif, які займаються розробкою методів для підвищення енергоефективності в програмно-конфігурованих мережах.

Аналіз напрацювань вітчизняних та зарубіжних учених підтверджує актуальність тематики досліджень як в Україні, так і за її межами. Проте, існуючі науково-теоретичні методи та технічні рішення є або концептуальними та важко реалізованими, або зосереджені лише в межах стандартизованої функціональності SDN, що не дають змоги в комплексі вирішити проблему синтезу та реалізації інтенційно-орієнтованих мереж, які повинні одночасно забезпечувати інтелектуальне управління мережею, необхідні параметри якості обслуговування та безпеку даних в умовах обмеженості мережових ресурсів та постійної потреби реінжинірингу бізнес-процесів користувачів корпоративних підприємств в режимі реального часу функціонування мережі. Для повноцінної реалізації таких мереж необхідно розробити уніфіковані програмно-апаратні засоби, які дають змогу реалізувати нові методи, моделі та алгоритми адаптивного інтелектуального управління ресурсами та якістю обслуговування в гетерогенних інфокомунікаційних мережах з гармонійним поєднанням сучасних методів мережної аналітики та машинного навчання. Таким чином, перетворюючи стандартні інфокомунікаційні мережі на автоматизовані інтелектуальні системи, що працюють на основі намірів користувачів та дають змогу вирішувати певний спектр технічних мережових проблем і аналізувати їх без участі системного адміністратора.

Виходячи з *існуючого протиріччя* між функціональними можливостями сучасних пропріетарних інформаційно-комунікаційних систем і необхідністю постійної адаптації під мінливі вимоги бізнес-користувачів щодо якості надання сервісів та автоматизованого розгортання мережевої інфраструктури для ефективного процесу обміну даними, актуальною *науково-прикладною проблемою* є розроблення методології аналізу та синтезу складних гетерогенних інфокомунікаційних систем з метою створення нової програмно-конфігурованої інтенційно-орієнтованої мережі, яка постійно на основі мінливих вимог користувачів щодо якості надання сервісів та розгортання інфраструктури навчається, адаптується, автоматизується і захищається від потенційних кібератак шляхом використання нових методів розподілу ресурсів, інженерії трафіку, мережевої аналітики та існуючих алгоритмів машинного навчання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з положеннями «Концепції розвитку телекомунікацій в Україні», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні» та рекомендацій щодо «Реформ галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвитку інформаційного простору України».

Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напряму кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» - «Інфокомунікаційні системи та мережі», в межах низки держбюджетних науково-дослідних робіт: «Методи побудови та моделі інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN-технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN), (№ держреєстрації 0115U000444, (2015-2016 рр.) – *учасник*); «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G), (№ держреєстрації 0117U004449, (2017–2018 рр.) – *відповідальний виконавець*); «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (ДБ/LTE-U), (№ держреєстрації 0117U007177, (2018–2019 рр.) – *відповідальний виконавець*); «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» (ДБ/Блокчейн), (№ держреєстрації 0120U100674, (2020-2022 рр.) – *відповідальний виконавець*); «Розробка методів та уніфікованих програмно-апаратних засобів для розгортання енергоефективних інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж подвійного призначення» (ДБ/IBN), (№ держреєстрації 0120U102201, (2020-2022 рр.) – *керівник*)).

Результати дисертаційної роботи використані в ході виконання 4 госпдоговірних робіт: «Проектування та впровадження локальної мережі передавання мультимедійних даних на базі Ethernet технології» (ГД №0548) «Центр високих інформаційних технологій» (01.08.2016 р. – 31.10.2016 р.); «Розробка методів управління контентом в інформаційній системі підприємства з використанням технологій віртуалізації» (ГД №_741) ТОВ «ІнформКонсалт» (29.09.2017 р. – 31.10.2017 р.); «Розробка енергоефективної SDN платформи для надання сервісів IoT в корпоративних мережах» (ГД №0632) ТОВ «ІнформКонсалт» (1.10.2019 р. – 30.11.2019 р.); «Розробка компонентів системи моніторингу та

управління якістю надання послуг в інформаційних мережах з використанням технологій машинного навчання та мережної аналітики» (ГД №0655) ТОВ «МаксіТех» (15.10.2020 р. – 15.12.2020 р. – *керівник*).

Мета і завдання дослідження. Метою представленої дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування інформаційно-комунікаційних систем шляхом розроблення методів і моделей адаптивного управління мережевими ресурсами та якістю надання сервісів у контексті реалізації основних ідей концепції інтенційно-орієнтованих мереж нового покоління.

Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням таких завдань:

1. Аналіз існуючих методів і моделей управління ресурсами та якістю обслуговування у сучасних інформаційно-комунікаційних мережах.
2. Розроблення математичної моделі визначення суб'єктивного рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE.
3. Розроблення потокової моделі енергоефективної QoE-маршрутизації для IBN.
4. Розроблення методу адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю надання послуг для IBN мереж.
5. Розроблення інтелектуальної DPI системи моніторингу та аналізу трафіку для автоматизованого виявлення аномалії і запобігання атак в інтенційно-орієнтованих мережах.
6. Розроблення методів розподілу частотно-часових ресурсів та балансування навантаження в гетерогенній мережі LTE/NB-IoT для адаптивного надання сервісів Інтернету речей.
7. Розроблення адаптивного інтенційно-орієнтованого методу розподілу ресурсів та формування структури рівня радіодоступу 4G/5G.
8. Розроблення імітаційної моделі інтенційно-орієнтованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку.
9. Розроблення методології синтезу інтенційно-орієнтованої інфокомунікаційної мережі.
10. Практична реалізація та оцінювання ефективності запропонованих рішень на основі розроблених прототипів програмно-конфігурованої інтенційно-орієнтованої мережі корпоративного сегменту.

Об'єктом дослідження є процес синтезу програмно-конфігурованих інтенційно-орієнтованих мереж.

Предмет дослідження: моделі, методи та засоби синтезу інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж для забезпечення високого рівня системної адаптивності щодо замовленої якості надання сервісів.

Методи дослідження. В процесі досліджень використано методи теорії графів, алгоритмів, ймовірності, фрактальних процесів, систем масового обслуговування, оптимізації, імітаційного моделювання, математичної статистики, об'єктно-орієнтованого програмування, комбінаторики, машинного навчання та експертних оцінок. Для підтвердження висунутих наукових гіпотез застосовано експериментальні методи дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розвинуто *математичну модель визначення суб'єктивного рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE* в залежності від зміни об'єктивних показників якості обслуговування QoS, що забезпечуються в мережі, зокрема для відео та аудіо сервісів реального часу, яка, на відміну від існуючих, базується на реальному експериментальному та експертному методі дослідження щодо пошуку математичної кореляції між нормалізованим значенням якості сприйняття сервісу QoE та інтегральним адитивним критерієм показників QoS із врахуванням функціонального параметру завантаженості мережевого вузла.

2. **Вперше** запропоновано *потоківу модель енергоефективної QoE-маршрутизації для інтенційно-орієнтованих мереж*, яка, на відміну від відомих, для вибору оптимального шляху передавання даних використовує адаптивну QoE-орієнтовану метрику маршруту, що автоматизовано розраховується централізованим контролером мережі на основі розробленої математичної моделі кореляції нормалізованого значення замовленого рівня якості сприйняття сервісу та інтегрального адитивного критерію поточних показників якості обслуговування із врахуванням функціональних параметрів завантаженості мережевих вузлів, що дало змогу підтримувати компроміс між бажаною інтенційно-орієнтованою якістю обслуговування користувачів, завантаженістю та енергоефективністю мережі шляхом переведення в енергозберігаючий режим незадіяних вузлів.

3. **Вперше** запропоновано *метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг для інтенційно-орієнтованих мереж*, який, на відміну від відомих, в умовах високого навантаження мережі для формування якості послуги включає в себе як об'єктивну оцінку часових мережевих характеристик, так і замовлені згідно намірів суб'єктивні QoE оцінки клієнтів, що дає змогу кінцевим користувачам сервісів опосередковано впливати на функціональну конфігурацію мережі, а з допомогою машинного навчання реагувати на несприятливі поєднання значень показників якості і попереджати ситуації, коли користувач незадоволений якістю отриманих сервісів для адаптивного прогнозування моменту переконфігурації мережі.

4. Удосконалено *метод виявлення аномалій мережевого трафіку*, який відрізняється від відомих формуванням набору інформативних ознак, що характеризують нормальну та аномальну поведінку інфокомунікаційної системи на основі оцінки параметра Херста із можливістю самонавчання, що дало змогу за короткий проміжок часу з високим ступенем точності автоматизовано виявляти та блокувати складні атаки різних типів в традиційних та майбутніх інтенційно-орієнтованих мережах.

5. **Вперше** розроблено *інтелектуальну DPI (Deep Packet Inspection) систему моніторингу та аналізу мережевого трафіку*, яка, на відміну від раніше відомих, для інтелектуального прийняття управлінських рішень процесом передавання даних базується на гармонійному поєднанні переваг методів сигнатурного, статистичного та фрактального аналізу інформативних ознак щодо детектування інформаційних протоколів та ранжування прихованих властивостей аномального трафіку, що дало змогу отримувати повну картину використання ресурсів мережі, виявляти користувачів, які споживають великі обсяги трафіку, ефективно управляти трафіком та сервісними політиками в режимі реального часу, автоматизовано створювати або

оптимізувати сервісні пропозиції, підвищувати якість послуг та забезпечувати захист мережі і її користувачів.

6. **Вперше** запропоновано *метод розподілу частотно-часових ресурсів низхідного та висхідного каналу зв'язку гетерогенної мережі LTE/NB-IoT*, який, на відміну від відомих, враховує наміри користувачів щодо рівня якості надання сервісів Інтернету речей та проводить адаптивне інтелектуальне планування процесом виділення ресурсів на основі аналізу пріоритетності даних, зокрема у вузькосмуговому NB-IoT спектрі, що дало змогу забезпечити необхідну інтенційно-орієнтовану якість обслуговування із кінця в кінець.

7. Набув подальшого розвитку *метод балансування навантаження в мережі LTE/NB-IoT*, який, на відміну від відомих, в умовах недостатності необхідних ресурсів для обслуговування критично-важливих IoT даних в межах основної базової станції, дав змогу на основі розробленої централізованої системи моніторингу частотно-часових ресурсів та аналізу пріоритету забезпечити ультранадійний зв'язок з низькими затримками шляхом перенаправлення на обслуговування менш завантаженої альтернативної базової станції.

8. **Вперше** запропоновано *адаптивний інтенційно-орієнтований метод розподілу ресурсів та формування структури рівня радіодоступу 4G/5G*, який відрізняється від відомих урахуванням локалізації групи інтенційно-орієнтованого користувачького навантаження та аналізом замовлених оцінок щодо забезпечення необхідного рівня якості сприйняття сервісу, що дало змогу ефективніше використовувати наявні енергетичні та частотно-часові ресурси із забезпеченням замовленої якості обслуговування.

9. Набула подальшого розвитку *імітаційна модель інтенційно-орієнтованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку*, яка, на відміну від відомих, враховує значну кількість технічних параметрів мережі для створення реальних умов дослідження та автоматизує запропоновані методи інтенційно-орієнтованого управління частотно-часовими ресурсами та формування структури рівня радіодоступу, що дало змогу оцінити ефективність розроблених рішень в процесі оптимізації мережі за критерієм замовленої якості обслуговування з урахуванням обмеженості спектральних та енергетичних ресурсів у порівнянні із відомими методами.

10. **Вперше** запропоновано *методологію синтезу гетерогенної інтенційно-орієнтованої мережі*, яка відрізняється від відомих, багатоаспектним уявленням про структуру інфокомунікаційної системи як про цілісну централізовану програмовану мережну інфраструктуру, що складається з окремих підсистем та дало змогу інтелектуально виділяти зв'язки між структурно-функціональними елементами мережі, які можуть не тільки автоматизовано перебудовуватись з різною продуктивністю, але й виникати заново, вишукуючи шляхи найбільш адекватного пристосування до мінливих вимог користувачів для підвищення рівня адаптивності системи на основі розроблених методів управління енергоефективністю, якістю сприйняття сервісу, захищеності даних та розподілу ресурсів.

Практичне значення одержаних результатів. Основним практичним результатом дисертації, який одержаний на основі проведених теоретичних та практичних досліджень, є розвиток методології синтезу інфокомунікаційних систем шляхом конфігурування її мережно-незалежних рівнів для забезпечення вимог до адаптивності мережної системи, якості обслуговування користувачів та

оперативності доставки даних, що є основними цілями необхідних для реалізації мереж нового покоління IBN.

У межах запропонованої методології синтезу інфокомунікаційних систем для реалізації IBN використано наступні практичні особливості розроблених методів, моделей, засобів та алгоритмів:

1. Удосконалено алгоритм вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах шляхом формування IBN/SDN контролером пробних пакетів меншого розміру з різними пріоритетами, що дало можливість у високонавантажених каналах для низько пріоритетних потоків покращити точність моніторингу до **45%** та зменшити до **22%** сигналізаційне навантаження у порівнянні із відомими.

2. Розроблено імітаційну модель мережі з можливістю перемикання між двома методами управління якістю обслуговування (традиційного та клієнт-орієнтованого). Перевагою даної моделі є можливість досліджувати нові рішення для майбутньої концепції інтенційно-орієнтованих мереж шляхом інтеграції унікальних алгоритмів у ядро мережі. Встановлено що запропонований метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг дає вигравш в середньому від **2-5 разів** за критерієм кількості користувачів, які вимагають високої якості сприйняття послуги.

3. Розроблено адаптивний алгоритм вибору рівня технології граничних та хмарних обчислень для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування сервісів в інтенційно-орієнтованій інфокомунікаційній мережі.

4. Розроблена інтелектуальна DPI система моніторингу та аналізу трафіку дала змогу виявити складні атаки різного роду, зокрема таких як **Non-Spoofed UDP Flood**, SYN Flood, фрагментація HTTP та шляхом автоматизованого блокування виявленого шкідливого трафіку зменшити загальний рівень втрат на **5%** у порівнянні із існуючою комерційною системою SolarWinds DPI.

5. На основі розробленої імітаційної моделі гетерогенної мережі LTE/NB-IoT встановлено, що комплексне використання розроблених методів пріоритезації IoT трафіку та балансування навантаження, дають змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу з кінця в кінець на **68,8%** (або 3,21 рази), а також при використанні механізму пріоритезації, зменшити кількість відмов у обслуговуванні на **58%** для класу L1 (трафік RT) та **76%** для L2 (трафік URLLC) у порівнянні з існуючим методом пропорційного розподілу ресурсів в умовах високого навантаження. У випадку одночасного використання запропонованих рішень досягається мінімальна кількість відмов для сервісів IoT класу L1 та L2 в умовах недовантаженості альтернативних базових станцій.

6. Розроблений адаптивний інтенційно-орієнтований метод розподілу ресурсів та формування структури рівня радіодоступу мереж 4G/5G дав змогу ефективніше на **25 %** використовувати наявні частотно-часові ресурси та зменшити на **8,7%** енергоспоживання мережі рівня радіодоступу для забезпечення замовленої якості обслуговування користувачів у порівнянні із традиційними методами.

7. Розроблено алгоритм вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі з використанням Big Data, який, на відміну від відомих, враховує та аналізує оцінки замовленої якості сприйняття послуги та дає змогу покращити якість обслуговування високопріоритетних послуг на вимогу та збільшити прибуток оператора.

8. Розроблено прототип мобільного та операторського додатку для адаптивного клієнт-орієнтованого надання послуг в гетерогенній мережі, що дає змогу отримувати замовлену якість обслуговування на основі зворотного зв'язку між користувачем та оператором мережі.

9. Розроблено прототипи корпоративного сегменту енергоефективної інтенційно-орієнтованої мережі різного призначення на базі мікроконтролерних платформ, апаратних SDN комутаторів ZODIAC FX/GX та віртуалізації функцій компонентів технології SDN, в межах яких реалізовано та оцінено ефективність запропонованих рішень щодо адаптивного клієнт-орієнтованого управління ресурсами та якістю обслуговування.

10. Розроблено унікальну систему моніторингу якості функціонування реалізованих прототипів IBN мереж за критерієм затримки передавання даних, що є одним із ключових параметрів моніторингу якості надання сервісів реального часу критично-важливої інфраструктури. Особливістю системи є використання розробленого методу наскрізного вимірювання затримки з кінця в кінець для кожного компонента мережі шляхом додавання власної мітки часу до метаданих, так що, порівнюючи дві мітки між компонентами, можна визначити час затримки та в умовах перевищення норм сповіщати про прийняття необхідних керуючих рішень.

11. На основі експериментального дослідження в межах розробленого прототипу IBN мережі встановлено, що запропонована *модель енергоефективної QoE-маршрутизації* потоків даних у порівнянні із відомою концептуальною моделлю багатокритеріальної маршрутизації DMCQR для програмно-конфігурованих мереж, дала змогу досягти кращої збалансованості завантаження каналних ресурсів мережі за рахунок раціонального вибору шляхів передавання для різнорідного трафіку та зменшити до **3 разів** середню затримку обслуговування потоків реального часу з кінця в кінець для яких при використанні маршрутизації DMCQR не виконувались допустимі норми затримки, а також в умовах низької інтенсивності загального трафіку зменшити енергоспоживання мережі до **53,56%**.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка», зокрема для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» в курсі лекцій з дисципліни «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку», спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» в курсі лекцій з дисципліни «Технології інформаційно-комунікаційних мереж», «Проектування інформаційних мереж», а також у держбюджетних науково-дослідних роботах з 2015 по 2020 рік.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних корпоративних мережах Науково-дослідного інституту інтелектуальних комп'ютерних систем, ТОВ «ОСТВЕР СЕРВІСІЗ», ТОВ «Телекомунікаційна компанія», ПАТ «Укртелеком», ТОВ ВТФ «Контех», ТОВ «МаксіТех», ТОВ «ІнформКонсалт», Hubei University of Technology, що підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать: у роботах [6, 14, 15, 18, 31, 40, 47] – методи балансування навантаження та розподілу частотно-часових ресурсів низхідного та висхідного

каналу зв'язку гетерогенної мережі LTE/NB-IoT; [3, 9, 23, 29, 30, 45, 48, 58] – імітаційні моделі інфокомунікаційних мереж та метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг для IBN мереж; [5, 8, 42, 49, 60] – метод виявлення аномалій мережевого трафіку та інтелектуальна DPI система; [35, 37, 50] – потокова модель маршрутизації для програмно-конфігурованих мереж; [11, 13, 21, 25, 46, 52] – методи оптимізації мережевих ресурсів інфокомунікаційних мереж та адаптивного управління трафіком; [6, 23, 36, 38] – адаптивний інтенційно-орієнтований метод розподілу ресурсів та формування структури рівня радіодоступу 4G/5G; [2, 33, 57] – імітаційна модель інтенційно-орієнтованої гетерогенної мережі 4G/5G; [29, 56] – алгоритм вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі з використанням Big Data; [1, 17, 39, 43, 53] – прототипи корпоративного сегменту програмно-конфігурованої IBN мережі; [2, 16, 41, 51, 54] – адаптивний алгоритм вибору рівня технології граничних та хмарних обчислень для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування сервісів в IBN; [4, 29] – алгоритм вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах; [7, 10, 24, 44] – моделі управління енергоспоживанням в інфокомунікаційних мережах; [15, 12, 19, 20, 26, 27, 33, 34, 55, 59] – методологія синтезу інфокомунікаційних мереж з віртуалізацією інфраструктури.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 22-ох міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (TCSET, м. Львів-Славське 2016, 2018, 2020 pp.); IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON, м. Львів, 2017, 2019 pp.); International IEEE Conferences on Advanced Information and Communication Technologie (AICT, м. Львів, 2015, 2017, 2019 pp.); Міжнародних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (CADSM, м. Львів-Поляна, 2017, 2019 pp.); Міжнародних конференціях з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo, м. Київ 2016 р., м. Одеса, 2017, 2018 pp.); IEEE 4th International symposium on wireless systems within the international conferences on intelligent data acquisition and advanced computing systems (IDAACS-SWS, м. Львів, 2018p.); International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T, м. Харків, 2015, 2017 pp.); 5-й міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (м. Чернівці 2016 р.); 1-й міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно телекомунікаційних систем» (2018 р., м. Київ); 10-й міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» (м. Київ, 2016 р.).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 60 наукових праць, серед них 1 – одноосібна монографія у закордонному виданні, 1 – колективна монографія, 7 – статей у закордонних виданнях, що входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science, 1 – стаття у фаховому виданні України, що входить до наукометричних баз Scopus, 2 – статті у закордонних періодичних виданнях, 12 – статей у наукових фахових виданнях України, 36 – у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, з них індексованих у наукометричній базі Scopus /Web of Science – 27.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Загальний обсяг роботи складає 450 сторінок друкарського тексту, із них 16 сторінок вступу, 335 сторінок основного тексту, 189 рисунків, 20 таблиць, список використаних джерел із 280 найменувань. 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, констатовано зв'язок роботи з науковими програмами, темами, сформульовано мету та 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 роботи – «**Аналіз проблем управління якістю надання сервісів в сучасних інфокомунікаційних системах та перспективи розвитку інтенційно-орієнтованих мереж**» – містить огляд літературних джерел за темою дисертації в межах проведення аналізу щодо побудови новітніх інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж. Розглянуто особливості еволюції, а також проблематику ефективного управління мережевими ресурсами та якістю обслуговування для різної технологічної реалізації фіксованих та мобільних систем зв'язку. Встановлено, що інфокомунікаційна мережа – це сукупність територіально розподілених інформаційних, обчислювальних ресурсів, програмних комплексів управління, що розміщуються в кінцевих системах мережі та термінальних системах користувачів, взаємодія між якими забезпечується за допомогою телекомунікацій, і які спільно утворюють єдину гетерогенну мультисервісну платформу.

На сьогоднішній час створено і експлуатується велика кількість інфокомунікаційних систем управління мережами, які дають змогу узагальнити результати їх роботи і виділити загальні для них переваги та недоліки. Проте, одним із важливих спільних недоліків є те, що постійно поглиблюється розрив між зростаючими універсальними можливостями систем управління і реальними вимогами щодо адаптивного управління якістю обслуговування, орієнтованими на конкретні сервіси користувачів. Розв'язання всього комплексу завдань адаптивного надання сервісів в умовах змін значущості бізнес-процесів складно реалізувати на основі реалізації управління за допомогою існуючих методів та мережових технологій, оскільки зміна критеріїв оптимальності керуючих рішень вимагає постійного експертного та адміністративного втручання. Показано, що в основному всі відомі методи управління якістю обслуговування відносяться до локального керування трафіком та мережевими ресурсами. В їх основу покладено переважно децентралізовані алгоритми та механізми управління ресурсами, що реалізуються на окремих вузлах мережі. Крім того, в процесі управління не координуються рішення, отримані на окремих рівнях мережових вузлів.

Отже, виникло технічне протиріччя між тенденцією збільшення топологічної, експлуатаційної, функціональної складності мереж рівня радіодоступу, транспорту та розподілених систем в умовах зростання обсягів інформації, і відсутністю

науково-практичного обґрунтованого концептуального підходу до управління такими мережами, орієнтованих на адаптивне надання сервісів, зокрема, що вимагаються з боку мінливих бізнес-процесів користувачів. В процесі аналізу функціональності існуючих інфокомунікаційних систем (рис. 1), встановлено, що вони характеризуються відсутністю таких основних принципів, як програмованість, централізованість, відкритість та абстракція, а також відсутністю нових методів, моделей, засобів, алгоритмів та систем моніторингу необхідних для переходу до IBN мереж нового покоління з можливістю автоматичної конфігурації мережі та адаптації під мінливі вимоги користувачів щодо якості надання послуг.

