

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

**МАСЮК АНДРІЙ РОМАНОВИЧ**

УДК 621.396

**МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ СПІЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В  
БЕЗПРОВІДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Климаш Михайло Миколайович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри телекомунікацій.

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

кандидат технічних наук, старший науковий  
співробітник

**Скулиш Марія Анатоліївна**, Національний технічний  
університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри  
інформаційно-телекомунікаційних мереж.

Захист дисертації відбудеться “12” жовтня 2018 р. о 14<sup>30</sup> год на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 218, XI навчальний корпус).

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

Автореферат розісланий “07” вересня 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради



І. В. Демидов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В умовах стрімкого глобального зростання обсягів трафіку мережі мобільного зв'язку наступного покоління повинні орієнтуватись на потреби клієнтів для підвищення якості обслуговування. Для того, щоб адаптуватися до зростаючого потоку інформації в найближчій перспективі сучасні підходи, такі як розширення спектру та розгортання більшої кількості базових станцій в мобільній мережі вже не будуть актуальними з точки зору вартості, масштабованості та гнучкості. Різке збільшення обсягів інформаційного трафіку, яке, в основному, спричинене мобільним відео, соціальними медіа та різноманітними сервісами «Інтернету речей» змушує мобільних операторів шукати інноваційні способи управління мережами в умовах обмежених частотних та транспортних ресурсів. Перед телекомунікаційними компаніями постає завдання створення мереж, які були б інтегровані на усіх рівнях, поєднували би різні стандарти і технології, забезпечуючи безшовний перехід з одного стандарту до іншого, від однієї технології до іншої. Саме такі мережі отримали назву гетерогенних. В умовах гетерогенності та сумісної роботи багатьох операторів безпроводного зв'язку пріоритетним завданням стає ефективне управління спільними радіоресурсами і забезпечення прозорого пересування абонента, що включають у себе такі механізми як підтримка мобільності, хендовер, забезпечення QoS, а також систему безпеки та тарифікації. Хендовер у гетерогенній мережі є ключовою функцією, що дає змогу абоненту безшовно пересуватися у мережі. При цьому горизонтальний хендовер є достатньо дослідженою процедурою та здебільшого ґрунтується на рівні сигналу, що приймається (Received Signal Strength, RSS). Тоді як вертикальний хендовер є більш складною процедурою у зв'язку з неоднорідною природою різних мереж мобільного зв'язку та потребує удосконалення з метою ефективного використання їх ресурсів, максимізації якості послуг, що надаються та задоволеності користувачів. Дослідженням завдань управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах займаються фахівці в Україні та закордоном. Зокрема, питання забезпечення якості послуг в гетерогенних мережах розглядали Глоба Л.С., Гаркуша С.В., Воропаєва В.Я., Безрук В.М., Лемешко О.В. Серед іноземних дослідників слід відзначити роботи з питань розроблення алгоритмів та підходів до реалізації вертикального хендовера Harsha A. Bhute, Omar Khatib, Zekri M., Jouaber V. Проте, у більшості із відомих робіт в процесі вибору мереж радіодоступу розглядаються лише декілька параметрів, які не дають змоги враховувати в процесі ресурсного оцінювання та управління велику кількість критеріїв і динамічно адаптувати правила прийняття рішень. Для того, щоб це здійснювати необхідно розглянути перехід від нинішньої архітектури мобільних мереж до нової парадигми, що базуватиметься на збиранні та зберіганні інформації в дата центрах для її подальшого аналізу та прийняття рішень. Саме тому, актуальним питанням є управління мережами, керованими на основі аналізу великих обсягів даних у хмарному середовищі, оскільки зростання їх обсягу стає викликом для сучасної мобільної інфраструктури.