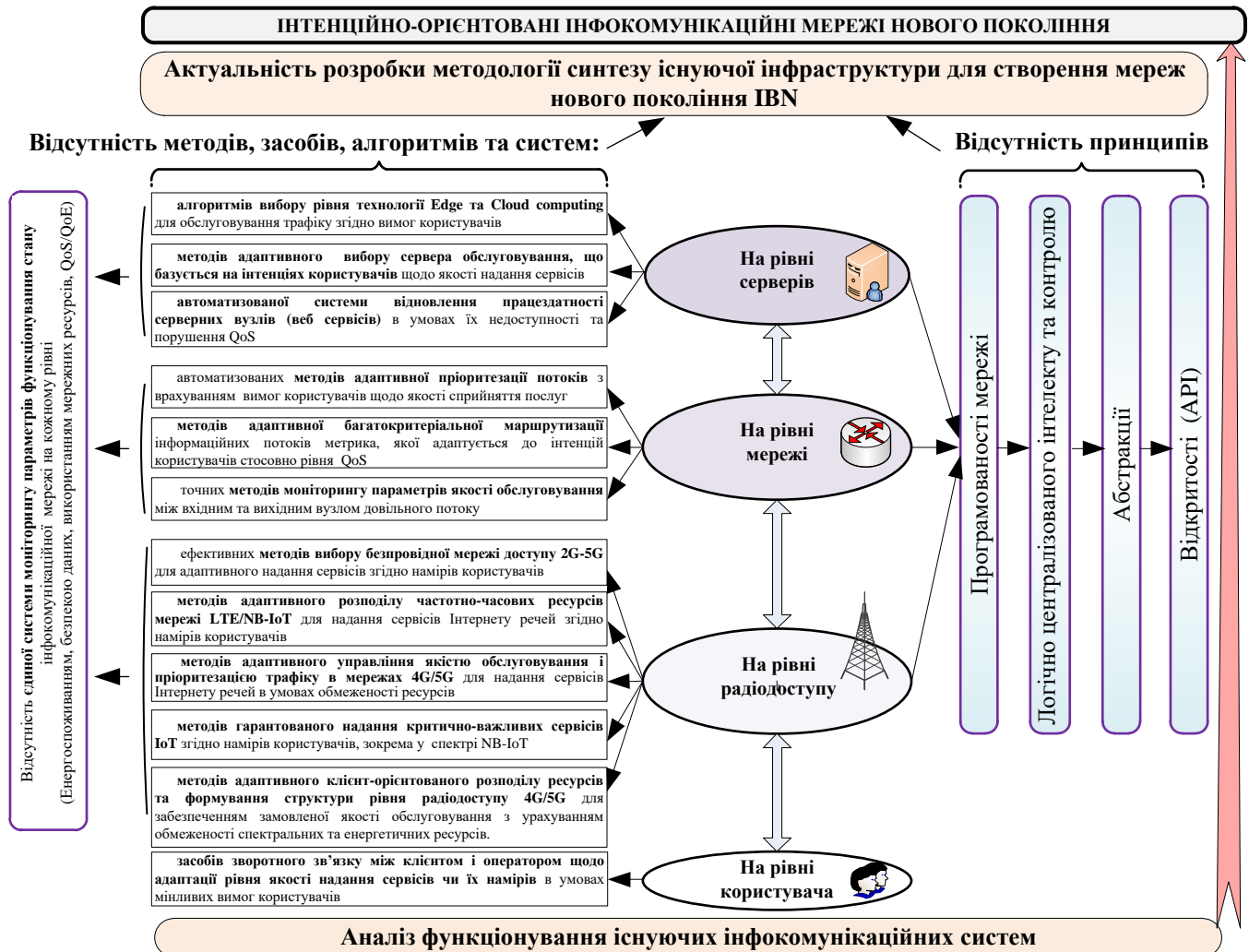


Рис. 1. Актуальність розробки методології синтезу існуючої інфраструктури для розвитку інтенційно-орієнтованих мереж нового покоління

Таким чином, актуалізується проблематика розроблення методології аналізу і синтезу складних гетерогенних інфокомунікаційних систем у контексті реалізації основних ідей концепції інтенційно-орієнтованих мереж нового покоління.

У другому розділі роботи – «Моделі побудови програмно-конфігурованих інтенційно-орієнтованих мереж з адаптивним управлінням якістю надання сервісів» – запропоновано *концептуальну модель гетерогенної програмно-конфігурованої інтенційно-орієнтованої мережі* (рис. 2), яка, на відміну від існуючих, дає змогу забезпечити ефективний розподіл і перерозподіл загальних ресурсів адаптуючись під мінливі вимоги бізнес-користувачів щодо якості надання сервісів. Головна ідея пропонованої концепції IBN полягає у зміні парадигми мережевої інфраструктури: тепер не користувач зі своїм додатком підлаштовується

під можливості мережі, а мережа змінює свої налаштування з урахуванням вимог користувача. Забезпечення згідно намірів користувачів заданого рівня QoE послуг стає фундаментальною задачею при реалізації наскрізного керування ресурсами у концепції IBN. Таким чином, для розроблення нової системи адаптивного управління якістю надання інформаційних послуг у роботі використано системний підхід, зокрема проблема забезпечення якості вирішується не ізольовано операторами мереж, а у тісній взаємодії із користувачами послуг. Для цього IBN контролер аналізує стан мережі і відповідні замовлені QoE оцінки користувачів, що характеризують певний рівень якості обслуговування, а також автоматизовано налаштовує конфігурацію мережі на основі накопиченого досвіду та розроблених нових методів розподілу ресурсів і інженерії трафіку на кожному рівні концептуальної мережі. Даний підхід реалізовується шляхом введення алгоритмів машинного навчання підкласу штучного інтелекту в систему управління послугами. Таким чином, конфігурація мережі і функціональність мережевого обладнання автоматично змінюються в залежності від мінливих вимог користувача. Для цього концептуальна модель гетерогенної IBN мережі базується на принципах централізованості, програмованості, абстракції та відкритості, використовуючи технології SDN, NFV, SDR, Big Data, IoT та Cloud computing.

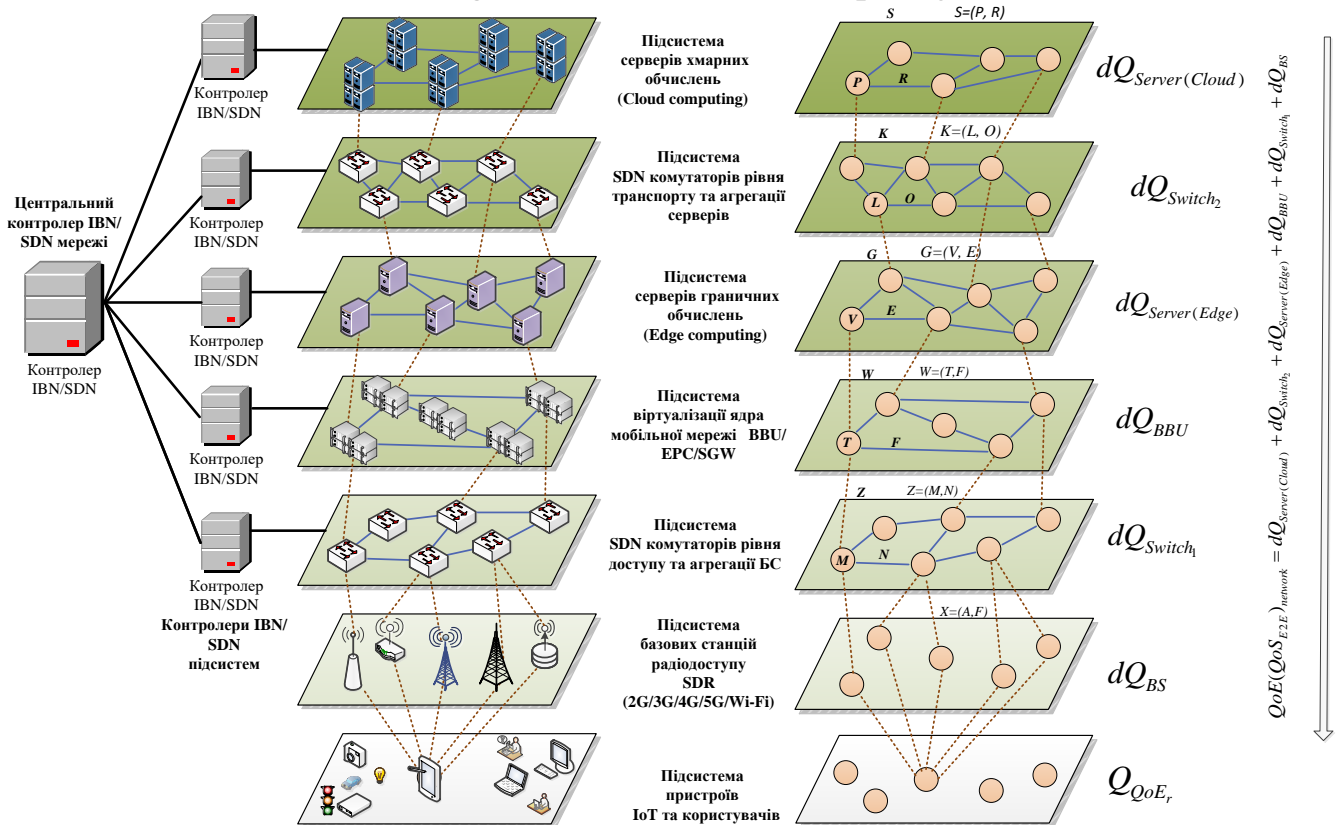


Рис. 2. Модель побудови інтенційно-орієнтованої інфокомунікаційної мережі з адаптивним управлінням якістю надання сервісів

Сценарії обслуговування користувача у гетерогенній мережі нового покоління IBN формально можна описати наступним чином. Є множина N корпоративних сервісів $\phi: \phi = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, набір Θ , що є множиною бізнес-сервісів користувачів, які надаються провайдерами $\Theta: \Theta = \{P_1, P_2, \dots, P_w\}$, та набір F , що складається із множини i користувачів $F: F = \{User_1, User_2, \dots, User_i\}$. Кожен користувач може використати N різних мереж, що належать набору $X: X = \{D_1, D_2, \dots, D_N\}$ для доступу до

одного чи більшого числа інформаційних сервісів, з певним замовленим рівнем якості обслуговування Q_{QoEr} . Користувач $User_i$ під час сесії m у системі може бути уявлений кортежем:

$$c_{\langle m,i,QoEr,w,N \rangle} = \langle m, User_i, S_N, \{P_1, P_2, \dots, P_w\}, D_N, Q_{QoEr} \rangle. \quad (1)$$

Значення $c_{\langle m,i,QoEr,w,N \rangle}$ розуміється наступним чином: впродовж сесії номер m , користувач $User_i$ має доступ до послуг через мережу D_N , отримуючи сервіси S_N відповідно до набору $\{P_1, P_2, \dots, P_w\}$, із замовленою якістю Q_{QoEr} . Цей формалізм (1) пропонується використати для двох фундаментальних цілей необхідних для блоку знань контролера IBN мережі, зокрема для опису, представлення і контролю поведінки користувача у гетерогенній мережі та для отримання даних про зміну профіля користувача за критерієм замовленого рівня якості обслуговування шляхом дослідження аспектів його активності у мережі та інтуїтивного пояснення його поведінки. До того ж наведена модель обслуговування користувача (1) у IBN мережі дає змогу інтуїтивно формалізувати кластери користувачів з однотипними вимогами щодо якості обслуговування Q_i на основі алгоритмів машинного навчання, зокрема за допомогою методу кластеризації k -середніх. Таким чином, для користувачів, що входять до певного кластеру $UC_{iClusterQoEr}$ формується IBN/SDN контролером своя політика конфігурації мережі у вигляді програмного коду для адаптивного управління ресурсами та забезпечення необхідної якості надання послуг. У загальному випадку **інтегральний показник якості надання послуг Q** пов'язаний певною залежністю з частковими показниками q_i , які також можуть перебувати у функціональній залежності один з одним:

$$F = Q(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n). \quad (2)$$

Нехай у заданій залежності (2) всі часткові показники є незалежними змінними. Відповідно, вплив часткових показників на комплексний показник якості формалізується у вигляді повного диференціалу функції Q :

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial q_1} dq_1 + \frac{\partial Q}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{\partial Q}{\partial q_i} dq_i + \dots + \frac{\partial Q}{\partial q_n} dq_n. \quad (3)$$

Часткові похідні перед значеннями dq_i розглядаються як вагові коефіцієнти часткових показників якості $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n$, пов'язаних функціональною залежністю з комплексним показником Q . Вираз $\partial Q_i / \partial q_i$ показує, як змінюється якість послуг Q при зміні часткового показника якості q_i (при фіксованих значеннях інших показників). На підставі викладеного формалізується вираз:

$$w_i = \frac{\partial Q}{\partial q_i} \Big|_{q_i = q_{i0}, i = \overline{(1, n)}}. \quad (4)$$

де w_i – ваговий коефіцієнт i -го часткового показника якості.

Відповідно, рівняння (3) записується у вигляді комплексного показника якості надання послуг:

$$dQ = w_1 dq_1 + w_2 dq_2 + \dots + w_i dq_i + \dots + w_n dq_n. \quad (5)$$

Рівняння (5) є наслідком лінеаризації функції Q в точці, координати якої $q_i = q_{i0}$, $i = \overline{(1, n)}$.

$$w_i = f_i(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n). \quad (6)$$

З виразу (6) видно, що коефіцієнти ваги w_i виражені з (4), є функціями багатьох змінних часткових показників якості q_i . У випадках, коли значення q_i задані, чисельні значення w_i визначаються шляхом підстановки в рівняння (5) конкретних значень часткових показників якості.

Відповідно, систему диференціальних рівнянь для адаптивного інтенційно-орієнтованого управління якістю надання послуг в концептуальній гетерогенній IBN мережі (рис. 2) формалізовано у вигляді (7):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 dQ_{Server(Cloud)} = \frac{\partial Q_{Server(Cloud)}}{\partial q_1} dq_1 + \frac{\partial Q_{Server(Cloud)}}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{\partial Q_{Server(Cloud)}}{\partial q_i} dq_i + \dots + \frac{\partial Q_{Server(Cloud)}}{\partial q_x} dq_x; \\
 dQ_{Switch2} = \frac{\partial Q_{Switch2}}{\partial q_1} dq_1 + \frac{\partial Q_{Switch2}}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{\partial Q_{Switch2}}{\partial q_i} dq_i + \dots + \frac{\partial Q_{Switch2}}{\partial q_y} dq_y; \\
 dQ_{Server(Edge)} = \frac{Q_{Server(Edge)}}{\partial q_1} dq_1 + \frac{Q_{Server(Edge)}}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{Q_{Server(Edge)}}{\partial q_i} dq_i + \dots + \frac{Q_{Server(Edge)}}{\partial q_n} dq_n; \\
 dQ_{BBU} = \frac{Q_{BBU}}{\partial q_1} dq_1 + \frac{Q_{BBU}}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{Q_{BBU}}{\partial q_i} dq_i + \dots + \frac{Q_{BBU}}{\partial q_z} dq_z; \\
 dQ_{Switch1} = \frac{\partial Q_{Switch1}}{\partial q_1} dq_1 + \frac{\partial Q_{Switch1}}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{\partial Q_{Switch1}}{\partial q_i} dq_i + \dots + \frac{\partial Q_{Switch1}}{\partial q_m} dq_m; \\
 dQ_{BS} = \frac{\partial Q_{BS}}{\partial q_1} dq_1 + \frac{\partial Q_{BS}}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{\partial Q_{BS}}{\partial q_i} dq_i + \dots + \frac{\partial Q_{BS}}{\partial q_v} dq_v; \\
 QoE(QoS_{E2E})_{network} = dQ_{Server(Cloud)} + dQ_{Switch2} + dQ_{Server(Edge)} + dQ_{BBU} + dQ_{Switch1} + dQ_{BS}; \\
 QoE(QoS_{E2E})_{network} \approx Q_{QoE}.
 \end{array} \right. \quad (7)$$

З рівняння (7) випливає, що для забезпечення замовленого користувачем рівня якості обслуговування Q_{QoE} (в IBN ідеології розуміється, як інтенція користувача), необхідно, централізовано, гнучко, адаптивно та узгоджено управляти якістю обслуговування $dQ_{Server(Cloud)}, dQ_{Switch2}, dQ_{Server(Edge)}, dQ_{BBU}, dQ_{Switch1}, dQ_{BS}$ на кожному із рівнів концептуальної IBN мережі (рис. 2), забезпечуючи замовлену наскрізну якість обслуговування $QoE(QoS_{E2E})_{network}$. Де QoE – це суб'єктивна оцінка послуги на прикладному рівні користувачем, який користується сервісом. QoS – це набір технологій мережевого та каналного рівнів, використання яких дають змогу ефективніше використовувати ресурси мережі, особливо під час поточних видів трафіку для забезпечення необхідного рівня QoE .

Таким чином, формується твердження, що з розвитком інфокомунікаційних систем потреби користувачів і їх поведінка змінилися. Центр уваги у контексті ідеології IBN зміщується від підвищення продуктивності мережі до покращення рівня сприйняття якості обслуговування QoE , який прямо пропорційно залежить від комплексного показника якості надання сервісу QoS , що визначається параметрами пропускну здатності, затримки, втрат та джитеру пакетів. Для реалізації послуг з прийнятним QoE необхідно дослідити вплив характеристик якості надання сервісу QoS з кінця в кінець на саму послугу, що дають змогу описати закони розподілу характеристики QoS і їхній вплив на параметри QoE (час встановлення з'єднання, час реакції на виконання команди, завмирання зображення, розбиття зображення, синхронізацію зображення та голосу, чіткість та розбірливість звуку).

Для цього у роботі *розвинуто математичну модель визначення суб'єктивного рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE в залежності від зміни об'єктивних показників якості обслуговування QoS*, що забезпечуються в IBN/SDN мережі, зокрема для відео та аудіо сервісів реального часу. Формування математичної моделі QoS/QoE кореляції здійснено на основі отриманих результатів від власного експериментального дослідження проведеного на реальному SDN обладнанні. Нормалізоване значення інтегрального адитивного критерію якості розраховуються за формулою (8):

$$Q = QoS(X) = 1 - (w_1(\frac{P_{min}}{P}) + w_2(\frac{T_{min}}{T}) + w_3(\frac{C}{C_{max}}) + w_4(\frac{J_{min}}{J}) + w_5(\frac{L}{L_{max}})), \quad (8)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 ,- вагові коефіцієнти важливості параметрів $QoS(X)$, що змінюються в діапазоні від 0 до 1, і їх сума повинна дорівнювати одиниці, P - втрати пакетів, T -затримка, C -пропускна здатність, J -джитер, L -завантаженість вузла.

Математичну модель кореляції рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE для аудіо (9) та відео (10) сервісів в залежності від зміни інтегрального критерію параметрів QoS, представлено у вигляді функцій:

$$QoE_{audio} = f_a(Q) = 5(1 - Q^2)^{25Q^5}. \quad (9)$$

$$QoE_{video} = f_v(Q) = 5(1 - Q^2)^{15Q^5}. \quad (10)$$

Відповідно, графіки функцій (9) та (10) показано на рис. 3.

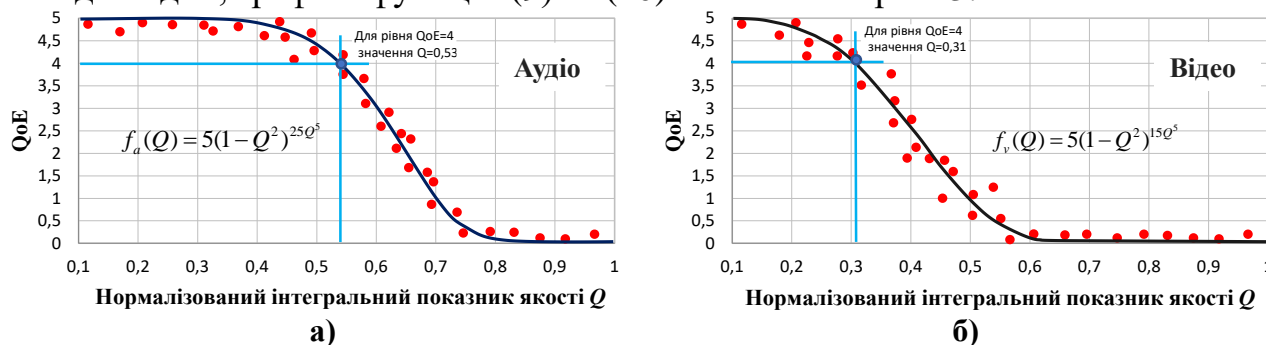


Рис. 3. Графічна модель визначення суб'єктивного рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE в залежності від зміни об'єктивних показників якості обслуговування QoS для аудіо – а) та відео – б) сервісів реального часу

Багатокритеріальний підхід маршрутизації інформаційних потоків є ключовим у запропонованій концептуальній моделі IBN мережі, який дає змогу адаптивно призначати шлях пересилання даних з кінця в кінець з урахуванням параметрів QoS та QoE намірів користувачів. Таким чином, у роботі запропоновано *потоківу модель енергоефективної QoE-маршрутизації для інтенційно-орієнтованих мереж*, яка, на відміну від відомих, для вибору оптимального шляху даних використовує адаптивну QoE-орієнтовану метрику маршруту, що автоматизовано розраховується централізованим контролером мережі на основі вище розробленої математичної моделі кореляції QoS/QoE із врахуванням функціональних параметрів завантаженості мережевих вузлів, що дало змогу підтримувати компроміс між бажаною інтенційно-орієнтованою якістю обслуговування користувачів, завантаженістю та енергоефективністю мережі шляхом переведення в енергозберігаючий режим незадіяних вузлів.

Для змістовного розуміння процесу маршрутизації розглянемо структуру IBN мережі зв'язку, що складається з N мережевих вузлів. Чисельні значення метрики каналів зв'язку $metrics_{(i,j)}$ представляються у вигляді матриці суміжності $A^{metrics}$ як:

$$A^{metrics} = \begin{bmatrix} metrics_{1,1} & \dots & metrics_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ metrics_{N,1} & \dots & metrics_{N,N} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Варто зазначити, що матриця параметрів $A^{metrics}$ не є симетричною ($metrics_{(i,j)} \neq metrics_{(j,i)}$). Мінімізація цільової функції $metrics_{(i,j)}$ на яку можуть бути накладені кілька обмежень або граничних значень є задачею багатокритеріальної оптимізації, яка розв'язується ІВН контролером з використанням методу інтегрального критерію оптимальності. Для цього як нормуючі дільники в цій задачі прийемо найкращі значення часткових критеріїв, що характеризують QoS:

- для кількості втрачених пакетів інформаційного потоку:

$$P_{N \times N}^{A^{metrics}} = \begin{bmatrix} P_{1,1} & \dots & P_{1,N} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{N,1} & \dots & P_{N,N} \end{bmatrix}, P_{i,j} \in [0,1], P_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{R_{i,j}}. \quad (12)$$

де $S_{i,j}$ – кількість прийнятих пакетів, $R_{i,j}$ – кількість переданих пакетів в матриці суміжності $A^{metrics}$ та $S_{i,j}, R_{i,j} > 0$.

- для часу затримки пакетів інформаційного потоку:

$$T_{N \times N}^{A^{metrics}} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & \dots & T_{1,N} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{N,1} & \dots & T_{N,N} \end{bmatrix}, T_{i,j} \in [0,1], T_{i,j} = \frac{t_{min}}{t_{i,j}}. \quad (13)$$

де t_{min} – мінімальне значення затримки в матриці суміжності $A^{metrics}$, і $t_{min}, t_{i,j} > 0$.

- для пропускної здатності каналу:

$$C_{N \times N}^{A^{metrics}} = \begin{bmatrix} C_{1,1} & \dots & C_{1,N} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{N,1} & \dots & C_{N,N} \end{bmatrix}, C_{i,j} \in [0,1], C_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{C_{max}}. \quad (14)$$

де C_{max} – максимальна пропускна здатність в матриці суміжності $A^{metrics}$ та $C_{max}, C > 0$.

- для джитера пакетів інформаційного потоку:

$$J_{N \times N}^{A^{metrics}} = \begin{bmatrix} J_{1,1} & \dots & J_{1,N} \\ \dots & \dots & \dots \\ J_{N,1} & \dots & J_{N,N} \end{bmatrix}, J_{i,j} \in [0,1], J_{i,j} = \frac{j t_{min}}{j t_{i,j}}. \quad (15)$$

де $j t_{min}$ – мінімальне значення джитера в матриці суміжності $A^{metrics}$, і $j t_{min}, j t_{i,j} > 0$.

- для завантаженості мережевого вузла:

$$L_{N \times N}^{A^{metrics}} = \begin{bmatrix} L_{1,1} & \dots & L_{1,N} \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{N,1} & \dots & L_{N,N} \end{bmatrix}, L_{i,j} \in [0,1], L_{i,j} = \frac{L_{i,j}}{L_{max}}. \quad (16)$$

де L_{max} – максимальна завантаженість вузла в матриці суміжності $A^{metrics}$ та $L_{max}, L > 0$.

Значення інтегрального адитивного критерію розраховується для кожного каналу зв'язку між вершинами i та j . Таким чином, метрика каналів зв'язку на основі п'яти параметрів матиме вигляд (17), та є тотожною до виразу (8):

$$metrics_{i,j} = 1 - (w_1 \cdot (P_{i,j}) + w_2 \cdot (T_{i,j}) + w_3 \cdot (C_{i,j}) + w_4 \cdot (J_{i,j}) + w_5 \cdot (L_{i,j})), \quad (17)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 , – вагові коефіцієнти, що змінюються в діапазоні від 0 до 1, і їх сума повинна дорівнювати одиниці.

Змінюючи значення вагових коефіцієнтів в метриці $metrics_{i,j}$, ми, тим самим, створюємо апарат для адаптивного управління значимістю того чи іншого параметра метрики в підсумковій оцінці каналу даних від вузла i до вузла j , що є важливим для забезпечення різного рівня якості обслуговування. Вартість маршруту (загальна адаптивна метрика шляху *QoE-орієнтованої маршрутизації*) передбачає суму метрик кожного каналу.

$$M_{(i,j)} = \sum metrics_{i,j}, \quad 0 \leq M_{(i,j)} \leq 1. \quad (18)$$

Для забезпечення найвищого рівня якості обслуговування QoE=5 з безлічі альтернативних маршрутів буде обраний той, що має найменшу вартість (менше значення сумарної метрики), відповідно цільова функція записується у вигляді (19) і навпаки для найнижчого рівня якості обслуговування буде обраний той, що має найбільшу вартість, цільова функція записується у вигляді (20).

$$F(Q_{QoE_{max}}) = \sum_{n=1}^k metrics_{i,j} \rightarrow min. \quad (19)$$

$$F(Q_{QoE_{min}}) = \sum_{n=1}^k metrics_{i,j} \rightarrow max. \quad (20)$$

де k – число усіх можливих маршрутів між заданою парою вузлів відправник-отримувач.

У роботі пропонується проводити централізований моніторинг та управління мережевою структурою з допомогою удосконаленої логіки SDN контролера (рис. 4а). Для цього розроблено та успішно реалізовано функціональний блок “оптимізатор мережі” у вигляді програмної надбудови над існуючою логікою управління контролера SDN з метою створення IBN/SDN контролера. Суть якого полягає у збиранні статистики від комутаторів про топологію мережі та ступінь завантаження комутаторів. На основі отриманої поточної статистики про стан мережі приймається адаптивне рішення щодо побудови оптимальної топології мережі за критеріями QoS/QoE та енергоспоживання. А саме в умовах низького навантаження мережі з допомогою даного підходу IBN/SDN контролер згідно отриманих даних від блоку “оптимізатор мережі” прийме рішення про створення графу (топології) з меншою кількістю активних зв'язків і комутаторів, в той час як високе навантаження на мережу збільшить кількість активних комутаторів та зв'язків між ними в графі. На основі запропонованої вище моделі маршрутизації за допомогою вагових коефіцієнтів (17) контролер інтелектуально може коригувати вартість шляху з урахуванням того, наскільки затримка чи втрати пакетів важливі для цього інформаційного потоку, щоб забезпечити користувачам сервісів бажану оцінку QoE (рис. 4б). Відповідно, в умовах низького навантаження контролер перерозподіляє навантаження між каналами так, щоб отримати меншу кількість задіяних комутаторів та незадіяні комутатори перевести у енергозберігаючий (неактивний) режим, що дасть змогу підвищити енергоефективність мережі в цілому. По мірі зростання навантаження та деградації рівня QoE приймається автоматизоване рішення про активацію сплячих комутаторів та переведення їх в активний режим.

Таким чином, розв'язання завдання вибору оптимального маршруту для забезпечення адаптивного рівня якості обслуговування в IBN мережі зводиться до пошуку такого значення метрики маршруту, яке наближається до значення інтегрального адитивного критерію якості, що відповідає за певний замовлений рівень QoE (рис. 4в), використовуючи для цього математичну модель (8-10).

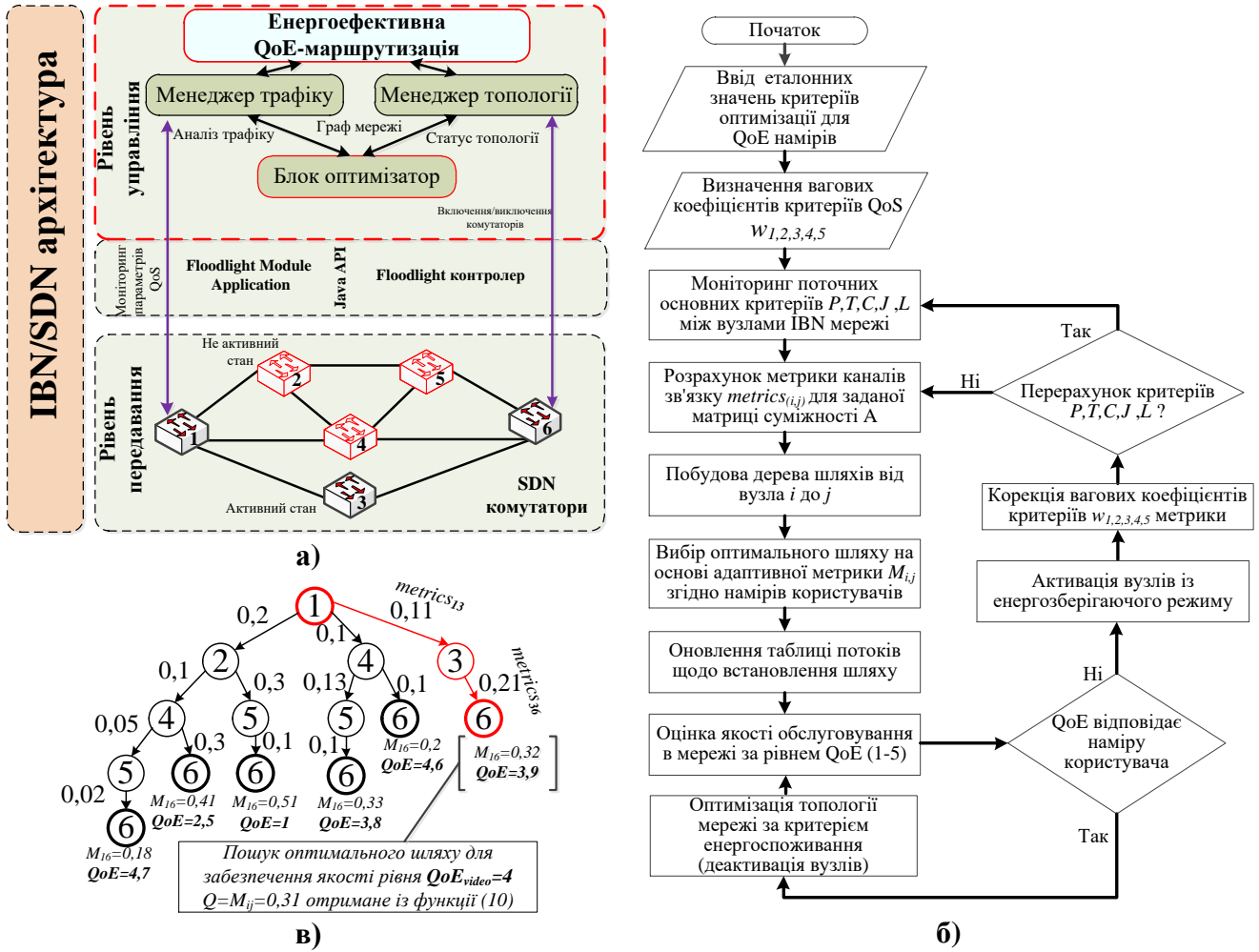


Рис.4. Структурно-функціональна модель IBN/SDN мережі із QoE маршрутизацією – а), блок-схема алгоритму роботи енергоефективної QoE-маршрутизації – б) та приклад розв'язку завдання маршрутизації для забезпечення замовленого рівня якості $QoE_{video}=4$ – в)

Представимо IBN/SDN мережу у вигляді двонаправленого зваженого графа $G=(N, M)$, де $N_i \in N$, N це кількість вузлів (SDN комутаторів), а i це номер комутатора. Між комутаторами N_i та N_j існує канал зв'язку $m_{ij} \in M$ із пропускну здатністю $B_{i,j}$. Нехай двійкові змінні V_i і L_{ij} позначають стан N_i -го комутатора та m_{ij} -го каналу таким чином, що:

$$V_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо SDN комутатор } N_i \text{ є активний} \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases} \quad L_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо канал } m_{ij} \text{ є включеним} \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

Позначимо, P_i та C_{ij} як енергоспоживання N_i -го комутатора та m_{ij} -го каналу зв'язку, виміряне у ватах (джоулях). Трафік у мережі представлений набором потоків F , де $f \in F$ визначається як $f = (sr, ds, \lambda_f)$, sr і $ds \in Z$ комутатори відправника та отримувача, а λ_f - швидкість потоку f , виміряна в байтах за секунду.

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо потік } f \text{ проходить через канал } e_{ij} \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases} \quad L\rho_{ij} = \begin{cases} 1, & \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

де ρ_{\min} мінімальна та ρ_{\max} максимальна завантаженість каналів, щоб утримувати компроміс між продуктивністю та енергоефективністю мережі.

Логіка управління забезпечується розв'язанням задачі оптимізації сформованої у вигляді багатоцільової функції (21), що мінімізує енергоспоживання мережі з врахуванням наступних обмежень (22-29).

$$\min \left(\sum_{\forall e_{ij}} L_{ij} \cdot C_{ij} + \sum_{\forall Z_i} V_i \cdot P_i \right). \quad (21)$$

$$\text{subject to } \sum_{\forall f} f_{ij} \cdot \lambda_f \leq B_{ij}, \forall m_{ij}. \quad (22)$$

$$\sum_{\forall f} f_{ij} = \sum_{\forall f} f_{ij}, N_i \& N_j \neq sr, N_i \& N_j \neq ds. \quad (23)$$

$$f_{kj} = f_{iq}, N_k = sr, N_q = ds, \forall m_{kj}, \exists m_{iq}. \quad (24)$$

$$f_{ij} \leq V_j \text{ and } f_{ji} \leq V_j, \forall N_j \in N. \quad (25)$$

$$V_i \leq \sum_{\forall f} [f_{ij} + f_{ji}], \forall N_i \in N. \quad (26)$$

$$L_{ij} \leq V_i, L_{ij} \leq V_j, \forall N_i. \quad (27)$$

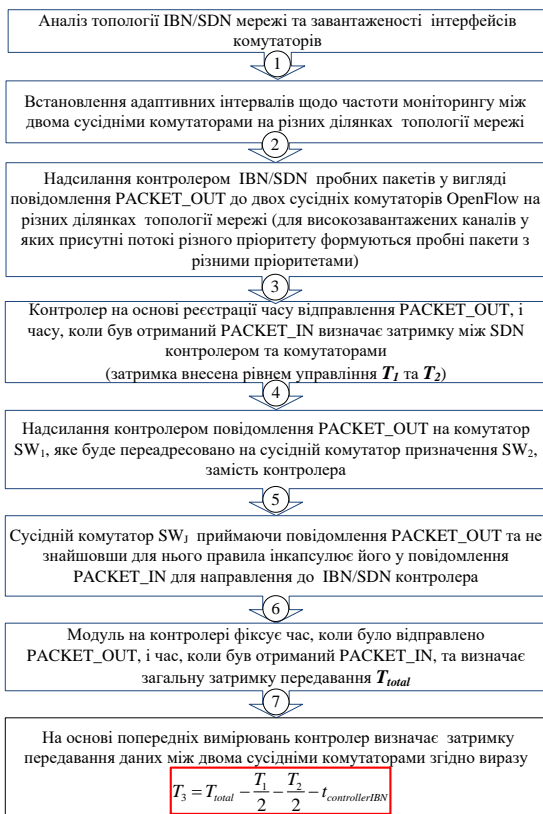
$$V_i \leq \sum_{\forall f} [f_{ij} + f_{ji}], \forall N_i \in N. \quad (28)$$

$$\sum \text{metrics}_{i,j} \leq Q_{QoE_r}, Q_{QoE_r} = 1, \dots, 5, 0 \leq Q_{QoE_r} \leq 1. \quad (29)$$

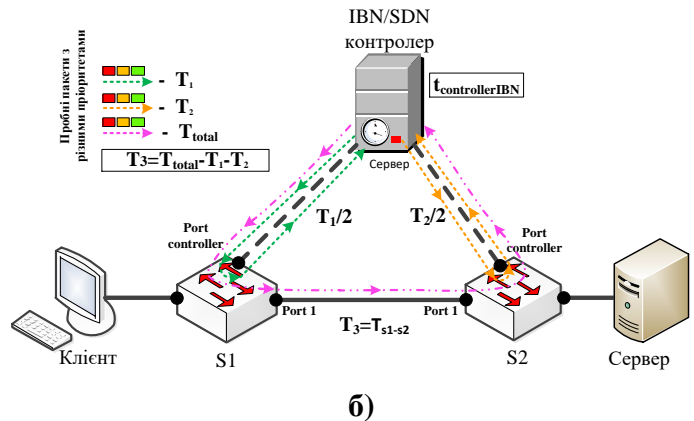
Перший елемент цільової функції, відноситься до загального споживання енергії, створюваного всіма потоками, що проходять через канали зв'язку. Другий це загальне споживання енергії всіх активних комутаторів у мережі. Умова 22 вказує на те, що загальна швидкість потоків між двома комутаторами не повинна перевищувати пропускної здатності каналів зв'язку. Вираз 23 і 24 стверджує, що потік не створюється і не втрачається в мережі. Обмеження виразів 25, 26 та 27 підтримують кореляцію між комутаторами та каналами за допомогою змінної стану комутатора та змінних каналів потоку. Хоча обмеження 25 і 26 стверджують, що жоден потік не повинен використовувати канал, що підключений до неактивного комутатора, обмеження 27 стверджує, що якщо жоден інформаційний потік не проходить через канали зв'язку, підключені до даного комутатора, тоді комутатор вимикається. Обмеження у рівнянні 28 говорить, що канал, який підключений до неактивного комутатора, повинен бути неактивним. Обмеження 29, вказує на те, що числове значення вартості маршруту даних повинне бути тотожним або меншим за нормалізоване значення коефіцієнта Q_{QoE_r} , що характеризує замовлену якість користувача в ІВН мережі. Таким чином, запропонований підхід дає змогу підвищити енергоефективність ІВН мережі шляхом переведення в енергозберігаючий режим незадіяних вузлів при досягненні оптимальної продуктивності для забезпечення необхідних вимог QoE користувачів.

Виходячи із вищезазначеного, першим необхідним рішенням для проведення адаптивної реконфігурації мережі є реалізація моніторингу параметрів, що характеризують стан вузлів. Згідно проведеного аналізу встановлено, що протокол Open-Flow дає змогу контролювати більшу кількість параметрів. Проте, деякі із них потребують удосконалення, зокрема методи вимірювання затримки даних, які визначають тільки середню затримку в каналі між комутаторами для агрегованого потоку, що не дає змоги адекватно відобразити затримку та в кінцевому випадку

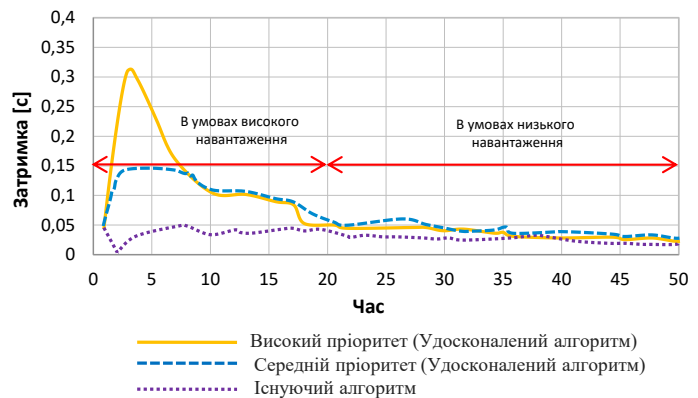
якість обслуговування для потоків з різним пріоритетом обслуговування. У такому випадку, затримка для потоків високого пріоритету і низького відрізнятиметься суттєво (використання існуючих методів є не виправданими, оскільки дають не точні значення). Саме тому, у роботі *удосконалено алгоритм вимірювання затримки даних в програмно-конфігурованих мережах* шляхом формування IBN/SDN контролером пробних пакетів меншого розміру з різними пріоритетами (рис. 5а).



а)



б)



в)

Рис. 5. Етапи удосконаленого алгоритму вимірювання затримки в програмно-конфігурованих IBN мережах – а), схема експериментального дослідження алгоритмів вимірювання затримки в SDN/IBN мережах – б), результати порівняння алгоритмів вимірювання затримки пакетів – в)

Зокрема, шляхом програмної реалізації алгоритму вимірювання затримки на контролері IBN/SDN та проведення експериментального дослідження на реальному обладнанні (рис. 5б) доведено, що використання запропонованого підходу вимірювання затримки в умовах високого каналного навантаження підвищує точність моніторингу до 45% для низько пріоритетних потоків у порівнянні із відомим алгоритмом в SDN (рис. 5в).

У третьому розділі – «Методи, алгоритми і моделі адаптивного розподілу мережевих ресурсів та управління трафіком для синтезу корпоративних інтенційно-орієнтованих мереж» – розроблено унікальні методи, алгоритми та моделі для синтезу IBN корпоративного класу. Зокрема, вперше запропоновано *метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю надання послуг для IBN мереж*, який, на відміну від відомих, в умовах високого навантаження мережі для формування якості послуги включає в себе як об'єктивну оцінку часових мережевих характеристик, так і замовлені згідно намірів суб'єктивні QoE оцінки клієнтів, що дає змогу кінцевим користувачам сервісів опосередковано впливати на

функціональну конфігурацію мережі, а з допомогою машинного навчання реагувати на несприятливі поєднання значень показників якості і попереджати ситуації, коли користувач незадоволений якістю отриманих сервісів для адаптивного прогнозування моменту переконфігурації мережі. На рис. 6а показано пропонувану концептуальну модель IBN для адаптивного надання сервісів згідно QoE намірів та основні етапи функціонування моделі IBN (рис. 6б).

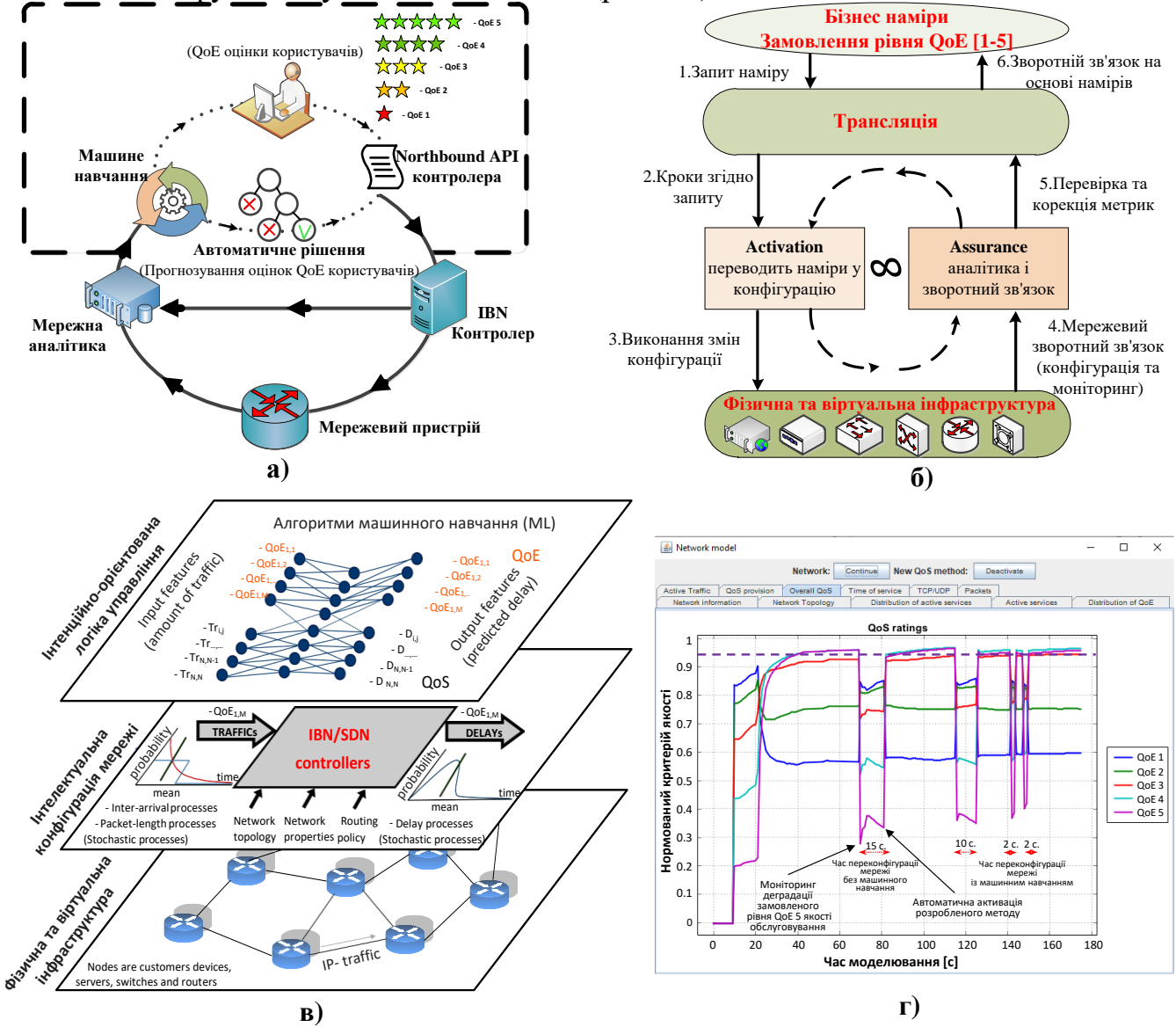


Рис. 6. Пропонувана концептуальна модель IBN мережі для адаптивного надання сервісів згідно QoE намірів – а), основні етапи функціонування моделі IBN – б), структурно-функціональна схема розробленої імітаційної моделі концептуальної IBN – в), моніторинг якості мережі – г)

Розроблено *імітаційну модель інтелектуальної IBN мережі* з можливістю перемикавання між двома методами управління якістю обслуговування (традиційного та клієнт-орієнтованого). Структурно-функціональна схема імітаційної моделі IBN мережі та результати роботи системи моніторингу стану функціонування мережі показано на рис. 6в та рис. 6г. На основі проведеного імітаційного моделювання показано порівняння існуючого методу управління QoS із запропонованим за критерієм часу очікування сервісів (рис. 7). Також встановлено, що запропонований метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг дає вигоду в середньому від 2-5 разів за критерієм кількості користувачів, які вимагають високої якості сприйняття послуги.