Таким чином, розширення спектру послуг, масштабування інфраструктури та обсягів трафіку, що постійно зростають, спонукають до розв'язання наукового завдання підвищення ефективності функціонування безпроводних гетерогенних мережних систем та покращення якості обслуговування користувачів за рахунок удосконалення методу адаптивного вибору систем радіодоступу та розроблення моделі спільного управління ресурсами з використанням технології обробки великих обсягів даних.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційну роботу виконано у межах держбюджетної науково-дослідної теми «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання», (2017–2019 рр.), № держреєстрації 0117U004449 та держбюджетної науково-дослідної теми «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні», (2017–2019 рр.), № держреєстрації 0117U007177.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розширення функціональності систем мобільного зв'язку та покращення якості послуг, що ними надаються шляхом удосконалення методу адаптивного вибору мережі радіодоступу та розроблення моделі спільного управління мережними ресурсами з використанням технології обробки великих об'ємів даних.

Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням таких завдань:

1. Аналіз проблематики в галузі сучасних мобільних мереж зв'язку та перспектив розвитку гетерогенних мобільних мереж.
2. Математична формалізація завдання забезпечення ефективного функціонування гетерогенної мережі радіодоступу.
3. Розроблення методу адаптивного вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин.
4. Удосконалення централізованого алгоритму інтелектуального хендверу в гетерогенній мобільній мережі зв'язку на основі моделі хмарних обчислень.
5. Розроблення та дослідження імітаційної моделі безпроводної гетерогенної мережі зв'язку.
6. Розроблення поетапного методу підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку.
7. Практична реалізація технологій оброблення великих обсягів даних, одержаних шляхом імітаційного моделювання процесу функціонування гетерогенної мережі.
8. Оцінювання ефективності запропонованих рішень стосовно розв'язання завдання оптимізації ресурсів гетерогенної мережі мобільного зв'язку.

*Об'єкт дослідження* – процес оптимізації ресурсів гетерогенної мережі мобільного зв'язку із забезпеченням якості обслуговування.

*Предмет дослідження* – методи та алгоритми адаптивного управління радіоресурсами в безпроводних гетерогенних мережах.

*Методи дослідження.* У роботі знайшли своє застосування теорія систем та мереж масового обслуговування, аналітичні, імітаційні методи дослідження, а також методи натурального експерименту (в орендованому cloud-середовищі).

**Наукова новизна** роботи полягає у тому, що:

1. Вперше запропоновано модель для дослідження процесів функціонування гетерогенного мережного середовища, яка, на відміну від відомих, використовує методику оброблення великих об'ємів даних для виконання моніторингу передавання інформації, аналізу завдань, які формуються користувачами мережі та виведення статистичних даних щодо ініціації хендвера в інфраструктурі мобільного зв'язку та дала змогу дослідити процес оптимізації операторської мережі шляхом реалізації алгоритму перерозподілу її мережевих ресурсів і забезпечення гнучкого балансування навантаження.

2. Набула подальшого розвитку імітаційна модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку, яка, на відміну від відомих, автоматизує запропонований метод вибору радіоінтерфейсу вузла безпроводного доступу на основі теорії нечітких множин, використовуючи допоміжні математичні моделі, зокрема для опису та прогнозування процесів руху користувачів мереж мобільного зв'язку та дала змогу здійснювати вибір значної кількості параметрів моделювання для створення умов дослідження, що є близькими до умов реальної експлуатації телекомунікаційних систем.

3. Удосконалено метод вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному мережному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин, що дало змогу централізовано приймати обґрунтовані рішення щодо проведення процедури горизонтально-вертикального хендвера, базуючись на значеннях мережних параметрів, які належать до групи QoS-залежних критеріїв, а також таких, що залежать безпосередньо від властивостей радіоінтерфейсів мережної системи; передбачено можливості адаптування правил прийняття рішень, залежно від різних умов експлуатації телекомунікаційних систем та запроваджених мережних політик.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що:

1. Набув подальшого розвитку метод підвищення продуктивності гетерогенної мережі мобільного зв'язку шляхом знаходження комплексного інтелектуального рішення щодо спільного управління ресурсами телекомунікаційних операторів, який, на відміну від відомих, включає процедуру ініціації вертикального хендвера, гнучкого перерозподілу інформаційних потоків і відкидання неперіоритетних сеансів користувачів та дає змогу підтримувати безшовне пересування рухомих абонентів із необхідною якістю обслуговування.