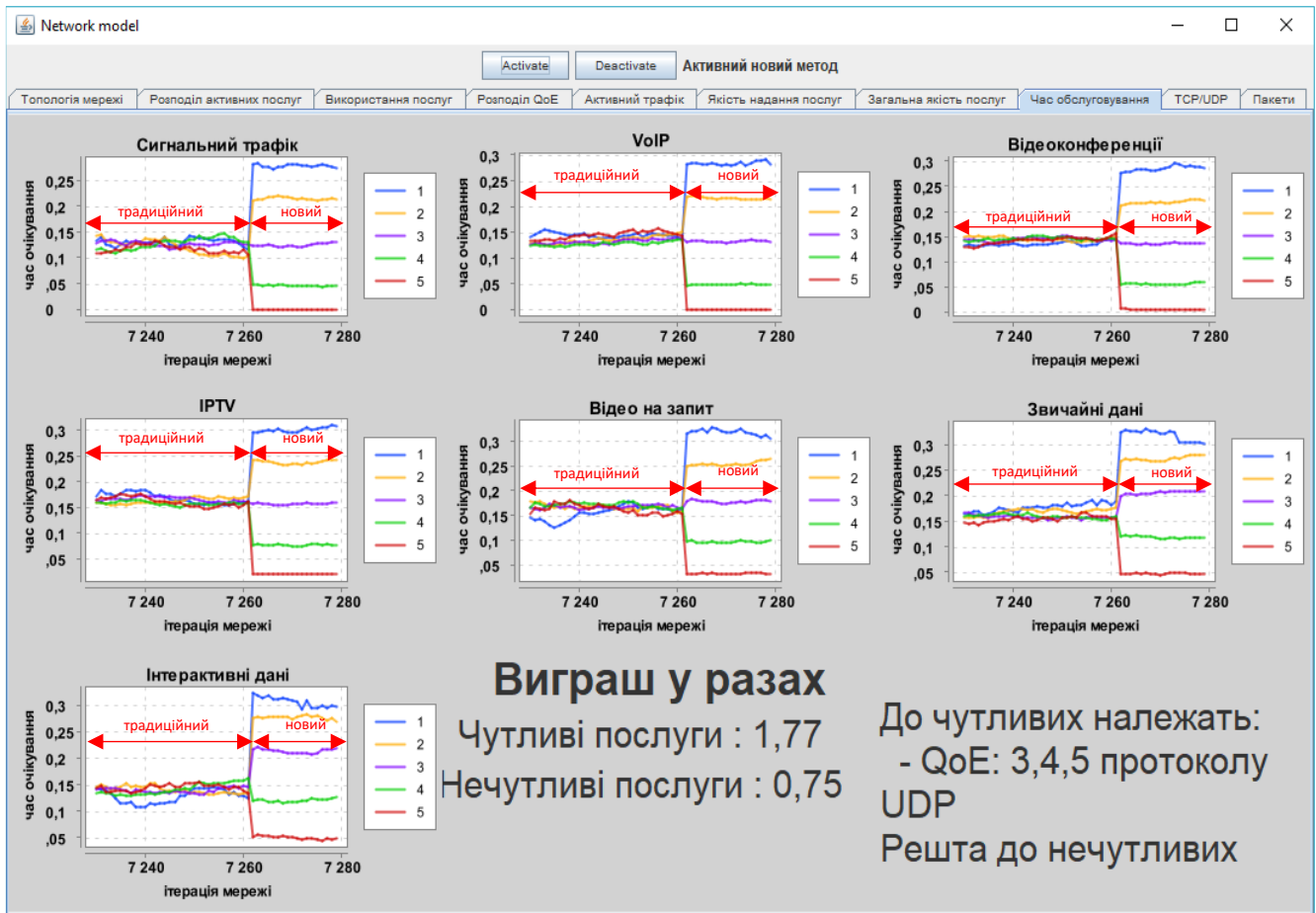


Рис. 7. Порівняння методів традиційного та розробленого клієнт-орієнтованого управління якістю послуг за критерієм середнього часу очікування сервісу відповідної QoE оцінки

Перевагою розробленої імітаційної моделі є можливість досліджувати нові рішення для майбутньої концепції інтенційно-орієнтованих мереж шляхом інтеграції унікальних алгоритмів у ядро мережі.

В четвертому розділі роботи – «Інтелектуальна система моніторингу та аналізу трафіку для автоматизованого виявлення аномалії і запобігання атак в інтенційно-орієнтованих мережах» – розглянуто функціональність розробленої універсальної програмної системи класу DPI, як одного із важливих інструментів, що дає можливість отримувати надійні, актуальні дані про активність користувачів мережі і управляти трафіком в пропонуваній концепції IBN. Запропоновані у роботі рішення на основі DPI дають змогу отримувати повну картину використання ресурсів мережі, виявляти користувачів, які споживають великі обсяги трафіку, а також ефективно управляти трафіком в режимі реального часу, що допомагає автоматизовано створювати або оптимізувати сервісні пропозиції, підвищувати якість послуг, управляти сервісними політиками і забезпечувати захист мережі і її користувачів. Попередньо зібрані статистичні дані, що надаються розробленою системою DPI у вигляді звітів, здатні надати серйозну допомогу при автоматизованому пошуку несправностей, прогнозуванні обсягу трафіку в наступний момент часу і відповідно якісному проведенні регулювання інформаційними потоками. У свою чергу це дає змогу грамотно планувати розвиток самої IBN мережі та забезпечувати адаптивне надання сервісів з використанням існуючих алгоритмів машинного навчання.

Найбільш складною частиною існуючих DPI-систем є підсистема аналізу трафіку, адже трафік реальних мереж дуже різноманітний, складається з безлічі

протоколів та додатків, що у свою чергу для прийняття правильного розпізнавання інформаційних протоколів вимагає розробки нових DPI-систем, які повинні базуватися на комплексних методах аналізу трафіку. Таким чином, використання та дослідження існуючих методів аналізу трафіку, що проводилися в даній роботі, таких як сигнатурний, числовий, поведінковий та евристичний, аналіз стану протоколу та зразка, дали змогу розробити на їх основі ефективні алгоритми розпізнавання основних інформаційних протоколів DNS, RTP, HTTP, TLS, BitTorrent, uTP. Також для детального вивчення принципів роботи протоколів використовувалися програми Wireshark та HexEditorNeo та існуюча протокольна специфікація. У роботі вважається, що автоматизоване розпізнавання інформаційних протоколів серед вхідного трафіку є першою фазою констаткування факту легітимності трафіку, оскільки невідомий трафік в IBN мережах вказуватиме на можливість несанкціонованого доступу чи аномалії трафіку, який потребує блокування або більш детального аналізу.

Для вирішення проблеми виявлення мережевих аномалій та розпізнавання атак запропоновано **метод формування набору інформативних ознак, що формалізують нормальну та аномальну поведінку системи на основі оцінки параметра Херста (H)** мережевого трафіку. Встановлено, що шляхом проведення ряду контрольних вимірювань і заповнення таблиці по кожному трафіку користувача можна в подальших спостереженнях робити висновки про нормальність або аномальність трафіку, ґрунтуючись на віддаленості отриманих фактичних значень параметра Херста, від навчених значень еталонного трафіку без аномалії. У зв'язку із простотою та високою швидкістю обрахунку для визначення параметра Херста трафіку використано R/S методику. Згідно, якої визначається середнє значення інтенсивності надходження пакетів вхідного трафіку (30а). Визначається дисперсія інтенсивності надходження пакетів вхідного трафіку (30б). Для оцінювання розмаху значень інтенсивності надходження пакетів запропоновано використати інтегральне відхилення, яке являє собою поінтервальне визначення відхилення суми значень інтенсивності трафіку від середніх значень інтенсивності, відповідно інтегральне відхилення визначається згідно виразу (30в). Відповідно, утворюється масив даних, для якого визначається розмах як різниця між максимальним та мінімальним значенням інтегрального відхилення (30г).

$$M_N = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k \quad \text{а)} \quad S_N^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X_k - M)^2 \quad \text{б)} \quad D_j = \sum_{k=1}^j X_k - jM, \quad j \in [1; N] \quad \text{в)} \quad R_N = \max_{1 \leq j \leq N} D_j - \min_{1 \leq j \leq N} D_j \quad \text{г)} \quad (30)$$

Зі співвідношення (31) визначається параметр Херста H для вхідного трафіку:

$$H = \frac{\lg\left(\frac{R_N}{S_N}\right)}{\lg\left(\frac{N}{2}\right)}. \quad (31)$$

Вимірювання параметра Херста відбуваються із певним встановленим вікном моніторингу, зокрема отримані значення записуються у таблиці користувачів кожних 3, 15 та 60 сек. Для кожного вікна спостереження визначається дисперсія S_N , середнє значення M_N та параметр Херста H . Після чого робиться висновок про присутність у трафіку аномалії шляхом їх порівняння із еталонним трафіком. Для прикладу, якщо еталонний трафік володіє наближеним нормальним розподілом, то

для порівняння відхилень значень параметра Херста можна використати правило “трьох сигм”. Блок-схема запропонованого методу виявлення аномалії і запобігання атак на основі оцінки критерію Херста інформативних ознак трафіку показано на рис. 8а. На основі вищезазначених міркувань *розроблено нову програмну систему DPI для дослідження ефективності запропонованих рішень*, щодо контролю потоків інформаційних протоколів та виявлення аномалій за допомогою критерію Херста. Ядро системи реалізоване за допомогою середовища розробки Microsoft Visual Studio 2013. Графічний інтерфейс розроблений з використанням фреймворку Qt 5.6.2. Функції захоплення пакетів з мережевих інтерфейсів та управління трафіком реалізовані за допомогою бібліотеки WinSock. Для написання робочої програми використано мову програмування C++. Структурна схема розробленої програмної системи DPI зображена на рис. 8б.

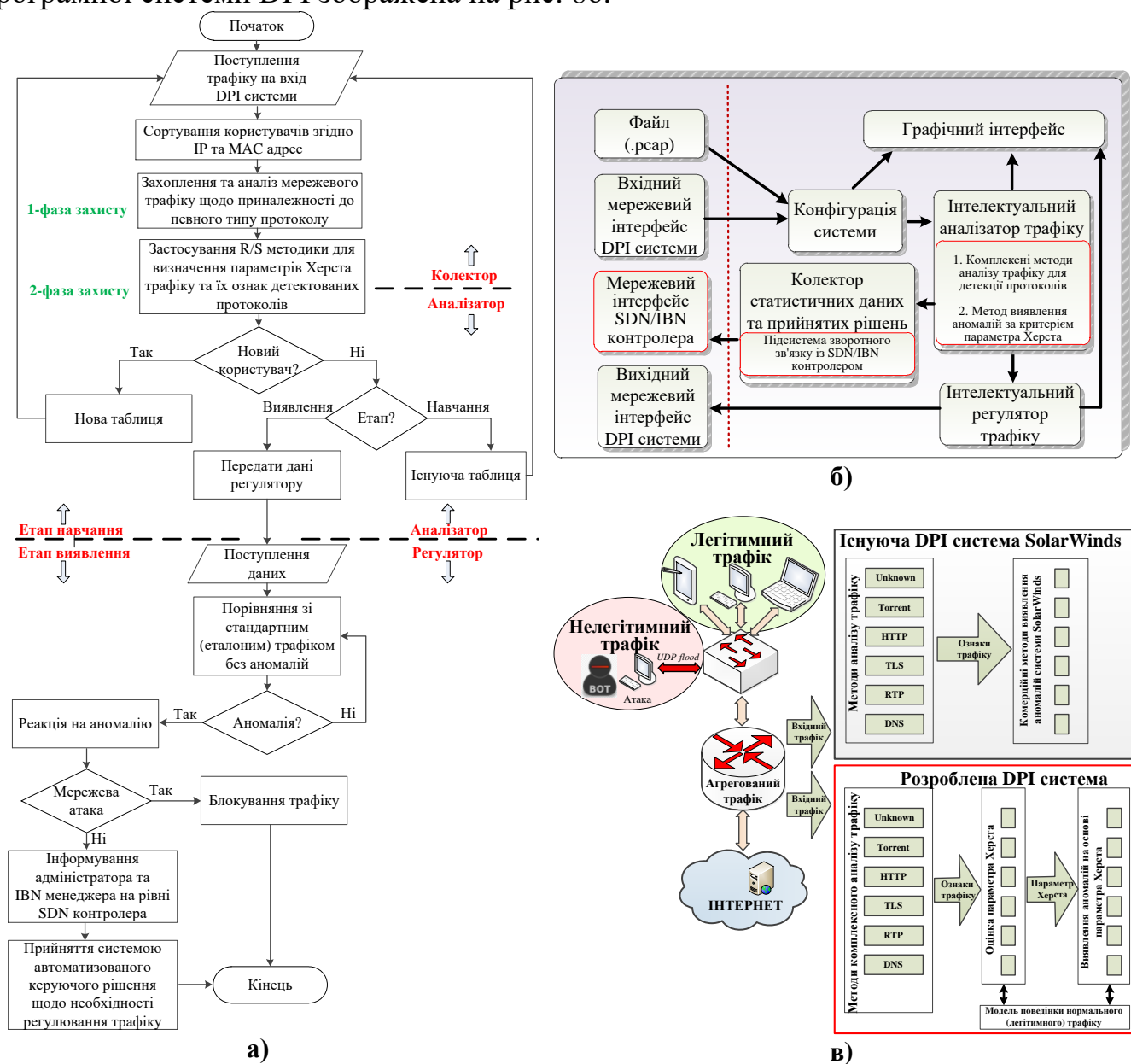


Рис. 8. Блок-схема методу виявлення аномалії і запобігання атак на основі оцінки критерію Херста інформативних ознак трафіку – а), структурно-функціональна схема інтелектуальної DPI системи – б), експериментальний стенд реальної корпоративної мережі для порівняння ефективності функціонування існуючої DPI системи із запропонованою – в)

У роботі проведено порівняння розробленої інтелектуальної програмної DPI системи із існуючою системою DPI SolarWinds, яка також включає у себе функції виявлення мережових аномалій, контролю трафіку, детектування інформаційних протоколів та розпізнавання атак. Для порівняння побудовано експериментальний стенд реальної корпоративної мережі схема якого показано на рис. 8в. Для подальшого аналізу та порівняння систем відбувається захоплення мережових пакетів від усіх користувачів, включаючи нелегітимний трафік та різноманітність створюваних ними протоколів RTP, Torrent, HTTP, TLS та іншими типами. Для генерації нелегітимного трафіку використано атаку типу *Non-Spoofed UDP Flood*. Відмінність від *UDP Flood* полягає в тому, що UDP пакети генеруються з реальних IP-адрес ботами, що істотно ускладнює виявлення цих видів атак, які спрямовані на вичерпання системних ресурсів і заповнення каналу "непотрібним" трафіком.

Першим етапом експерименту є моніторинг завантаженості каналу мережі існуючою DPI SolarWinds та пропонованою DPI системами в умовах передавання лише законного трафіку. Обидві системи показали однакові результати використання пропускної здатності (рис. 9а). Як бачимо з рис. 9а (область зеленого кольору) на початковому етапі, навантаження на інтерфейс незначне і коливається на рівні 2 Мбіт/с, а рівень втрат – 0% від загального навантаження. Цей період часу показує завантаженість каналу в умовах низьких навантажень, створюваними такими протоколами, як HTTP, TLS та невідомим трафіком. При подальшому моніторингу внаслідок появи трафіку RTP протоколу, спостерігається зростання навантаження на інтерфейс до 38 Мбіт/с із загальною втратою даних – 1,8% від сумарного вхідного трафіку у Мбіт/с (область жовтого кольору рис. 9а). Слід зазначити, що втрати на певних періодах спостереження спричинені сплесковістю трафіку і не є постійними.

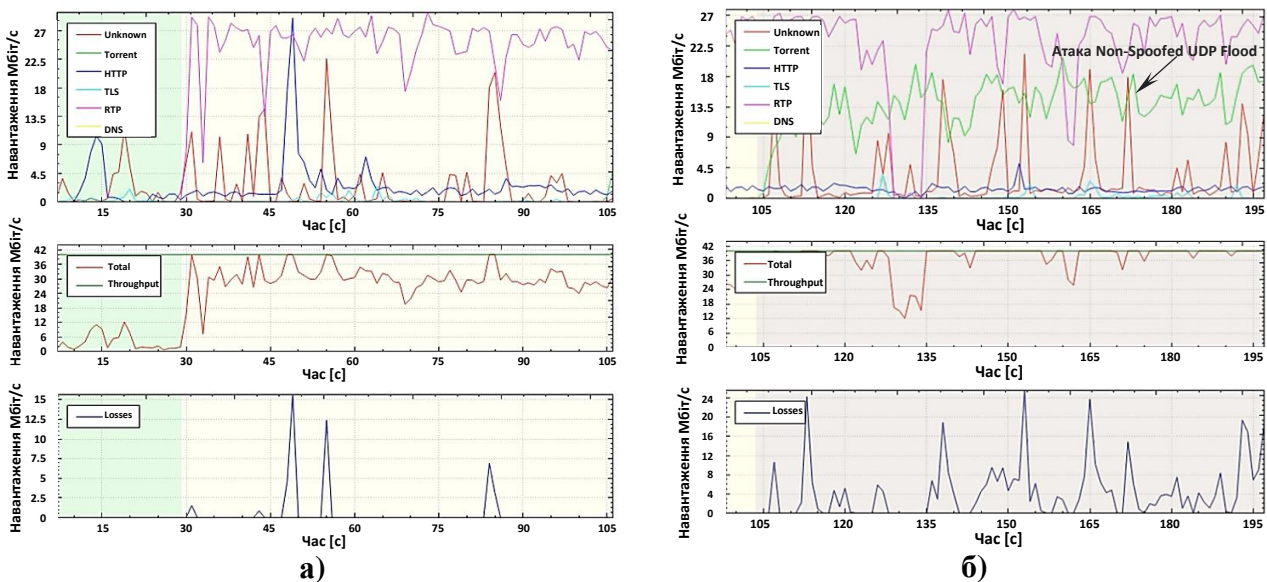


Рис. 9. Моніторинг пропускної здатності каналу під час передавання законного трафіку за допомогою існуючої DPI SolarWinds та запропонованої системи DPI – а), моніторинг пропускної здатності каналу під час передавання легітимного та нелегітимного трафіку (Non-Spoofed UDP Flood) за допомогою системи SolarWinds DPI – б)

Другим етапом експерименту є моніторинг пропускної здатності в процесі передавання легітимного та нелегітимного трафіку (атаки класу UDP Floods) за допомогою існуючої системи DPI SolarWinds. Система SolarWinds DPI виявляє Non-Spoofed UDP Flood атаку як легітимний трафік uTP, що теж передається протоколом

UDP. Моніторинг пропускної здатності під час передавання трафіку атаки за допомогою графічного інтерфейсу системи DPI показано на рис. 9б. Як бачимо з рис. 9б, це призводить до значних втрат інших видів трафіку, таких як RTP та HTTP, рівень загальних втрат збільшився до 7,2%, а максимальний відсоток поточних втрат склав 48%, також характер втрат із стрибкоподібного змінився на постійний. Це свідчить про те, що щосекунди втрачається до 48% корисного навантаження. Такі втрати неприпустимі для проведення, наприклад, відеоконференцій, IP-телефонії або комфортного серфінгу в Інтернеті.

Третім етапом експерименту є моніторинг пропускної здатності в процесі передавання легітимного та нелегітимного трафіку (атаки класу UDP Floods) за допомогою запропонованої системи DPI. Зокрема для кожної групи тестових даних DPI системою знайдено діапазон $(-3S_N; +3S_N)$ відхилення критерію Херста та оцінено статистичну значимість відмінностей середніх значень від еталонного (модель поведінки нормального легітимного трафіку). Використовуючи запропоновану систему, у 3-секундному вікні моніторингу створювана атака розпізнається як протокол uTP із підозрою на аномалію. Оскільки оцінений параметр Херста не знаходиться в межах $(-1S_N; +1S_N)$, що показано на рис. 10а та згідно запропонованого алгоритму на рис. 8а, будуть вжиті обмежувальні заходи. У цьому випадку дані, що мають вищий пріоритет, передаються першими. Під час роботи режиму пріоритетності трафіку "шкідливий" трафік передається лише тоді, коли це не погіршує якість інших послуг.

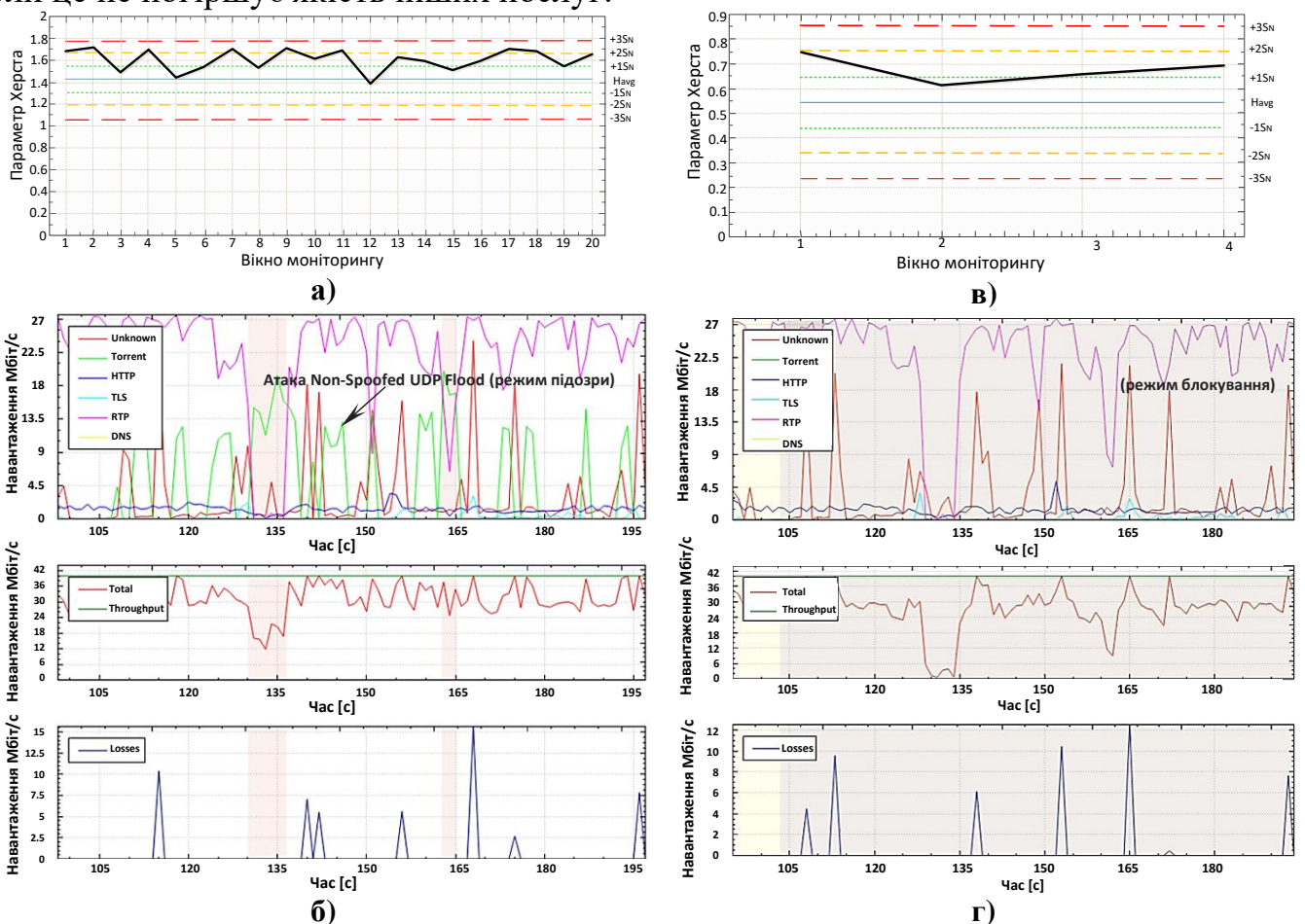


Рис. 10. Зміна параметра Херста для класу підозри на "аномалію" у 3-х секундному вікні моніторингу – а), моніторинг пропускної здатності каналу під час передавання легітимного та нелегітимного трафіку за допомогою розробленої системи DPI (режим підозри) – б), зміна параметра Херста у 15-ти секундному вікні моніторингу – в), моніторинг пропускної здатності каналу під час передавання легітимного та нелегітимного трафіку за допомогою розробленої системи DPI (режим блокування) – г)

На рис. 10б червоним кольором позначені області, де навантаження незначне. Для оператора це означає простий каналу, тому для запобігання простою в дані моменти часу, передається розпізнаний протокол uTP, як торрент трафік, проте розроблена DPI система ще не повністю провела аналіз щодо виявлення аномалії по даному трафіку. У даному випадку забезпечується достатній рівень QoS для послуг з високим пріоритетом, але дані торрентів повністю не блокуються. Із використанням даного режиму, при навантаженні 52.52 Мбіт/с, рівень загальних втрат складав 2%, а максимальні поточні втрати 19% (рис. 10б).

Але, згідно із запропонованим алгоритмом виявлення аномалії, після моніторингу 3-х секундного вікна система буде чекати на отриманні значення 15-секундного вікна моніторингу та порівнювати параметр Херста із таблицями, розрахованими на етапі навчання. Оскільки обчислюваний параметр Херста для 15 секундного вікна моніторингу знаходиться в межах $(+1S_N; +2S_N)$ (рис.10в), то відповідно до алгоритму рис. 8а, якщо діапазон відхилень лежить в межах $(+1S_N; +2S_N)$ будуть вжиті обмежувальні заходи, і система буде продовжувати чекати значення хвилинного вікна. Побудова графіку для вікна хвилинного моніторингу не має сенсу, оскільки значення існує в одній копії, і як критерій аномальності буде використано просте порівняння значень H для $H_{avg1-60} \leq H$. З рис. 10в видно, що для цього експерименту $H_{avg1-60} = 0,403$ та $H = 0,599$, при якому можна вважати, що трафік є аномальним відносно контрольних значень $0,403 < 0,599$. Після чого система автоматично заблокувала аномальний трафік, що дало змогу звільнити пропускну здатність системи та покращити параметри якості обслуговування. На рис. 10в показано, в якому із вікон моніторингу значення аномального трафіку перевищили поріг і в якому діапазоні вони потрапили за допомогою запропонованої системи. Моніторинг пропускну здатності під час передавання законного та нелегітимного трафіку із використанням запропонованої системи DPI після блокування аномалії показано на рис. 10г. В результаті блокування розпізнаної атаки максимальна втрата даних становить 16%, а рівень загальних втрат при загальному вхідному навантаженні на інтерфейс 53,736 Мбіт/с зменшився від 7,2% до 2% у порівнянні із системою DPI SolarWinds (рис. 10г).

Запропонована система має знання класу "норма" для більшості існуючих протоколів, таких як DNS, HTTP, RTP, Torrent та TLS. А розроблена програмна система DPI може виявляти атаки, такі як: SYN Flood, фрагментація HTTP, UDP Flood, DNS Flood, Media Data Flood, Non-Spoofed UDP Flood.

П'ятий розділ роботи – «Методологія адаптивного структурно-функціонального синтезу гетерогенної інтенційно-орієнтованої мережі» – присвячений розробленню методології адаптивного структурно-функціонального синтезу гетерогенної інтенційно-орієнтованої інфраструктури. У зв'язку із тим, що запропонована методологія синтезу повинна базуватися на таких принципах, як ієрархічності та декомпозиції об'єкту дослідження; узгодження цілей та координації управління; потокового аналізу і моделювання процесів; оптимального, адаптивного та інтенційно-орієнтованого управління, особливу увагу у процесі синтезу гетерогенної ІВН мережі для адаптивного надання сервісів присвячено рівню радіодоступу мереж 2G-5G. Зокрема, для врахування мінливих намірів користувачів щодо якості обслуговування у роботі удосконалено існуючі методи оптимального вибору технології та формування структури рівня радіодоступу, розроблено нові методи планування, розподілу та оптимізації частотно-часових ресурсів.

Відповідно, розроблено *метод розподілу частотно-часових ресурсів низхідного та висхідного каналу зв'язку гетерогенної мережі LTE/NB-IoT*, який, на відміну від відомих, враховує наміри користувачів щодо рівня якості надання сервісів Інтернету речей та проводить адаптивне інтелектуальне планування процесом виділення радіоресурсів на основі аналізу пріоритетності даних, зокрема у вузькосмуговому NB-IoT спектрі, що дало змогу забезпечити необхідну інтенційно-орієнтовану якість обслуговування із кінця в кінець. Для забезпечення інтелектуального планування радіоресурсів контролером мережі розроблено алгоритми управління “розумною чергою” IoT запитів на основі аналізу нововведеної інтенційно-орієнтованої пріоритезації трафіку. Зокрема, запропоновано 4 класи сервісів IoT з різними вимогами до QoS (L1, L2 – трафік реального часу, L3, L4 – нереального часу). На рис. 11 наведено блок-схеми алгоритмів обслуговування трафіку IoT реального часу, що відносяться до класу L1 та L2. Зокрема (блок 6→3) описує процес обслуговування критично-важливих IoT даних класу L1 в умовах недостатності необхідних ресурсів в межах основної базової станції. Вирішення даної проблеми здійснюється шляхом *балансування навантаження* на менш завантажену базову станцію використовуючи для цього централізовану систему моніторингу частотно-часових ресурсів мережі, що дало змогу забезпечити ультранадійний зв'язок з низькими затримками.

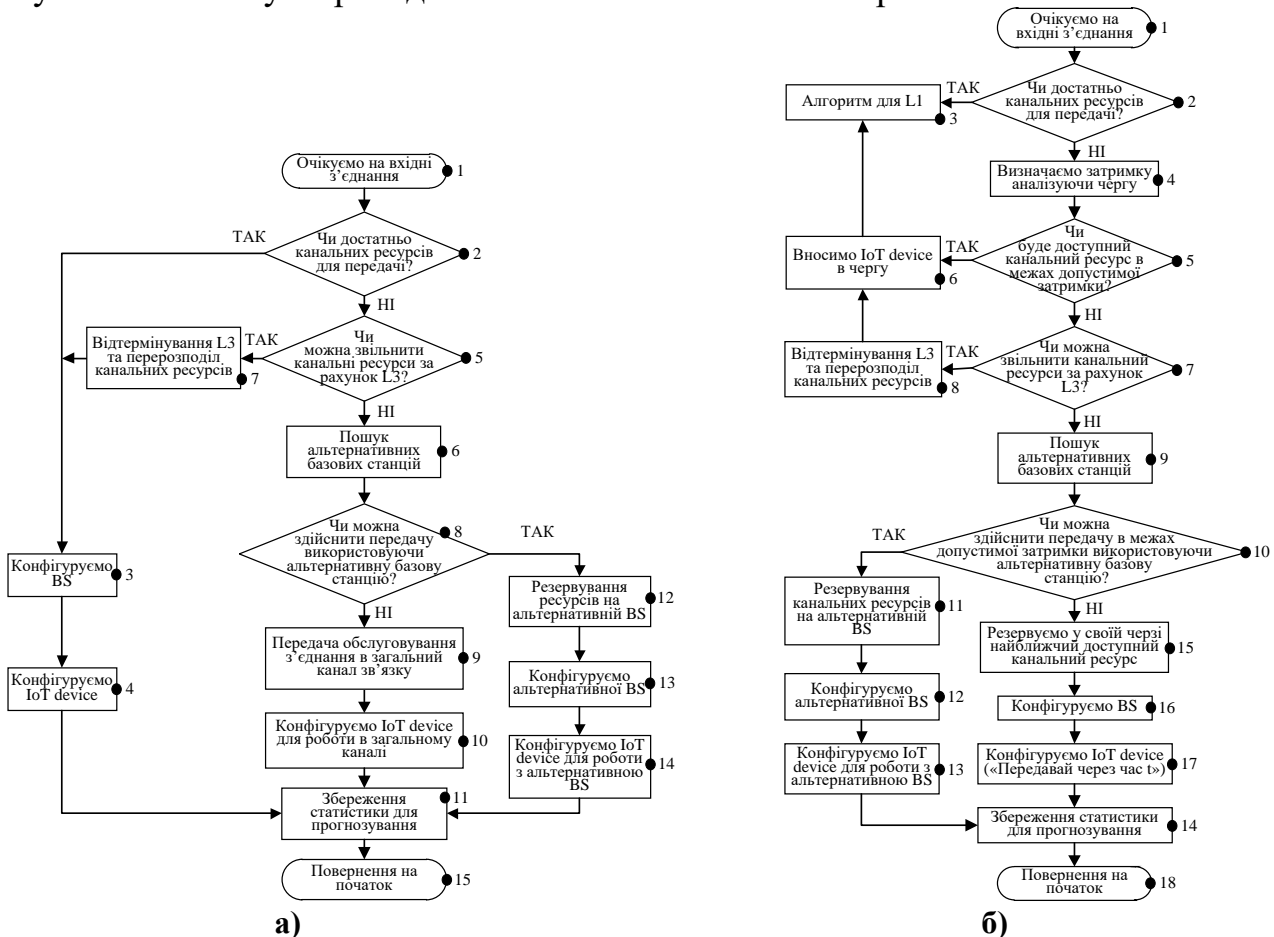


Рис.11. Блок-схеми алгоритмів управління “розумною чергою” для IoT класу L1 – а) та L2 – б)

Найбільш ефективний результат в забезпеченні необхідного рівня якості обслуговування в LTE досягається за рахунок вирішення проблеми розподілу частотно-часових ресурсів в каналах downlink (вниз) і uplink(верх). Таким чином, запропоновано розподіляти ресурси в низхідному і висхідному каналах IoT,

використовуючи запропоновані алгоритми управління "розумною чергою", зокрема для каналу вниз показано на рис.12. Для цього у роботі здійснено модифікацію логічних каналів управління з метою гнучкого управління QoS на каналному рівні. Зокрема, додатково введено нові канали, які передають сигнальну інформацію про

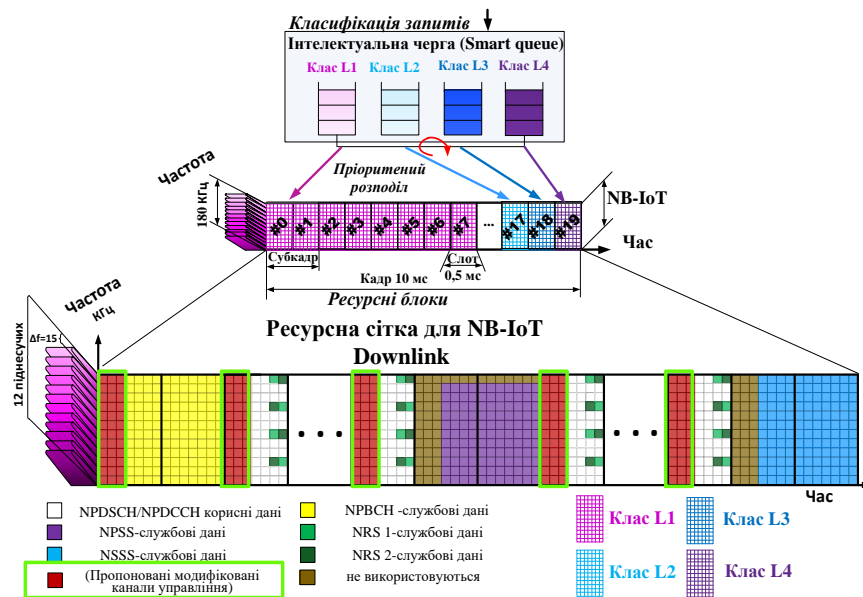


Рис. 12. Ресурсна сітка LTE/IoT для низхідного каналу зв'язку (Downlink)

блок ресурсів для конкретного сенсора IoT з його пріоритетом і унікальним ідентифікатором пристрою. На відміну від відомих рішень, ці канали дають змогу виділити один ресурсний блок для передавання невеликого повідомлення від датчика IoT і забезпечити мінімальну затримку 0,5 мс в кадрі. Ці затримки особливо важливі для тактичних даних IoT в реальному часі. Для дослідження ефективності запропонованих рішень

розроблено імітаційну модель гетерогенної мережі LTE/ NB-IoT. Дана модель працює за принципом емуляції дискретних подій та базується на використанні інструменту Discrete-Event Simulation and Modelling in Java DESMO J, що забезпечує адекватність розроблення таких програмних функцій, як черги радіоканалів, генерація випадкових чисел та різні статистичні розподіли. Спрощена структурно-функціональна схема моделі, відображена на рис. 13, де червоним кольором показано нововведенні блоки.

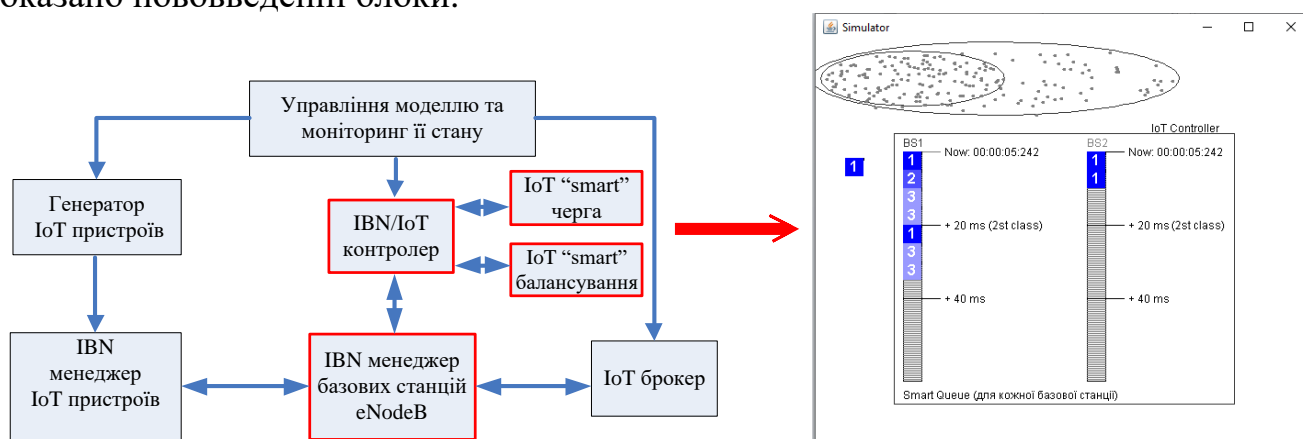


Рис. 13. Структурно-функціональна схема імітаційної моделі мережі LTE/IoT

Моделювання проводиться у три етапи:

Перший етап (I) полягає у дослідженні E2E QoS при обслуговуванні потоку вхідних запитів за принципами існуючого методу (*Proportional Fair Scheduling*).

Другий етап (II) полягає у дослідженні E2E QoS при обслуговуванні потоку вхідних запитів згідно запропонованого методу пріоритизації трафіку IoT (*P.IoT*).

Третій етап (III) полягає у дослідженні E2E QoS при обслуговуванні потоку вхідних запитів при одночасній реалізації методів пріоритизації трафіку (*P.IoT*) та балансування навантаження (*LB.IoT*).

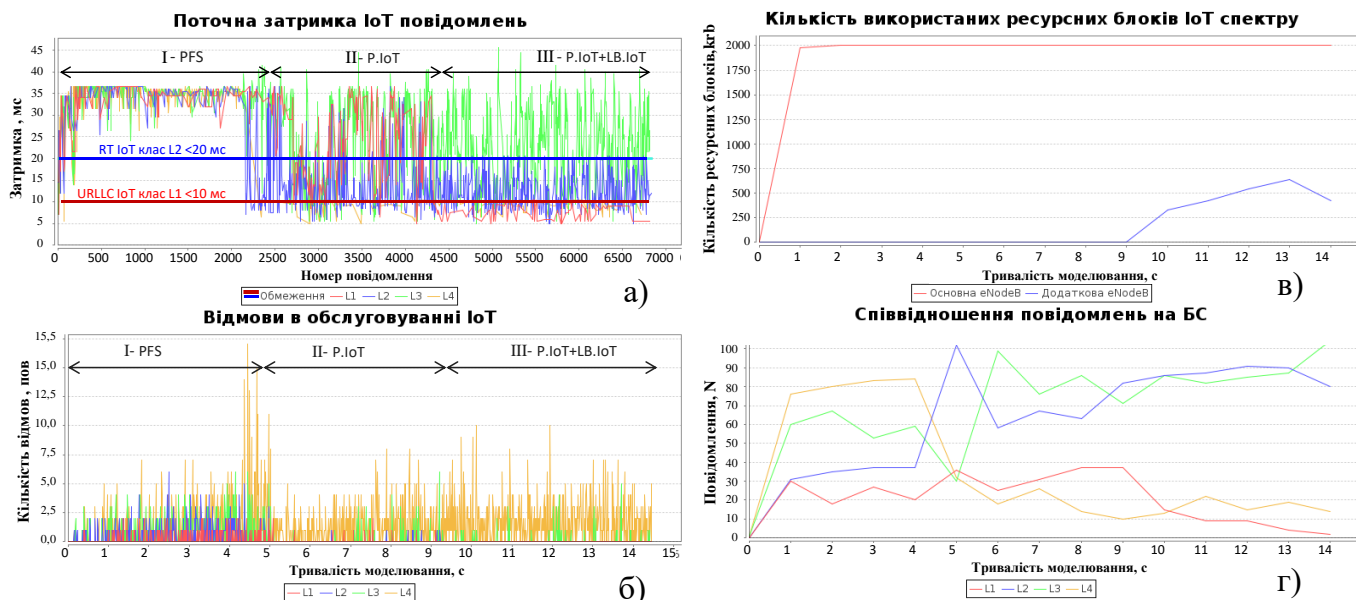
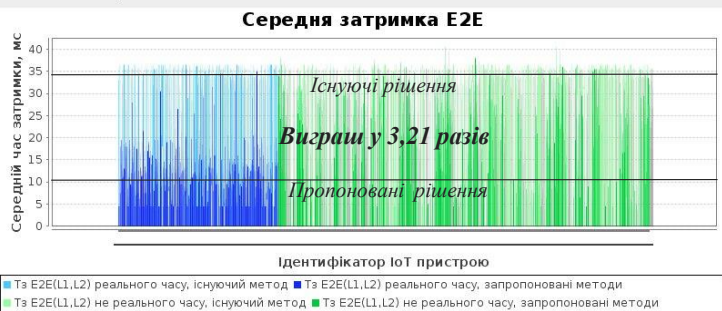
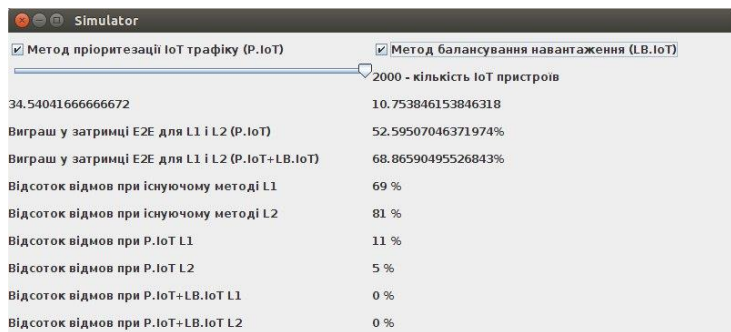
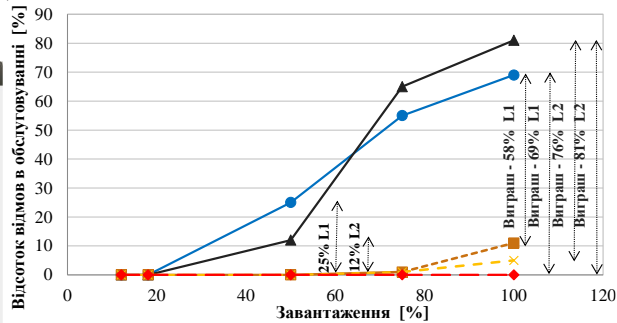


Рис. 14. Поточна затримка в процесі передавання IoT повідомлень – а), кількість відмов – б), кількість використаних ресурсних блоків IoT спектру – в) та співвідношення кількості переданих повідомлень різних пріоритетів – г)

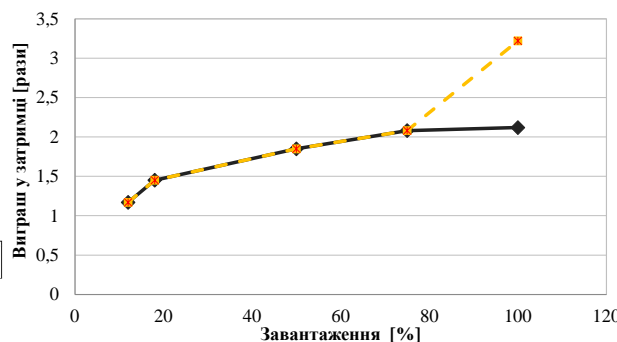
Встановлено, що одночасна робота методу пріоритезації IoT трафіку і методу балансування навантаження забезпечує зменшення середньої затримки E2E для пристроїв, які передають дані в режимі реального часу для L1 та L2 (рис.14а). Також представлено відсоток відмов у обслуговуванні для пріоритетних пристроїв при застосуванні запропонованих методів (рис.14б).