2. На основі застосування концепції хмарних обчислень розроблено інтелектуальний алгоритм вертикального хендвера в гетерогенних мобільних мережах із використанням методів нечіткої логіки для більш повної агрегації та оброблення мережних параметрів і прийняття рішення про міжсистемне переключення, що дало змогу ефективно використовувати ресурси різних

мережних операторів і надавати телекомунікаційні послуги з кращою якістю (до 6 разів зменшено середню затримку та джитер пакетів даних при обслуговуванні відео потоків реального часу).

3. На основі запропонованих рішень із використанням методу додаткового резервування ресурсів мережі, порівняно з гомогенними мережами досягнуто підвищення продуктивності гетерогенної мережі мобільного зв'язку до 16%; а також додатково, в порівнянні з попереднім методом, – до 13% із використанням методів рівномірного розподілу ресурсів та за рахунок використання динамічного резервування. За допомогою застосування пріоритезації користувачів гетерогенної безпроводної мережі підвищено якість їх обслуговування та зменшено кількість незадоволених клієнтів.

4. Реалізовано систему оброблення великих обсягів даних на мові програмування Python, а саме розроблено скрипти для аналізу, фільтрації та впорядкування великих обсягів даних, які дали змогу приймати обґрунтовані рішення для управління мережними ресурсами та прогнозування поведінки гетерогенної мережної системи.

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

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено для покращення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних мережах ТзОВ ВТФ "Контех", ТзОВ "Телекомунікаційна компанія", ПП "Цифрові технології", що підтверджено актами впровадження.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 15-ох міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів-Славське 2016, 2018 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» ПТ-11, ПТ-16, ПТ-16 (м. Київ, 2011, 2015, 2016 рр.); 5-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (2016 р., м. Чернівці, Україна); Науково-практичній конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013», м. Львів, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції (Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології) (м. Київ, 2015 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2015, 2017 рр.); 2015, 2016 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T) (Kharkiv,

Ukraine, 2015, 2016 pp.); Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки IEEE (UkrMiCo'2016/UkrMiCo'2016) (м. Київ, 2016 р.); International IEEE Conferences on Advanced Information and Communication Technologies-2015, 2017 (м. Львів, 2015, 2017 pp.). Крім цього, дисертаційна робота у повному обсязі представлена на наукових семінарах кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

**Публікації.** За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 20 наукових праць, серед них 1 стаття в іноземному науковому періодичному виданні за напрямом дисертації [1], 4 статті у наукових фахових виданнях згідно з переліком МОН України [2–5] та 15 публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій [6–20].

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, викладені в дисертації, автор одержав особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: у роботах [1, 14] – розроблення адаптивного вибору мережі доступу в гетерогенній інфраструктурі, [2, 6, 8, 15] – розроблення та дослідження імітаційної моделі гетерогенної мережі, [3, 10, 12, 17] – алгоритм централізованого інтелектуального хендвера, [5, 7, 9, 18] – дослідження якості обслуговування в гетерогенних мережах, [4, 11-14, 20] – підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж методом динамічного перерозподілу ресурсів між різними безпроводовими технологіями доступу.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 182 сторінки друкарського тексту, із них 7 сторінок вступу, 131 сторінка основного тексту, 87 рисунків, 14 таблиць, список використаних джерел зі 121 найменування.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження результатів роботи, її апробацію, публікації та особистий внесок здобувача.