а)



б)



в)

Рис.15. Графічний інтерфейс імітаційної моделі результатів порівняння ефективності запропонованих рішень – а), оцінка ефективності запропонованих методів у порівнянні із відомим PFS методом за критерієм “відмов в обслуговуванні” для пріоритетних IoT пристроїв (класів L1, L2) – б) та “затримки обслуговування” – в) в умовах різного завантаження IoT контролера

На основі імітаційного моделювання встановлено, що методи пріоритезації IoT трафіку та балансування навантаження, дають змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу з кінця в кінець на 68,8% в гетерогенній мережі LTE/NB-IoT (рис.15б). При використанні механізму пріоритезації, зменшити кількість відмов у обслуговуванні на 58% для класу L1 та 76% для L2 у порівнянні з існуючими методами в умовах високого навантаження (рис.15в). У випадку одночасного використання запропонованих рішень досягається мінімальна кількість відмов для сервісів IoT класу L1 та L2 в умовах недовантаженості альтернативних базових станцій.

Для синтезу рівня радіодоступу сучасних мереж нового покоління розроблено **адаптивний інтенційно-орієнтований метод розподілу ресурсів та формування структури рівня радіодоступу 4G/5G**, який відрізняється від відомих урахуванням локалізації групи інтенційно-орієнтованого користувачького навантаження та аналізом замовлених *QoE* оцінок щодо забезпечення необхідного рівня якості сприйняття сервісу, що дало змогу ефективніше використовувати наявні енергетичні та частотно-часові ресурси із забезпеченням замовленої якості обслуговування. З метою оцінки ефективності запропонованих рішень в процесі синтезу радіодоступу та оптимізації мережі за критерієм замовленої якості обслуговування користувачів **розроблено імітаційну модель інтенційно-орієнтованої гетерогенної мережі 4G/5G**, яка, на відміну від існуючих засобів моделювання, враховує основні технічні параметри функціонування стандарту LTE для створення реальних умов дослідження та автоматизує у вигляді програмного коду запропонований метод інтенційно-орієнтованого управління частотно-часовими ресурсами та формування структури рівня радіодоступу.

Для оцінки ефективності впровадження нового методу, використано критерій ймовірність того, що користувач отримає певну пропускну здатність каналу. Для цього у роботі використано кумулятивну функцію розподілу (cumulative distribution function), CDF ймовірності виділення середньої пропускну здатності для одного користувача в умовах використання різних методів розподілу радіоресурсів. На основі імітаційної моделі проведено порівняння кумулятивних функції розподілу пропускну здатностей користувачів при використанні існуючих методів розподілу ресурсів RR, PF та із використанням запропонованого інтенційно-орієнтованого методу, по відношенню до еталонної кумулятивної функції розподілу пропускну здатностей користувачів сформованої на основі їх замовлених *QoE* оцінок, які характеризують певний рівень якості обслуговування (зокрема виділення необхідної пропускну здатності для перегляду відео сервісу у замовленій якості). Відповідно, ефективнішим буде цей метод розподілу ресурсів, кумулятивна функція якого наближається до еталонної. Порівняння проводилось для двох випадків локалізації користувачів: в умовах переважної локалізації в граничній зоні комірки (низькі значення SINR рис.16а) та в центральній зоні комірки (високі значення SINR рис. 16б). В результаті порівняння встановлено, що запропонований інтенційно-орієнтований метод дає змогу забезпечити кращу адаптивність розподілу ресурсів щодо забезпечення замовленої якості обслуговування у порівнянні із відомими. Зокрема, запропонований метод проводить раціональний розподіл ресурсів аналізуючи оцінки користувачів *QoE*, шляхом розв'язання завдання гнучкого перерозподілу частотно-часових ресурсів між різними вимогами користувачів адаптуючи функцію до еталонної, що показано на рис.16.

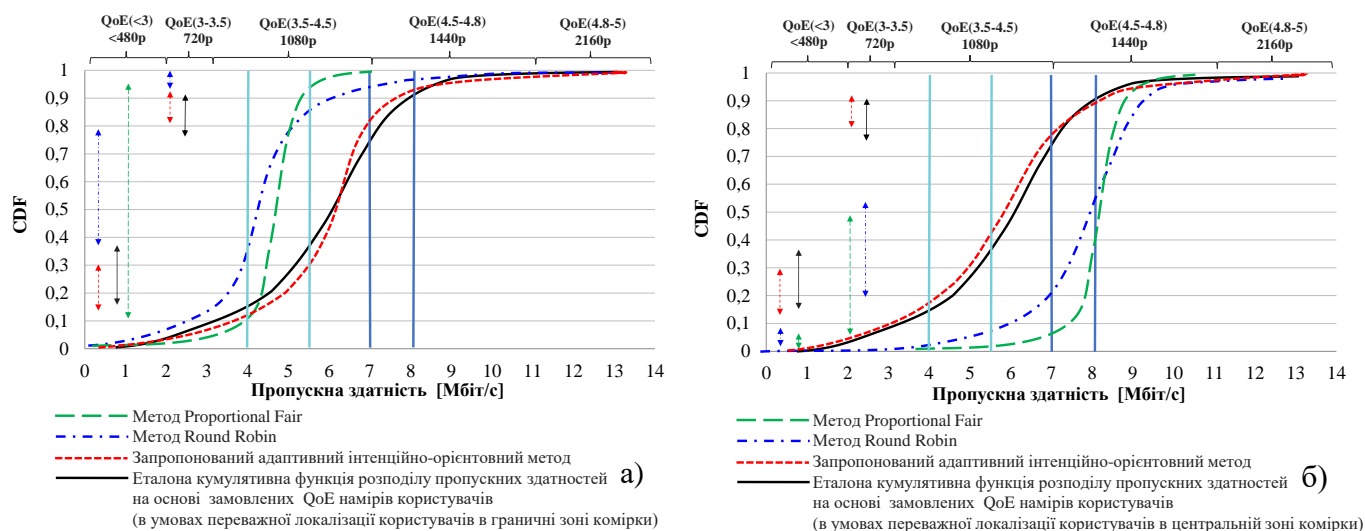


Рис. 16. Порівняння кумулятивних функцій розподілу пропускних здатностей користувачів в умовах різної локалізації користувачів при низьких SINR – а) та високих SINR – б) (в умовах використання запропонованого та існуючих методів розподілу радіоресурсів)

Також у роботі проведено дослідження можливості використання запропонованого методу для адаптивного формування структури рівня радіодоступу 4G/5G з метою зменшення енергоспоживання IBN мережі рівнем радіодоступу. Зокрема пропонується, коли базові станції не обслуговують жодного абонента слід їх переводити в режим енергозбереження і тим самим формувати структуру RAN (Radio Access Network), яка буде підлаштовуватися під потреби користувачів, тобто параметри рівня радіодоступу будуть динамічно змінюватися залежно від замовленого рівня якості обслуговування. Для повноцінного підвищення енергоефективності IBN мережі необхідно аналогічну процедуру забезпечити як на рівні серверів в процесі організації віртуальних машин VM, так і на рівні мережі (енергоефективна QoE-маршрутизація, розділ 2), при цьому використовуючи мінімальну кількість мережевих вузлів із забезпеченням вимог щодо замовленої якості обслуговування користувачів (рис.17).

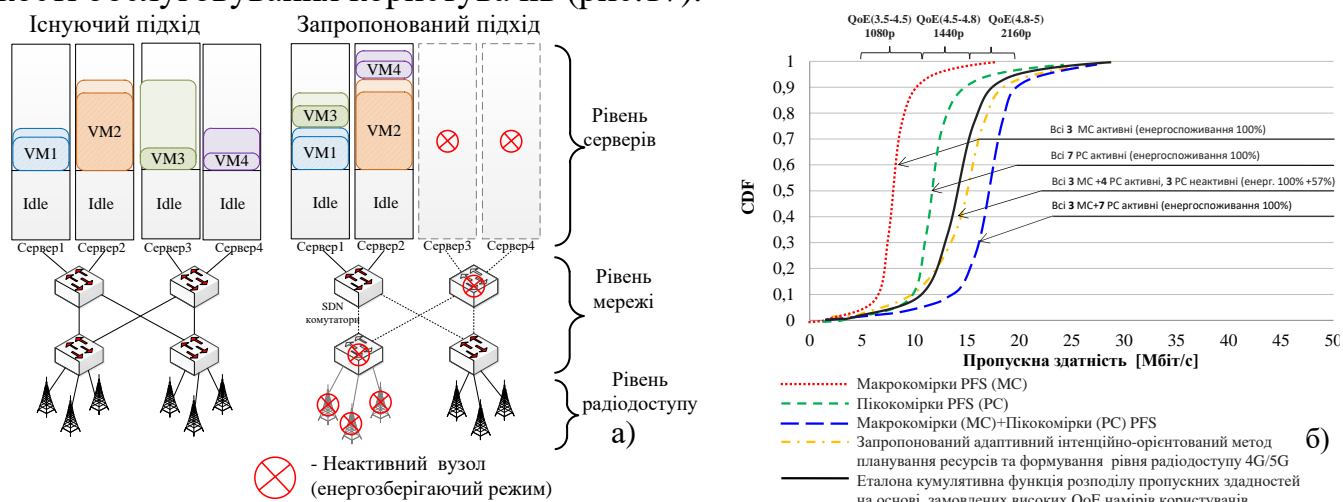


Рис.17. Принцип методу розподілу ресурсів та формування структури рівня радіодоступу в IBN для підвищення енергоефективності мережі – а), порівняння кумулятивних функцій розподілу пропускних здатностей користувачів в умовах різної кількості активних базових станцій – б) (в умовах використання запропонованого та існуючих методів розподілу радіоресурсів)

Для кількісної оцінки ефективності використання розробленого методу розподілу ресурсів в мережах 4G/5G у роботі сформовано критерій якості обслуговування користувачів Q , який також може бути використаний для операторів мобільного зв'язку в процесі оптимізації мережі:

$$Q = \frac{\sum_{QoE=1}^5 \sum_{i=1}^{Nab_{\cdot QoE}} Y_{iQoE_{поточна}} (P_{ціна_{QoE_{поточна}}})}{\sum_{QoE=1}^5 \sum_{i=1}^{Nab_{\cdot QoE}} Y_{iQoE_{потреб}} (P_{ціна_{k.max}})}, \quad (32)$$

де $Y_{iQoE_{поточна}}$ – пропускна здатність, що надана i -му абоненту QoE -ї категорії, $P_{ціна_{QoE_{поточна}}}$ – ціна сервісу абонента в залежності від швидкості, яка йому надана, $P_{ціна_{k.max}}$ – максимально можлива ціна сервісу абонента, $Y_{iQoE_{потреб}}$ – швидкість, яку потребує i -й абонент для QoE -ї категорії.

$$Y_{iQoE_{поточна}} = (N_{RB} \cdot m \cdot n \cdot MIMO \cdot Kod_{RATE} \cdot \log 2(Modul)) \cdot S \quad (33)$$

де (S) відсоток корисних даних в кадрі ($S=0.75$), число виділених ресурсних блоків (N_{RB}) на протязі секунди, кількість ресурсних елементів ($m=12$ – кількість піднесучих, $n=7$ – кількість символів), кількість антен, швидкість коду Kod_{RATE} , позиційність модуляції $\log 2(Modul)$.

Нормоване значення критерію Q змінюється від 0 до 1, де вище значення означає кращу якість обслуговування та розраховується як середнє значення для кожної зони із 9 комірок (від 1 до 16), що характеризують певний рівень індикатора якості каналу CQI в умовах використання різної ширини каналу від 0.2 до 20 МГц.

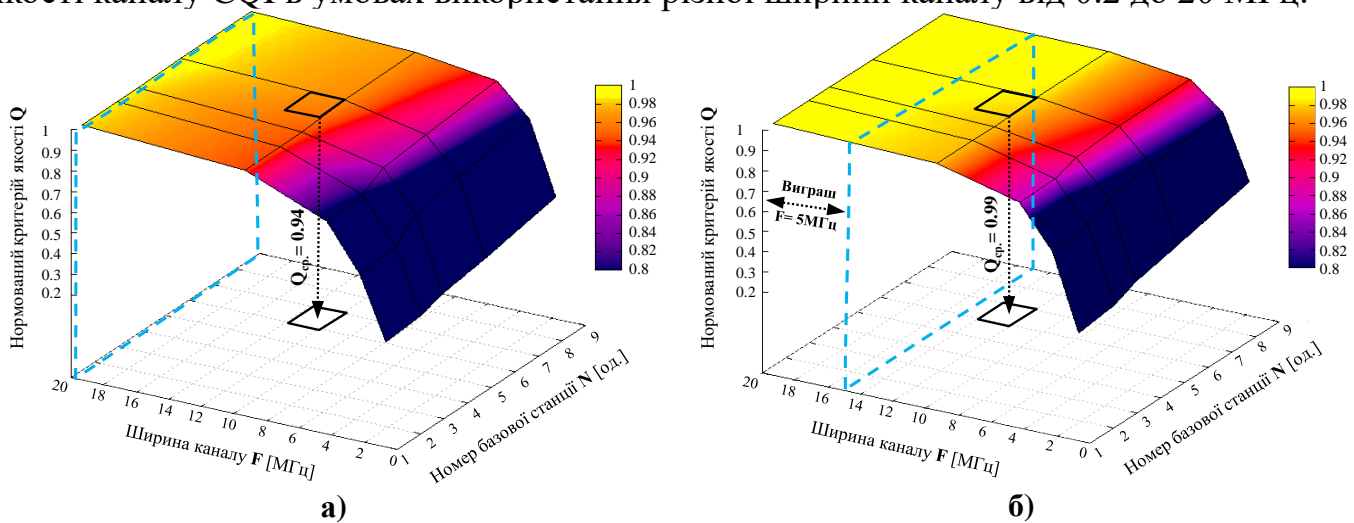


Рис. 18 Традиційні методи управління ресурсами (оцінка критерія якості Q) – а) та пропонувані методи управління ресурсами (оцінка критерія якості Q) – б)

На рис. 18а показано, що для забезпечення високого рівня замовленої якості обслуговування у мережі із 9 базових станцій, що відповідає значенню $Q=1$, оператору мережі необхідно мати ширину каналу 20 МГц із існуючими методами розподілу радіоресурсів, та 15 МГц із запропонованим (рис. 18б). Таким чином, на основі проведеного дослідження встановлено, що розроблений адаптивний інтенційно-орієнтований метод розподілу ресурсів та формування структури рівня радіодоступу мереж 4G/5G дав змогу ефективніше на 25 % використовувати наявні частотно-часові ресурси та зменшити на 8,7% енергоспоживання мережі рівня радіодоступу (рис.17б) для забезпечення замовленої якості обслуговування користувачів у порівнянні із традиційними методами.

Важливим останнім етапом синтезу гетерогенної інтенційно-орієнтованої мережі є розроблення методу наскрізної віртуалізації ресурсів інформаційно-комунікаційної інфраструктури. Використання даного підходу для національних операторів мереж дасть змогу автоматично розгортати в межах однієї інфраструктури мережі різного призначення та забезпечити адаптивну якість надання послуг певній групі бізнес-користувачів. Віртуалізація програмно-конфігурованого вузла інформаційної інфраструктури передбачає створення двох або більше віртуальних аналогів в межах фізичного обладнання (базових станцій A_i , комутаторів/маршрутизаторів B_i та серверів C_i). Кожен із яких призначений для індивідуального обслуговування інформаційних потоків з необхідним рівнем QoS згідно сформульованих мінливих вимог користувачів, шляхом міжрівневого узгодження пулу обчислювальних ресурсів CPU, RAM, Buffer Capacity мережевого пристрою. Статичний та динамічний розподіл ресурсів мережевої інфраструктури за допомогою технологій віртуалізації показано на рис. 19.

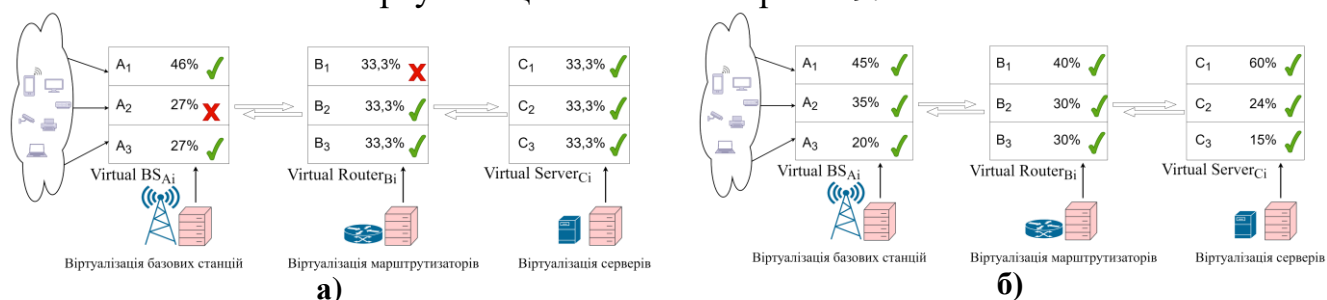


Рис. 19. Існуючий статичний розподіл ресурсів мережевої інфраструктури за допомогою віртуалізації – а) та запропонований динамічний розподіл ресурсів мережевої інфраструктури – б)

Новизною такого підходу синтезу концептуальної мережі IBN з допомогою технології віртуалізації є те, що у централізованій IBN/SDN контролер мережі вводиться головний блок менеджера управління ресурсами. Даний блок розробляється з метою забезпечення адаптивного розгортання сегментованих мереж різного призначення та різної продуктивності в межах однієї фізичної інфраструктури, враховуючи при цьому вимоги щодо якості надання послуг.

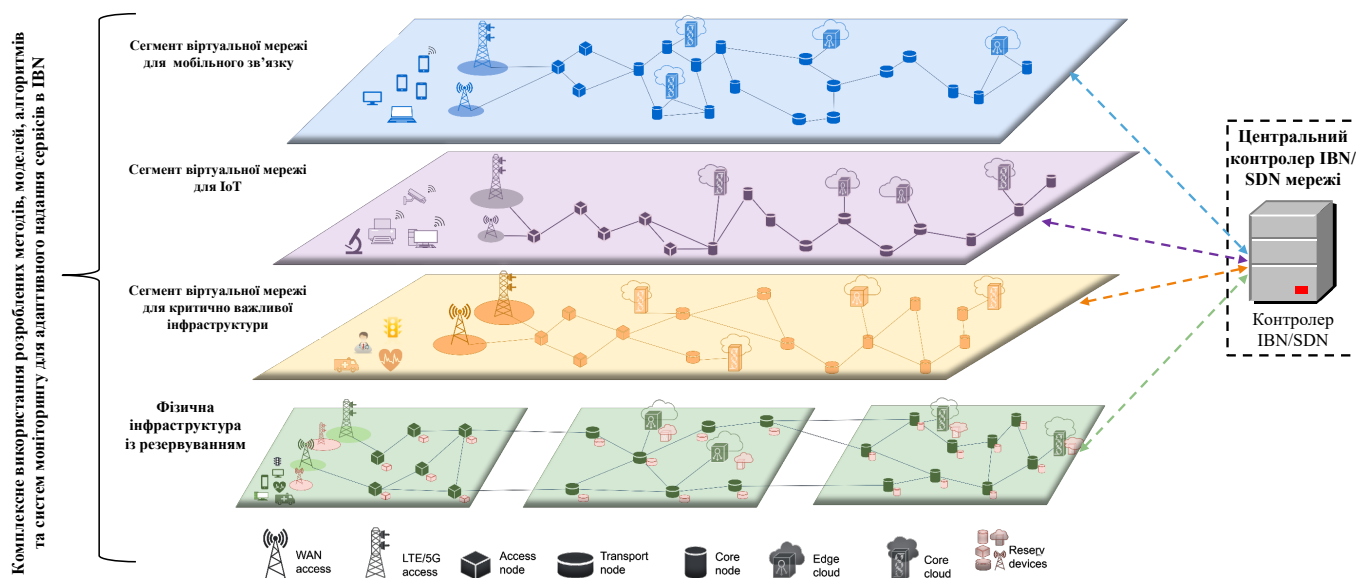


Рис. 20. Архітектура синтезованої інтенційно-орієнтованої гетерогенної мереж з віртуалізацією ресурсів

Таким чином, на основі розроблених у роботі нових методів управління якістю надання послуг, розподілом ресурсів, енергоефективністю мережі, захищеністю передавання даних та наскрізної віртуалізації ресурсів, вперше запропоновано **методологію синтезу гетерогенної інтенційно-орієнтованої мережі**, згідно якої можна інтелектуально виділяти зв'язки між структурно-функціональними елементами мережі, які можуть не тільки автоматизовано перебудовуватись з різною продуктивністю, але й виникати заново, вишукуючи шляхи найбільш адекватного пристосування до мінливих вимог користувачів щодо адаптивного надання сервісів.

У шостому розділі – «Практична реалізація інтенційно-орієнтованої мережі корпоративного сегменту з використанням технології SDN та автоматизації запропонованих управлінських рішень» – розроблено прототип енергоефективної IBN мережі на основі мікроконтролерних платформ з віртуалізацією мережевих функцій SDN (рис. 21), що дало змогу шляхом реалізації запропонованих рішень підвищити гнучкість управління мережею, зменшити енергоспоживання та забезпечити необхідну якість надання критично важливих сервісів Інтернету речей в корпоративних мережах, що підтверджено актами впровадження.