У першому розділі “Аналіз технологій мобільного зв'язку та перспективи впровадження гетерогенних мобільних мереж” проведено аналіз технологій мобільного зв'язку. Визначено перелік вимог, необхідних для забезпечення необхідної якості обслуговування абонентам. Стрімке зростання обсягів клієнтського трафіку в мережах мобільного зв'язку, зміна його характеру і структури потребують безперервного і значного збільшення пропускної спроможності цих систем. Технології радіоінтерфейсів практично досягають теоретичних меж каналної пропускної здатності, тому подальшим шляхом для підвищення ємності мережі є просторове ущільнення та вдосконалення методів управління розподілом радіоресурсів. Для досягнення

більшій продуктивності мережі запропоновано використовувати гетерогенні мережі із комірками різних розмірів. Розглянуто ряд технічних завдань, які необхідно вирішити в гетерогенних мережах, а саме: планування мережі, боротьба з міжсистемною інтерференцією, організація транспортної мережі, управління мережею та її самоорганізація, управління мобільністю, тощо. Також розглянуто стратегічні напрями впровадження SDN, NFV і хмарних технологій, перший пов'язаний із підвищенням ефективності мережі та гнучкості послуг, другий націлений на отримання переваг від поєднання нових бізнес-можливостей. З проведеного аналізу випливає, що існуючі методи підвищення ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку стикаються з проблемою відсутності технології управління гетерогенними мережами, яка даватиме змогу отримати гнучку, керовану, адаптивну та економічно ефективну систему, з прогнозуванням навантаження від абонентів та орієнтацією на задоволення користувача.

У другому розділі “Метод та алгоритми адаптивного управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах” формалізовано завдання вибору безпроводної мережі доступу при здійсненні хендвера в гетерогенному середовищі. Нехай задано замкнутий простір  $\Omega$ , у якому діє безпроводна гетерогенна мережа (або гетерогенна мережа, що складається з  $S$  мереж радіодоступу та набору з'єднань  $n=(1,2,\dots,N)$ , кожна з яких складається з окремих станцій з різними характеристиками:

$$S = \{S_i\}, i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

де  $S$  – різномірні базові станції або точки доступу в гетерогенному середовищі,  $i$  - кількість станцій. Кожна станція безпроводного зв'язку  $S_i \in S$  має ряд характеристик

$$\chi(S_i) = \{\chi_{i1}, \chi_{i2}, \dots, \chi_{ij}, \dots, \chi_{in}\}, \quad (2)$$

де  $\chi(S_i)$  – характеристики базових станції або точок доступу,  $n$  – загальна кількість характеристик.

В просторі  $\Omega$  під впливом дії множини станцій безпроводного зв'язку  $CV$  існує множина мобільних пристроїв, які функціонують у режимі роумінгу (без навантаження), або виконують службові операції. Нехай цими пристроями є:

$$D = D_1, D_2, \dots, D_f, \dots, D_m, \quad (3)$$

де  $m$  - кількість мобільних пристроїв,  $f$  – позиція мобільного пристрою.

Кожен пристрій  $D_f \in D$  має ряд характеристик:

$$\eta(D_f) = \{\eta_{f1}, \eta_{f2}, \dots, \eta_{ff}, \dots, \eta_{fn}\}, \quad (4)$$

де  $\eta_f$  - характеристики мобільного пристрою  $D_f$ .

$$S(D_f) = \{S^0, S^F, S^R\}, \quad (5)$$

де  $S^0(D_f)$  – не функціонує (не включений, несправний),  $S^F(D_f)$  – функціонує у вільному режимі,  $S^R(D_f)$  – працює: окремо або спільно.

Уведемо набір процесів (BP), які потрібно виконувати в просторі  $\Omega$  або вести підтримку їх виконання  $BP = \{BP_i : i = 1, \dots, L\}$ . Розглянемо випадок



одиначного процесу обслуговування. Тоді одиничний процес ВР складається з робочих операцій

$$R_o = \{R_{o1}, R_{o2}, \dots, R_{oj}, \dots, R_{ok}\}, \quad (6)$$

де  $k$  – кількість робочих операцій, значення цієї змінної визначає постановник завдань;  $R_{oi}$  – робоча операція, що входить до складу процесу. Для виконання кожної робочої операції накладаються певні вимоги:

а) вимагається виконання умов з боку пристроїв, тобто на вибір пристроїв для виконання та призначення робочих операцій накладається низка умов, обмежень, критеріїв. Усі ці вимоги позначимо через

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_g\}, \quad (7)$$

де  $g$  – загальна кількість вимог, критеріїв, значення якого визначає постановник завдань;  $V_i$  –  $i$ -та вимога, яку визначає оператор.