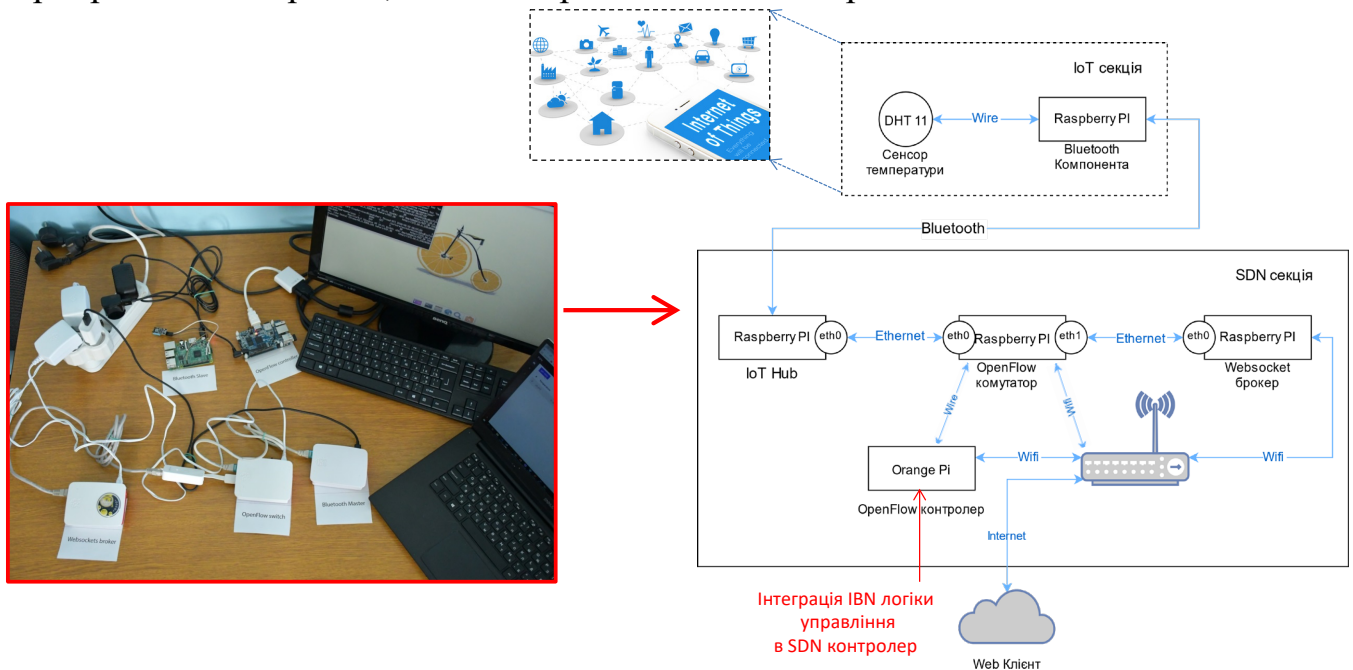
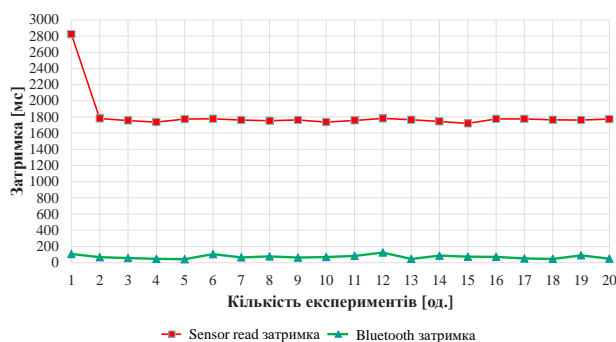
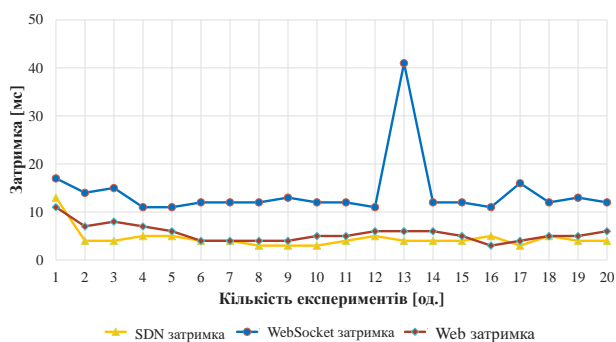


Рис.21. Структурно-функціональна схема прототипу інтенційно-орієнтованої SDN/IoT мережі побудованої на основі мікроконтролерів та віртуалізацій мережевих функцій

Для даного IBN прототипу розроблено унікальну систему моніторингу якості функціонування мережі за критерієм затримки передавання даних IoT. Особливістю системи моніторингу є використання **методу наскрізного вимірювання затримки передавання даних шляхом додавання часової мітки до метаданих заголовків пакету**, що дає змогу в режимі реального часу визначати час оброблення пакету кожним компонентом мережі та в умовах перевищення норм сповіщати про прийняття необхідних управлінських рішень. Результати моніторингу затримки обслуговування у процесі передавання даних кожним компонентом розробленого прототипу мережі показано на рис. 22.

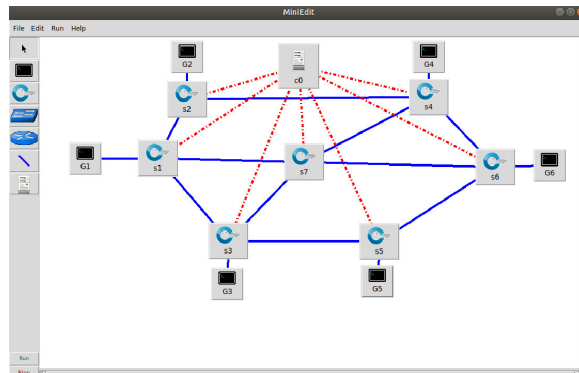
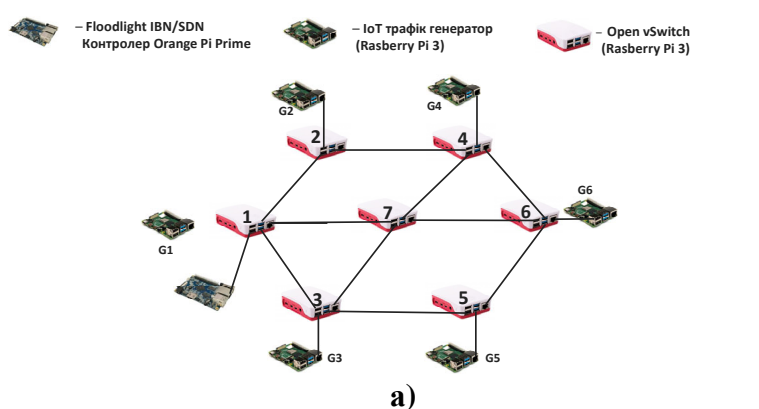


а)

б)

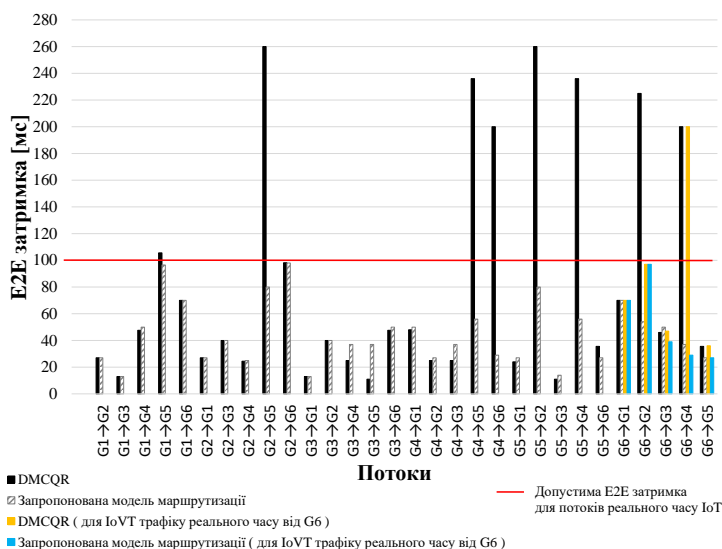
Рис.22. Результати вимірювання затримки передавання даних між компонентами мережі SDN, WebSocket, Web – а) та Bluetooth, Sensor read – б)

У роботі імплементовано у вигляді програмного коду логіку запропонованої моделі QoE-маршрутизації для контролера Floodlight, а також побудовано топологію SDN мережі з початку в середовищі Mininet, а після успішного тестування реалізовано на реальному обладнанні з використанням мікроконтролерних платформ. Ця топологія складається з 7 Open vSwitches, 1 контролера Floodlight SDN та 6 генераторів трафіку IoT, (G1, G2, G3, G4, G5 і G6). Експериментальна схема дослідження показано на рис. 23г та рис. 23б.



а)

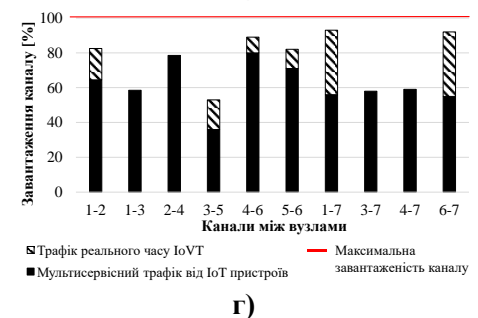
б)



д)



в)



г)

Рис.23. Експериментальна схема дослідження QoE-маршрутизації на реальному обладнанні – а), у середовищі Mininet – б), завантаженість каналів в умовах використання DMCQR – в), завантаженість каналів в умовах використання запропонованої маршрутизації – г), порівняння моделей маршрутизації за критерієм затримки передавання даних – д)

У процесі дослідження та порівняння відомої моделі маршрутизації DMCQR із запропованою, досягнуто кращої збалансованості завантаження каналних ресурсів мережі за рахунок раціонального вибору шляхів для різнорідного трафіку (рис. 23в) та зменшено до 3 разів середню затримку обслуговування потоків реального часу з кінця в кінець для яких при використанні маршрутизації DMCQR не виконувались допустимі норми затримки (рис. 23д). А також встановлено, що в умовах низької інтенсивності загального трафіку (рис. 24а) досягається зменшення енергоспоживання мережі до 53,56% (рис. 24а).

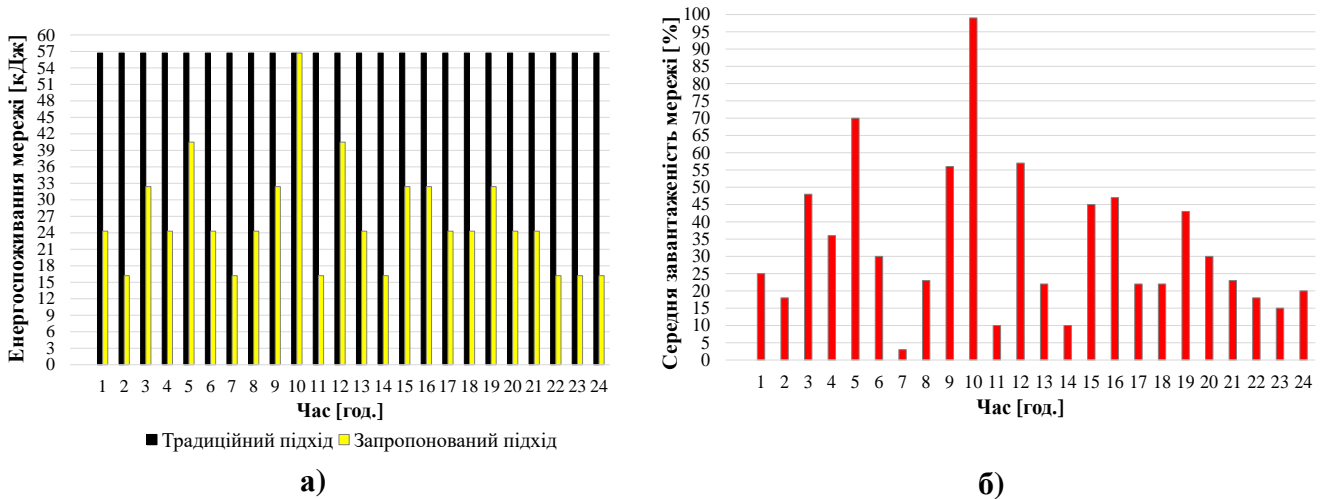


Рис.24. Результати експериментального дослідження процесу оптимізації рівня енергоспоживання інтенційно-орієнтованої мережі в умовах використання традиційного та запропонованого підходу – а) в залежності від завантаженості мережі – б)

Розроблено прототипи корпоративного сегменту інтенційно-орієнтованої мережі на базі апаратних SDN комутаторів ZODIAC FX/GX, в межах яких реалізовано та оцінено ефективність запропонованих рішень щодо адаптивного клієнт-орієнтованого управління ресурсами та якістю обслуговування. Розроблено спеціалізований графічний інтерфейс для кінцевих користувачів.

Розроблено прототип мобільного та операторського додатку для адаптивного клієнт-орієнтованого надання послуг в гетерогенній мережі, що дає змогу отримувати замовлену якість обслуговування на основі розробленого засобу зворотного зв'язку між користувачем та оператором мережі.

Розроблені та підтверджені в процесі функціонування моделі та методи реалізовані у вигляді самостійних програмних модулів, які можуть бути використанні в подальших практичних дослідженнях в області дослідження та оптимізації програмно-конфігурованих інтенційно-орієнтованих мереж, оскільки вихідні програмні коди знаходяться в додатках до дисертаційної роботи.

У **висновках** дисертаційної роботи викладено основні результати і рекомендації, які випливають з проведених досліджень, представлено та охарактеризовано кількісні оцінки показників ефективності в процесі синтезу та реалізації інтенційно-орієнтованих мереж.

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 вирішено наукову-прикладну проблему розроблення методології аналізу та синтезу складних гетерогенних інфокомунікаційних систем з метою створення нової програмно-конфігурованої інтенційно-орієнтованої мережі, яка постійно на основі мінливих вимог користувачів щодо якості надання сервісів та розгортання інфраструктури навчається, адаптується, автоматизується і захищається від потенційних кібератак шляхом використання нових методів розподілу ресурсів, інженерії трафіку, мережевої аналітики та існуючих алгоритмів машинного навчання.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз сучасного стану проблеми управління якістю надання сервісів в інформаційно-комунікаційних мережах. Встановлено, що з розвитком інфокомунікаційних систем вимоги користувачів і їх поведінка змінилися. Зокрема, для кінцевих бізнес-користувачів все більш важливим стає адаптивне надання сервісу, постійний зв'язок та індивідуалізація обслуговування. Визначено, що для отримання адаптивного рівня якості надання сервісів необхідно враховувати як технічні показники якості функціонування мережі, так і користувацьку оцінку якості надаваних сервісів, що, у свою чергу, вимагає розробки нових методів та моделей управління якістю сервісів в інфокомунікаційних мережах.

2. Формалізовано модель адаптивного управління перерозподілом ресурсів інфокомунікаційних мереж для реалізації концепції IBN. Запропоновано використати комплексний показник якості обслуговування користувачів сформованого у вигляді оцінки QoE, як основного критерію для адаптивного управління перерозподілом ресурсів в умовах зміни значимості бізнес-процесів в контексті реалізації концепції IBN. Розвинуто математичну модель визначення суб'єктивного рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE в залежності від зміни об'єктивних показників якості обслуговування QoS, що забезпечуються в IBN/SDN мережі, зокрема для відео та аудіо сервісів реального часу. Формування математичної моделі QoS/QoE кореляції здійснено на основі проведення власних експериментальних досліджень.

3. Вперше запропоновано та реалізовано потокову модель енергоефективної QoE-маршрутизації для інтенційно-орієнтованих мереж. Новизною моделі є те, що для вибору оптимального шляху передавання даних використовується адаптивна QoE-орієнтована метрика маршруту, яка базується на розробленій математичній моделі кореляції нормалізованого значення замовленого рівня якості сприйняття сервісу та інтегрального адитивного критерію поточних показників якості обслуговування із врахуванням функціональних параметрів завантаженості мережевих вузлів. Що у результаті програмної реалізації на SDN/IBN контролері дало змогу підтримувати компроміс між бажаною інтенційно-орієнтованою якістю обслуговування користувачів, завантаженістю та енергоефективністю мережі шляхом переведення в енергозберігаючий режим незадіяних вузлів. У роботі запропоновано централізований моніторинг та управління мережевою структурою з допомогою удосконаленої логіки SDN контролера, що дало змогу на основі отриманої поточної статистики про стан мережі адаптивно приймати рішення щодо побудови оптимальної топології мережі за критеріями QoS/QoE та енергоспоживання. Удосконалено алгоритм вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах шляхом формування контролером

пробних пакетів меншого розміру із різними пріоритетами, що дало можливість для низько пріоритетних потоків покращити точність моніторингу до 45% та зменшити до 22% сигналізаційне навантаження у порівнянні із відомими.

4. Розроблено метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю надання послуг для інтенційно-орієнтованих мереж. Новизна методу полягає в тому, що в умовах високого навантаження мережі для формування якості послуги враховується як об'єктивна оцінка часових мережевих характеристик, так і замовлені згідно намірів клієнтів суб'єктивні QoE оцінки, що дало змогу кінцевим користувачам сервісів опосередковано впливати на функціональну конфігурацію мережі, а з використанням алгоритмів машинного навчання для централізованої системи моніторингу та управління мережею реагувати на несприятливі поєднання значень показників якості і попереджати ситуації, коли користувач незадоволений якістю отриманих сервісів для адаптивного прогнозування моменту переконфігурації мережі. Розроблено імітаційну модель мережі з можливістю перемикання між двома методами управління якістю обслуговування (традиційного та клієнт-орієнтованого). Перевагою даної моделі є можливість досліджувати нові рішення для майбутньої концепції інтенційно-орієнтованих мереж шляхом інтеграції унікальних алгоритмів у ядро мережі. Встановлено, що запропонований метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг дає вигоду в середньому від 2-5 разів за критерієм кількості користувачів, які вимагають високої якості сприйняття послуги.

5. Удосконалено метод виявлення аномалій мережевого трафіку та атак для майбутніх інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж, який відрізняється від відомих способом формування набору інформативних ознак, що формалізують нормальну та аномальну поведінку системи на основі оцінки параметра Херста. Розроблено інтелектуальну DPI систему моніторингу та аналізу трафіку, яка дала змогу виявити складні атаки різного роду, зокрема таких як SYN Flood, фрагментація HTTP, UDP Flood, DNS Flood, Non-Spoofed UDP Flood та шляхом автоматизованого блокування виявленого шкідливого трафіку зменшити загальний рівень втрат на 5% у порівнянні із існуючою комерційною системою SolarWinds DPI. Новизною розроблювальної DPI системи є те, що вона базується на гармонійному поєднанні переваг методів сигнатурного, статистичного та фрактального аналізу інформативних ознак щодо детектування інформаційних протоколів і ранжування прихованих властивостей аномального трафіку.

6. На основі розробленої імітаційної моделі гетерогенної мережі LTE/NB-IoT встановлено, що комплексне використання розроблених методів пріоритезації IoT трафіку та балансування навантаження, дають змогу зменшити середню затримку повідомлень реального часу з кінця в кінець на 68,8% (або 3,21 рази), а також при використанні механізму пріоритезації, зменшити кількість відмов у обслуговуванні на 58% для класу L1 (трафік RT) та 76% для L2 (трафік URLLC) у порівнянні з існуючим методом пропорційного розподілу ресурсів в умовах високого навантаження. У випадку одночасного використання запропонованих рішень досягається мінімальна кількість відмов для сервісів IoT класу L1 та L2 в умовах недовантаженості альтернативних базових станцій.

7. Розроблено адаптивний інтенційно-орієнтований метод розподілу ресурсів та формування структури рівня радіодоступу мереж 4G/5G. Новизна методу полягає у безпосередньому врахуванні просторово-часової локалізації абонентського

навантаження та замовлених вимог бізнес-користувачів на основі аналізу їх QoE оцінок, що дало змогу для операторів мобільного зв'язку ефективніше на 25% використовувати наявні частотно-часові ресурси та зменшити на 8,7% енергоспоживання мережі рівня радіодоступу із гарантуванням замовленої якості обслуговування користувачів у порівнянні із відомими методами.

8. Розроблено імітаційну модель процесу функціонування інтенційно-орієнтованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку. На основі імітаційної моделі оцінено ефективність запропонованого методу інтенційно-орієнтованого управління частотно-часовими ресурсами та формування структури рівня радіодоступу. Основною перевагою розробленої моделі є використання системно-об'єктного підходу проектування функціональних блоків мережі мобільного зв'язку на основі відомих LTE стандартів, що дало змогу адекватно формалізувати опис системи як єдине ціле, надавши повну інформацію про структуру, функціонування і поводження окремих елементів системи. Використання на практиці розробленої моделі операторами мобільного зв'язку дасть змогу досліджувати процес оптимізації мережі за критерієм замовленої якості обслуговування з урахуванням обмеженості спектральних та енергетичних ресурсів у порівнянні із відомими методами, як на етапі планування майбутньої інтенційно-орієнтованої мережі 5G, так і на етапі експлуатації існуючих 4G.

9. Запропоновано методологію синтезу гетерогенної інтенційно-орієнтованої мережі, згідно якої можна інтелектуально виділяти зв'язки між структурно-функціональними елементами мережі, які можуть не тільки автоматизовано перебудовуватись з різною продуктивністю, але й виникати заново, вишукуючи шляхи найбільш адекватного пристосування до мінливих вимог користувачів щодо адаптивного надання сервісів. Новизною методології є те, що вона базується на розроблених у роботі нових методах адаптивного управління якістю надання послуг, енергоефективністю, захисту, розподілу та наскрізної віртуалізації ресурсів мережі.

10. Розроблено прототипи інтенційно-орієнтованої мережі на базі мікроконтролерних платформ, апаратних SDN комутаторів ZODIAC FX/GX та віртуалізації мережевих функцій компонентів технології SDN, в межах яких реалізовано та оцінено ефективність запропонованих рішень щодо адаптивного клієнт-орієнтованого управління ресурсами та якістю обслуговування. Розроблено унікальну систему моніторингу якості функціонування реалізованих прототипів IBN мереж. Особливістю системи є використання розробленого методу наскрізного вимірювання затримки передавання даних з кінця в кінець для кожного компонента мережі шляхом додавання власної мітки часу до метаданих.

На основі експериментального дослідження в межах розробленого прототипу IBN мережі встановлено, що запропонована модель енергоефективної QoE-маршрутизації потоків даних у порівнянні із відомою концептуальною моделлю багатокритеріальної маршрутизації DMCQR, дала змогу досягти кращої збалансованості завантаження каналних ресурсів мережі за рахунок раціонального вибору шляхів для різномірного трафіка та зменшити до 3 разів середню затримку обслуговування потоків реального часу з кінця в кінець для яких в умовах використання маршрутизації DMCQR не виконувались допустимі норми затримки, а також в умовах низької інтенсивності загального трафіку зменшити енергоспоживання мережі до 53,56%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Одноосібна монографія у закордонному виданні:

1. M. Beshley, *Development and testbed of software router for critical application*. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. ISBN: 978-613-9-46367-1.

Колективна монографія:

2. М. М. Климаш, Т. А. Максимюк, М. І. Бешлей, *Методи та моделі побудови гетерогенних мереж мобільного зв'язку 4G/5G*. Львів, Україна: Видавництво "Львівська політехніка", 2020. ISBN: 978-966-941-552-3.

Статті у журналах, що входять до наукометричних баз даних Scopus/Web of Science:

3. I. Demydov, N. Baydoun, M. Beshley, M. Klymash, O. Panchenko, "Development of basic concept of ICT platforms deployment strategy for social media marketing considering tectonic theory," *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 0, no.1, pp. 18–33, Jan. 2020. (Scopus Q2).

4. S. Jun, K. Przystupa, M. Beshley, O. Kochan, H. Beshley, M. Klymash, J. Wang, D. Pieniak, "A Cost-Efficient Software Based Router and Traffic Generator for Simulation and Testing of IP Network," *Electronics*, vol. 9, no. 1, pp. 40-1–40-24, Jan. 2020. (Scopus/Web of Science Q1).

5. W. Song, M. Beshley, K. Przystupa, H. Beshley, O. Kochan, A. Pryslupskyi, D. Pieniak, J. Su, "A Software Deep Packet Inspection System for Network Traffic Analysis and Anomaly Detection," *Sensors*, vol. 20, no. 6, p. 1637-1–1637-41, March 2020. (Scopus/Web of Science Q1).

6. M. Beshley, N. Kryvinska, M. Seliuchenko, H. Beshley, E. Shakshuki, A. Yasar, "End-to-End QoS "Smart Queue" Management Algorithms and Traffic Prioritization Mechanisms for Narrow-Band Internet of Things Services in 4G/5G Networks," *Sensors*, vol. 20, no.8, pp.2324-1–2324-30, Apr. 2020. (Scopus/Web of Science Q1).

7. S. Wenguang, V. Andrushchak, M. Kaidan, M. Beshley, O. Kochan, S. Jun, "Methodology for Calculating the Energy Consumption of Information Communication Systems," *Technical Electrodynamics*, no. 4, pp. 80–88, July 2020. (Scopus Q3).