б) щодо якості функціонування робочої операції пред'являється ряд вимог:

$$W = \{W_1, W_2, \dots, W_h\}, \quad (8)$$

де  $h$  – кількість вимог і критеріїв на виконання (підтримки процесу виконання та результату виконання робочих операцій). Значення  $h$  (кількість вимог і критеріїв) визначає постановник завдань.  $W_i$  – вимоги на виконання робочої операції: оперативність, мінімальна вартість тощо.

*Сформулюємо загальну постановку оптимізаційного завдання ефективного безвідмовного зв'язку:*

В момент часу  $t$  ( $t_n$ ) стан середовища простору  $\Omega$  наступний (тобто ситуація – прийняття рішень):

$$S(\Omega) = \{CV, D, R_o, V, W\}, \quad (9)$$

Тоді в момент часу  $t_n$  необхідно вибрати таку станцію безпроводного зв'язку  $CV_i \in CV$ , яка задовольнятиме вимоги цільової функції

$$Q = F(W) = F\{W_1, W_2, \dots, W_j\} \rightarrow opt, \quad (10)$$

де  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_j\}$ ,  $j < h$ , далі з виразу (10) функцію  $F\{W_1, W_2, \dots, W_j\}$ , перетворимо в цільову функцію виду:

$$f(b_{ij}, r_{ij}, P_i) \quad (11)$$

Цільова функція (11) – це критерій, який необхідно максимізувати (пропускна здатність, QoS, швидкість передачі, відносно вартості або певного комплексного критерію). Кожна мережа має обмежений радіоресурс  $P_i$ . Коли мобільний пристрій  $i$  розподіляється в мережу  $j$ , він використовує її ресурс у розмірі  $r_{ij}$ ;  $r_{ij}^{min}$  – це мінімальний ресурс, необхідний для задоволення вимог QoS користувача,  $b_{ij}$  – це бінарна змінна, яка дорівнює 1, якщо мобільний пристрій  $i$  розподілений в мережу  $j$ , а інакше – дорівнює 0. Якщо всі ресурси мережі зайняті і надходять нові запити на послуги, то розподіл ресурсів між користувачами здійснюється у відповідності до певної політики, яка представлена функцією  $p_{ij}(v_j, P_j, D_j)$ . Вона може залежати від загальної ємності мережі ( $v_j$ ), кількості мобільних пристроїв ( $D_j$ ) і вектора вимог QoS для всіх

з'єднань ( $P_j$ ). На підставі викладеного вище сформулюємо загальну постановку оптимізаційного завдання вибору мережі при горизонтально-вертикальному хендовері у наступному вигляді:

$$\max(f(b_{ij}, r_{ij}, P_i)) \quad (12)$$

Таким чином, замість розв'язання завдання (10), розв'язуємо завдання (12),

за умови, що  $\sum_{i=1, n} \sum_{j=1, m} b_{ij} = 1$ ; тобто мобільний пристрій  $i$  знаходиться в мережі.  
 $b_{ij} \in \{0, 1\}$  при  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ; (13)

$$r_{ij} = \begin{cases} r_{ij}^{\min}, & \text{якщо } \sum_{i=1, n} \sum_{j=1, m} r_{ij} \cdot b_{ij} \leq P_j \\ P_j(v_j, P_j, D_j), & \text{якщо } \sum_{i=1, n} \sum_{j=1, m} r_{ij} \cdot b_{ij} > P_j; \end{cases} \quad (14)$$

Одним із запропонованих у роботі варіантів розв'язання цього завдання є **метод адаптивного вибору безпроводної мережі доступу** в гетерогенному середовищі на основі застосування для агрегації множини оцінок та ухвалення рішень теорії нечітких множин, блок-схема якого представлена на (рис.1).

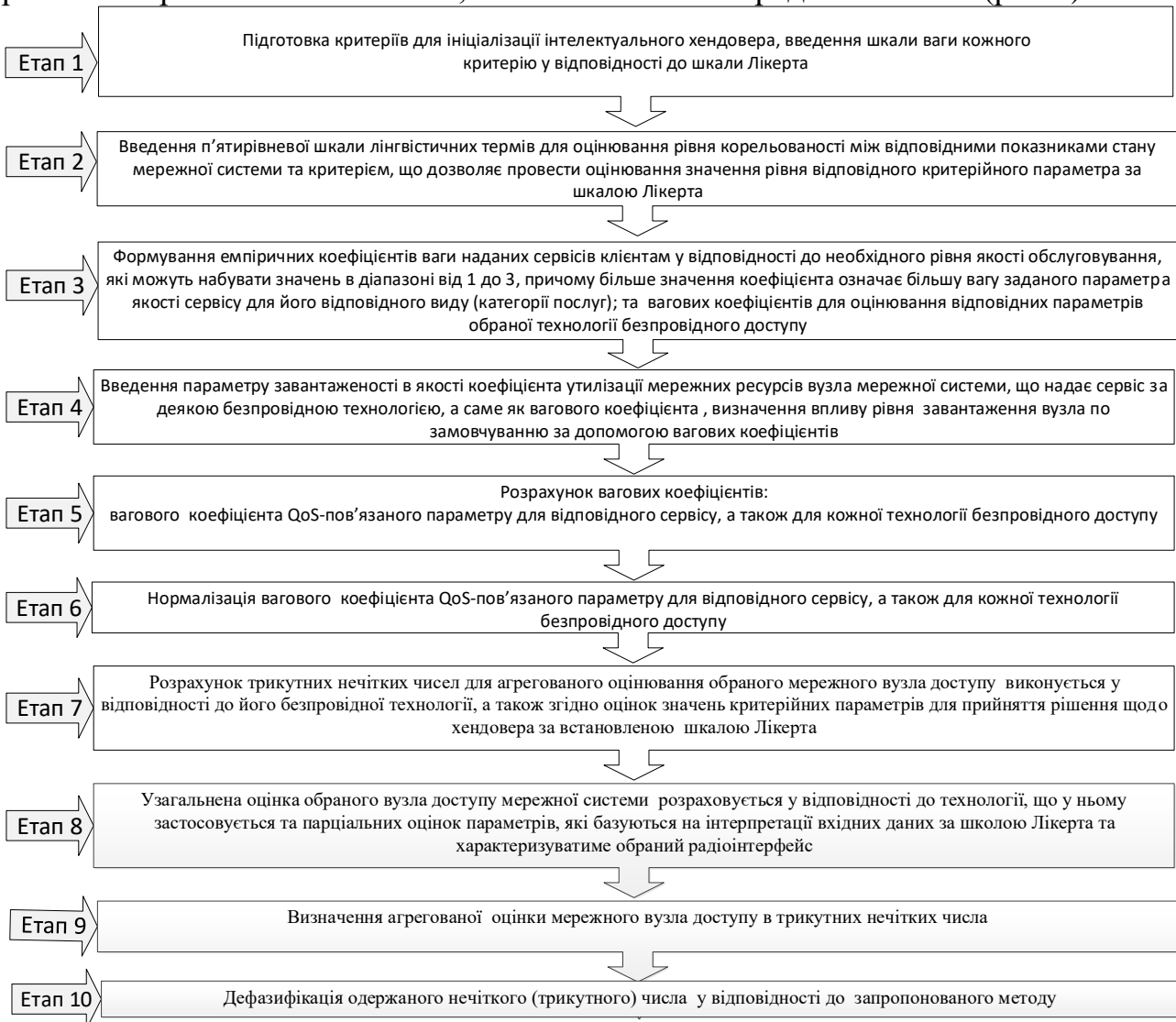


Рис. 1. Блок-схема методу адаптивного вибору безпроводної мережі доступу

Цей метод (рис. 1) включає в себе три основні компоненти: збір даних, агрегація та нормалізація даних і прийняття рішення про переключення. Для того, щоб виконати інтелектуальні рішення щодо передачі обслуговування в гетерогенному середовищі запропоновано поділити всі параметричні критерії на дві групи: QoS-залежні та такі, що залежать безпосередньо від властивостей радіоінтерфейсу безпроводної мережної системи (див. рис.2).