8. H. Xu, K. Przystupa, C. Fang, O. Kochan, M. Beshley, A. Marciniak, "A combination strategy of feature selection based on an integrated optimization algorithm and weighted k-nearest neighbor to improve the performance of network intrusion detection," *Electronics*, vol. 9, no. 8, pp. 1206-1–1206-22, July 2020. (Scopus/Web of Science Q1).

9. M. Beshley, P. Vesely, A. Prislupskiy, H. Beshley, M. Kyryk, V. Romanchuk, I. Kahalo, "Customer-Oriented Quality of Service Management Method for the Future Intent-Based Networking," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 22, pp. 8223-1–8223-38. Nov. 2020. (Scopus/Web of Science Q1).

10. K. Przystupa, M. Beshley, M. Kaidan, V. Andrushchak, I. Demydov, O. Kochan, D. Pieniak, "Methodology and Software Tool for Energy Consumption Evaluation and Optimization in Multilayer Transport Optical Networks," *Energies*, vol. 13, no. 23, pp. 6370-1–6370-21. Dec. 2020. (Scopus/Web of Science Q1).

Статті у закордонних наукових періодичних виданнях:

11. V. Romanchuk, M. Beshley, A. Prislupskiy, H. Beshley, O. Panchenko, “Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT,” *Internet of Things (IoT) and Engineering Applications* (Canada), vol. 3, no.1, pp. 22–23. May 2018.

12. M. Klymash, M. Beshley, “Perspective directions of development and research in the field of information and communication technologies,” *BA Magazine “Wissen im Markt”*, no. 3, pp. 31–37, 2019.

Статті у наукових фахових виданнях України:

13. М.М. Климаш, М.В. Кайдан, М.І. Бешлей, А.В. Редька, “Оптимізація багат шарової структури транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM за допомогою методу діакоптики,” *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*, № 3, с. 32–42, 2015.

14. М.І. Бешлей, В.В. Червенець, І.В. Демидов, В.І. Романчук, О.М. Панченко, “Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритетизації потоків у маршрутизаторах,” *Системи озброєння і військова техніка: Х: Харк. у-т Повітр. Сил ім. І. Кожедуба*, 5(142), с. 114–123, 2016.

15. М.М. Климаш, М.І. Бешлей, Ю.Д. Дещинський, О.М. Панченко, “Розробка методу балансування навантаження в SDN мережах на основі модифікованого протоколу STP,” *Комп'ютерні технології друкарства*, №2, с. 146–155, 2015.

16. I. Demydov, M. Klymash, M. Beshley, O. Shpur, “Features of the cloud services implementation in the national network segment of Ukraine,” *Information and telecommunication science. K.: NTUU «KPI»*, No.1, pp. 31–38, 2016.

17. М.М. Климаш, В.І. Романчук, О.М. Панченко, М.І. Бешлей, А.В. Поліщук, “Розроблення програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації*, № 885, с. 22–30, 2017.

18. Г.В. Бешлей, М.О. Селюченко, І.А Берневек, С.І. Пушак, М.І. Бешлей, “Алгоритм кластеризації, агрегації та класифікації M2M пристроїв в гетерогенній мережі 4G/5G,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації*, № 874, с. 95–102, 2017.

19. V. Romanchuk, M. Klymash, M. Beshley, O. Panchenko, A. Polishchuk, “Development of software-based router model with adaptive selection of algorithms for queues servicing,” *Technology audit and production reserves*, №3/2(41), pp. 46–55, 2018.

20. В.І. Романчук, М.І. Бешлей, О.М. Панченко, А.В. Поліщук, “Метод узгодженого розв'язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами мережеских пристроїв,” *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*, №2(50), с. 48–57, 2018.

21. В.І. Романчук, М.І. Бешлей, А.М. Прислупський, Г.В. Бешлей, “Метод декомпозиції структури мережного пристрою з віртуалізацією ресурсів,” *Наукові записки Української академії друкарства*, №1(56), с. 31–42. 2018.

22. М.В. Кайдан, М.І. Бешлей, Т.А. Максимюк, Б.М. Стрихалюк, Р.З. Матвіїв, “Теорія Кернера та фазові переходи для потоків у телекомунікаційних мережах,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації*, № 909, с. 29–34, 2018.

23. І.О. Кагало, М.І. Бешлей, М.М. Климаш, О.М. Панченко, Г.В. Бешлей, “Адаптивне формування багаторівневої радіоструктури інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi,” *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), с. 24–38, 2019.

24. М.М. Климаш, А.Б. Нажм, О.Л. Костів, І.В. Демидов, М.І. Бешлей, “Створення ефективних ІКТ-платформ електронного урядування інтерактивного типу: аналіз архітектури систем розповсюдження контенту,” *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*, № 3, с. 31–45, 2019.

Публікації у матеріалах конференцій, які входять до наукометричних баз даних Scopus/Web of Science:

25. М. Klymash, M. Seliuchenko, M. Beshley and S. Redchuk, "Increasing wavelengths utilization efficiency in OTNoDWDM network based on local resource distribution method," *in Proc. of IEEE 2015 PIC S&T*, Kharkiv, 2015, pp. 157–160.

26. М. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley, "State of the art and further development of information and communication systems," *in Proc. of IEEE 2016 (UkrMiCo)*, Kiev, 2016, pp. 1–6.

27. М. Beshley, V. Romanchuk, V. Chervenets and A. Masiuk, "Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization," *in Proc. of IEEE 2016 UkrMiCo*, Kiev, 2016, pp. 1–3.

28. М. Seliuchenko, M. Beshley, O. Panchenko and M. Klymash, “Development of monitoring system for end-to-end packet delay measurement in software-defined networks,” *in Proc. of IEEE TCSET'2016*, Lviv, 2016, pp. 667–670.

29. А. Masiuk, M. Beshley, O. Lavriv and Y. Deschynskiy, “Common radio resource management model for heterogeneous cellular networks,” *in Proc. of IEEE (TCSET'2016)*, Lviv, 2016, pp. 661–663.

30. О. Panchenko, А. Polishuk, М. Seliuchenko and М. Beshley, "Method for adaptive client oriented management of quality of service in integrated SDN/CLOUD networks," *in Proc. of IEEE 2017 PIC S&T*, Kharkov, 2017, pp. 452–455.

31. М. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Algorithm for clusterization, aggregation and prioritization of M2M devices in heterogeneous 4G/5G network," *in Proc. of IEEE 2017 PIC S&T*, Kharkov, 2017, pp. 182–186.

32. М. Klymash, H. Beshley, O. Panchenko and M. Beshley, "Method for optimal use of 4G/5G heterogeneous network resources under M2M/IoT traffic growth conditions," *in Proc. of IEEE 2017 UkrMiCo*, Odessa, 2017, pp. 1–5.

33. V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and P. Arthur, "Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes," *in Proc. of IEEE 2017 AICT*, Lviv, 2017, pp. 295–298.

34. М. Klymash, V. Romanchuk, М. Beshley and P. Arthur, "Investigation and simulation of system for data flow processing in multiservice nodes using virtualization mechanisms," *in Proc. of IEEE 2017 UKRCON*, Kiev, 2017, pp. 989–992.

35. М. Beshley, М. Seliuchenko, О. Panchenko and А. Polishuk, "Adaptive flow routing model in SDN," *in Proc. of IEEE 2017 CADSM*, Lviv, 2017, pp. 298–302.

36. H. Beshley, М. Kyryk, М. Beshley and О. Panchenko, "Method of information flows engineering and resource distribution in 4G/5G heterogeneous network for M2M service provisioning," *in Proc. of IEEE 2018 IDAACS-SWS*, Lviv, 2018, pp. 229–233.

37. V. Romanchuk, M. Beshley, A. Polishuk and M. Seliuchenko, "Method for processing multiservice traffic in network node based on adaptive management of buffer resource," in *Proc. of IEEE 2018 TCSET*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 1118–1122.
38. T. Maksymyuk, M. Beshley, M. Klymash, O. Petrenko and Y. Matsevityi, "Eavesdropping-resilient wireless communication system based on modified OFDM/QAM air interface," in *Proc. of IEEE 2018 TCSET*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 1127–1130.
39. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller," in *Proc. of IEEE 2018 TCSET*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 282–286.
40. H. Beshley, M. Beshley, T. Maksymyuk and I. Strykhalyuk, "Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay," in *Proc. of IEEE 2018 TCSET*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 1147–1151.
41. M. Klymash, I. Demydov, M. Beshley and O. Kostiv, "Structures assessment of data-centers telecommunication systems for metadata fixation," in *Proc. of IEEE 2018 UkrMiCo*, Odessa, 2018, pp. 1–7.
42. M. Beshley, S. Toliupa, V. Pashkevych and R. Kolodiy, "Development of software system for network traffic analysis and intrusion detection," in *Proc. of IEEE 2018 UkrMiCo*, Kiev, 2018, pp. 1–3.
43. M. Seliuchenko, M. Kyryk, M. Beshley, M. Zhovtonoh, "Automated Recovery of Server Applications for SDN-Based Internet of Things," in *Proc. of IEEE 2019 AICT*, Lviv, 2019, pp. 25–29.
44. I. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko, "Enhancing QoS and energy efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi integrated network based on adaptive technique for radio structure formation," in *Proc. of IEEE 2019 UKRCON*, Kiev, 2019, pp. 1167–1170.
45. M. Beshley, A. Pryslupskyi, O. Panchenko and H. Beshley, "SDN/Cloud solutions for intent-based networking," in *Proc. of IEEE 2019 AICT*, Lviv, 2019, pp. 95–98.
46. A. Pryslupskyi, O. Panchenko, M. Beshley and M. Seliuchenko, "Improvement of multiprotocol label switching network performance using software-defined controller," in *Proc. of IEEE 2019 CADSM*, Polyana, Ukraine 2019, pp. 106–109.
47. H. Beshley, M. Klymash, M. Beshley and I. Kahalo, "Improving the efficiency of lte spectral resources use by introducing the new of M2M/IoT multi-service gateway," in *Proc. of IEEE 2019 CADSM*, Polyana, Ukraine, 2019, pp. 114–117.
48. M. Beshley, A. Pryslupskyi, O. Panchenko and M. Seliuchenko, "Dynamic switch migration method based on QoE-aware priority marking for intent-based networking," in *Proc. of IEEE 2020 TCSET*, Lviv-Slavske, 2020, pp. 864–868.
49. Z. Cheng, M. Beshley, H. Beshley, O. Kochan and O. Urikova, "Development of deep packet inspection system for network traffic analysis and intrusion detection," in *Proc. of IEEE 2020 TCSET*, Lviv-Slavske, 2020, pp. 877–881.
50. Z. Hu, M. Beshley, V. Vitalii, S. Jun and T. Volodymyr, "Modified EIRGP routing protocol for backbone infrastructure of wireless multimedia sensor networks," in *Proc. of IEEE 2020 TCSET*, Lviv-Slavske, 2020, pp. 894–899.
51. M. Beshley, M. Klymash, M. Hamal, Y. Shkoropad and A. Branytskyi, "Method for Estimating service delay in edge and cloud computing architecture," in *Proc. of IEEE 2020 TCSET*, Lviv-Slavske, 2020, pp. 915–919.

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій

52. М.О. Селюченко, Г.В. Бешлей, А.Р. Масюк, М.І. Бешлей, “Багаторівневе управління ресурсами в гетерогенній мульти-операторській мережі,” *1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT'2015)*, Lviv, 2015, pp. 125–128.

53. М.М. Климаш, В.І. Романчук, М.І. Бешлей, “Розроблення макету мультисервісної мережі на базі програмно-апаратної платформи для забезпечення навчально-наукового процесу кафедри телекомунікацій,” *1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT'2015)*, Lviv, 2015, pp. 175–178.

54. М.М. Климаш, В.І. Романчук, М.І. Бешлей, А.О. Лунтовський, “Дослідження ефективності використання ресурсів навчально-наукового центру паралельних обчислень,” *Міжнародна науково-технічна конференція (Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології)*, м. Київ, 2015, с. 61–63.

55. М.І. Бешлей, В.В. Червенець, В.І. Романчук, А.В. Поліщук, “Модель віртуального маршрутизатора з статичною та динамічною реконфігурацією ресурсів,” *Міжнародна науково технічна конференція «Проблеми телекомунікації» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції*, м. Київ, 2016р., с. 140–142.

56. М.І. Бешлей, М.О. Селюченко, П.О. Гуськов, А.Р. Масюк, “Підвищення ефективності роботи гетерогенних мереж методом динамічного перерозподілу ресурсів між різними безпроводовими технологіями,” *Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології»: матеріали науково-технічної конференції*, м. Київ, 2015 р., с. 49–50.

57. М.І. Бешлей, М.М. Климаш, А.Р. Масюк, “Розробка і дослідження імітаційної моделі безпроводної гетерогенної мережі,” *Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції*, м. Київ, 2016 р., с. 70–72.

58. М.І. Бешлей, О.М. Панченко, І.В. Демидов, М.О Селюченко, “Метод динамічного управління якістю послуг в інтегрованій SDN/CLOUD мережі,” *Фізико-технологічні проблеми, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Чернівці, 2016 р., с. 74–75.

59. М.М. Климаш, А.Р. Масюк, Г.В. Бешлей, М.І. Бешлей, “Концепція програмно конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR,” *Фізико-технологічні проблеми , обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Чернівці, 2016 р., с. 35–36.

60. М.І. Бешлей, М.М. Климаш, О.М. Панченко, Г.В. Бешлей, “Розроблення системи моніторингу та аналізу трафіку інформаційно телекомунікаційної мережі для виявлення аномалії і запобігання атак,” *I міжнародна науково-практична конференція “Проблеми кібербезпеки інформаційно телекомунікаційних систем” (PCSITS)*, м. Київ, 2018р., с. 201–203.

АНОТАЦІЯ

Бешлей М.І. Синтез та реалізація інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж для адаптивного надання сервісів. – 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, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми розроблення методології аналізу та синтезу складних гетерогенних інфокомунікаційних систем з метою створення нової програмно-конфігурованої інтенційно-орієнтованої мережі, яка постійно на основі мінливих вимог користувачів щодо якості надання сервісів та розгортання інфраструктури навчається, адаптується, автоматизується і захищається від потенційних кібератак шляхом використання нових методів розподілу ресурсів, інженерії трафіку, мережевої аналітики та існуючих алгоритмів машинного навчання. Для вирішення проблеми синтезу інфокомунікаційної мережі, використано основні принципи і методи системного аналізу, згідно якого запропоновано концептуальну модель побудови гетерогенної програмно-конфігурованої інтенційно-орієнтованої мережі, яка дає змогу забезпечити ефективний розподіл і перерозподіл загальних ресурсів адаптуючись під мінливі вимоги бізнес-користувачів щодо якості надання сервісів. Розроблено модель енергоефективної маршрутизації для інтенційно-орієнтованих мереж, що дала змогу підтримувати компроміс між бажаною якістю обслуговування користувачів, завантаженістю та енергоефективністю мережі. Запропоновано новий метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг для інтенційно-орієнтованих мереж. Розроблено інтелектуальну систему моніторингу та аналізу мережевого трафіку, що дала змогу ефективно управляти трафіком та сервісними політиками в режимі реального часу, автоматизовано створювати або оптимізувати сервісні пропозиції, підвищувати якість послуг та забезпечувати захист мережі на основі запропонованого методу виявлення аномалій. Розроблено методи розподілу частотно-часових ресурсів, балансування навантаження та формування структури рівня радіодоступу для забезпечення адаптивного надання сервісів. Запропоновано методологію синтезу інтенційно-орієнтованих мереж для поетапної трансформації сучасних інфокомунікаційних мереж. Розроблено прототипи інтенційно-орієнтованої мережі на основі технології програмно-конфігурованих мереж та автоматизації запропонованих управлінських рішень.

Ключові слова: інтенційно-орієнтована мережа, програмно-конфігурована мережа, якість обслуговування, розподіл ресурсів, якість сприйняття, віртуалізація, маршрутизація.

АННОТАЦИЯ

Бешлей Н.И. Синтез и реализация интенційно-ориентированных инфокоммуникационных сетей для адаптивного предоставления сервисов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки

Украины, г. Львов, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы разработки методологии анализа и синтеза сложных гетерогенных инфокоммуникационных систем с целью создания новой программно-конфигурируемой интенционно-ориентированной сети, которая постоянно на основе меняющихся требований пользователей относительно качества предоставления сервисов и развертывания инфраструктуры учится, адаптируется, автоматизируется и защищается от потенциальных кибератак путем использования новых методов распределения ресурсов, инженерии трафика, сетевой аналитики и существующих алгоритмов машинного обучения. Для решения проблемы синтеза инфокоммуникационной сети, использованы основные принципы и методы системного анализа, согласно которому предложена концептуальная модель построения гетерогенной программно-конфигурируемой интенционно-ориентированной сети, позволяет обеспечить эффективное распределение и перераспределение общих ресурсов адаптируясь под меняющиеся требования бизнес-пользователей относительно качества предоставления сервисов. Разработана модель энергоэффективной маршрутизации для интенционно-ориентированных сетей, позволила поддерживать компромисс между желаемым качеством обслуживания пользователей, загруженностью и энергоэффективностью сети. Предложен новый метод адаптивного клиент-ориентированного управления качеством услуг для интенционно-ориентированных сетей. Разработана интеллектуальная система мониторинга и анализа сетевого трафика, позволила эффективно управлять трафиком и сервисными политиками в режиме реального времени, автоматизировано создавать или оптимизировать сервисные предложения, повышать качество услуг и обеспечивать защиту сети на основе предложенного метода обнаружения аномалий. Разработаны методы распределения частотно-временных ресурсов, балансировки нагрузки и формирования структуры уровня радиодоступа для обеспечения адаптивного предоставления сервисов. Предложена методология синтеза интенционно-ориентированных сетей для поэтапной трансформации современных инфокоммуникационных сетей. Разработаны прототипы интенционно-ориентированной сети на основе технологии программно-конфигурируемых сетей и автоматизации предложенных управленческих решений.

Ключевые слова: интенционно-ориентированная сеть, программно-конфигурируемая сеть, качество обслуживания, распределение ресурсов, качество восприятия, виртуализация, маршрутизация.

ABSTRACT

Beshley M.I. Synthesis and implementation of intent-based infocommunication networks for adaptive service provision.

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, 2021.

The thesis is devoted to solving the actual scientific problem of developing the methodology of analysis and synthesis of the complex heterogeneous infocommunication systems in order to develop a new intent-based software-defined network, which is constantly learning, adapting, automating and protecting against potential cyber-attacks based on changing user requirements regarding the quality of service and infrastructure

deployment by using the new methods of resource allocation, traffic engineering, network analytics and machine learning algorithms.

A conceptual model for the construction of a heterogeneous intent-based software-defined network has been proposed. This model, unlike the existing ones, provides an efficient allocation and redistribution of common resources, adapting to the changing requirements of business users regarding to the quality of service provision. A mathematical model for determining the subjective level of user satisfaction, depending on changes of the objective parameters of the quality of service of the network was developed. An energy-efficient flow routing model for intent-based networks has been developed. This model allowed to achieve a better balance of network channel resources load due to the rational choice of paths for heterogeneous traffic and to reduce to 3 times the average latency of real-time flows service. The model also allowed for a 53.56% reduction in network energy consumption under low load conditions. A new method for adaptive customer-oriented quality of service management for intent-based networks has been proposed. This method allowed the end customers of services to influence the functional configuration of the network, and with the use of machine learning techniques to respond to the degradation of the quality of service and prevent situations when the user is dissatisfied with the received quality of services for adaptive prediction of the network reconfiguration moment. The method for detecting anomalies in network traffic has been improved, which differs from the known ones by forming a set of informative features that characterize normal and abnormal behavior of the infocommunication system based on the Hurst parameter estimation with the possibility of self-learning. An intelligent system for network traffic monitoring and analysis was developed. This system made it possible to effectively manage traffic and service policies in real time, automatically create or optimize service offers, improve the quality of services and provide network protection based on the developed method of detecting anomalies. Methods of time-frequency resource allocation and load balancing in modern mobile networks for adaptive provision of IoT services have been developed. An adaptive intent-based method of resource allocation and formation of radio access level structure was developed. This method allowed a 25% more efficient use of available time-frequency resources and reduced the energy consumption of radio access level network by 8.7% to provide the ordered quality of service for users, as compared to traditional methods. The methodology of synthesis of intent-based networks for stage-by-stage transformation of modern infocommunication networks is proposed. Prototypes of intent-based networks based on the technology of software-defined networks and automation of the proposed management decisions are developed. The algorithm for selecting a wireless access network in a heterogeneous environment using Big Data has been developed. The developed algorithm takes into account and analyzes the assessments of the ordered quality of service perception and allows to improve the quality of service of high-priority services on demand. The prototypes of mobile and operator application for adaptive client-oriented service provision in a heterogeneous network are developed, which allows to obtain the ordered quality of service based on the feedback between the customer and the network operator.

Key words: intent-based networking, software-defined networking, quality of service, resource allocation, quality of experience, virtualization, routing.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

LAN – Local Area Network, локальна мережа.
WAN – Wide Area Network, глобальна мережа.
LTE – Long Term Evolution, довготерміновий розвиток.
IoT – Internet of Things, Інтернет речей.
NB-IoT – Narrow Band Internet of Things, вузькосмуговий Інтернет речей.
QoE – Quality of Experience, якість сприйняття, ступінь задоволеності користувача.
QoS – Quality of Service, якість обслуговування.
IBN – Intent-Based Networking, інтенційно-орієнтована мережа.
SDN – Software-Defined Networking, програмно-конфігурована мережа.
IBSDN – Intent-Based Software-Defined Network, програмно-конфігурована інтенційно-орієнтована мережа.
NFV – Network Functions Virtualization, віртуалізація мережевих функцій.
SDR – Software Defined Radio, програмно-конфігурована радіосистема.
DPI – Deep Packet Inspection, глибока перевірка пакетів.
RT – Real Time, реальний час.
URLLC – Ultra Reliable Low Latency Communications, надійний зв'язок із низькою затримкою.
DNS – Domain Name System, служба доменних імен.
RTP – Real-time Transport Protocol, протокол передачі даних в реальному часі.
HTTP – HyperText Transfer Protocol, протокол передачі гіпертексту.
TLS – Transport Layer Security, протокол захисту транспортного рівня.
E2E – End-to-End, з кінця в кінець.
SINR – Signal to interference plus noise ratio, відношення сигналу/шум.
CQI – Channel Quality Indicator Channel Quality Indicator, індикатор якості каналу.
RAN – Radio Access Network, мережа радіодоступу.
VM – Virtual Machine, віртуальна машина.
UDP – User Datagram Protocol, протокол датаграм користувача.
CDF – Cumulative Distribution Function, кумулятивна функція розподілу.
RR – Round Robin, циклічний алгоритм розподілу ресурсів.
PF – Proportional Fairness, пропорційно-справедливий алгоритм розподілу ресурсів.
RAM – Random Access Memory, пам'ять з довільним доступом.
DMCQR – Deterministic Multiconstrained Centralized QoS Routing, централізована детермінована багатокритеріальна QoS маршрутизація.

Підписано до друку 31.03.2021р. Папір офсетний. Друк на різогр.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,9. Наклад 120 прим. Зам. №319

Друк СПДФО Марусич М.М. Свідоцтво №1252 від 30.12.1996
м. Львів, пл. Осмомисла, 5/11
тел./факс (032) 261-51-31.
email: interprint-m@ukr.net