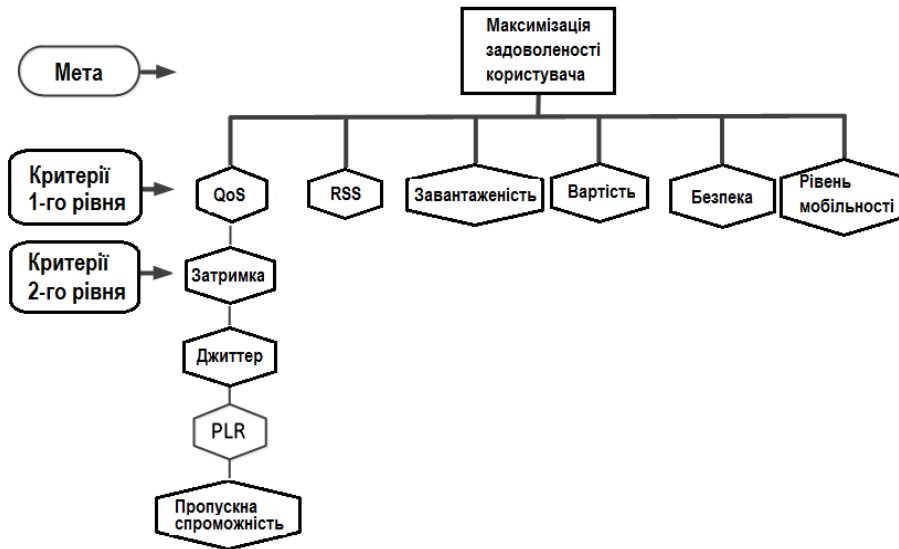
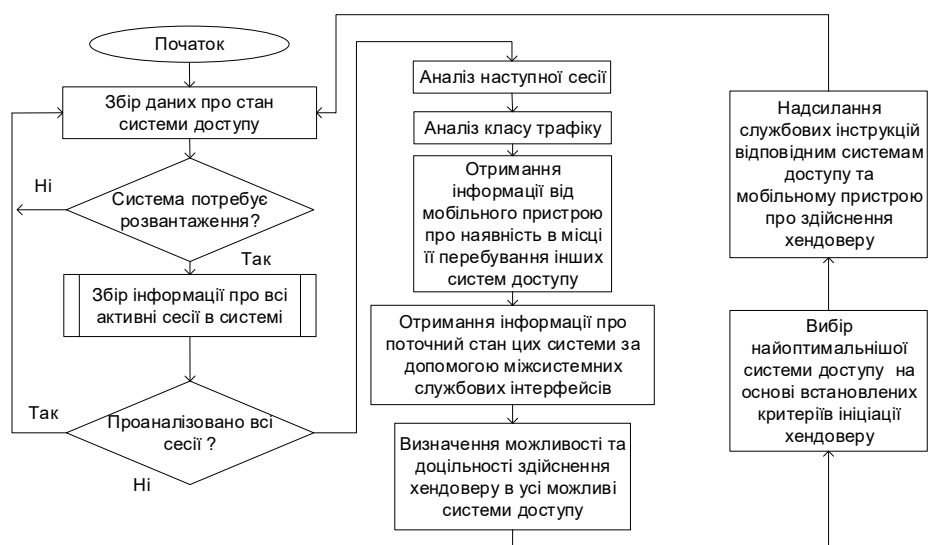


Рис. 2. Множина критеріїв для прийняття рішення щодо ініціалізації процесу горизонтально-вертикального хендовера

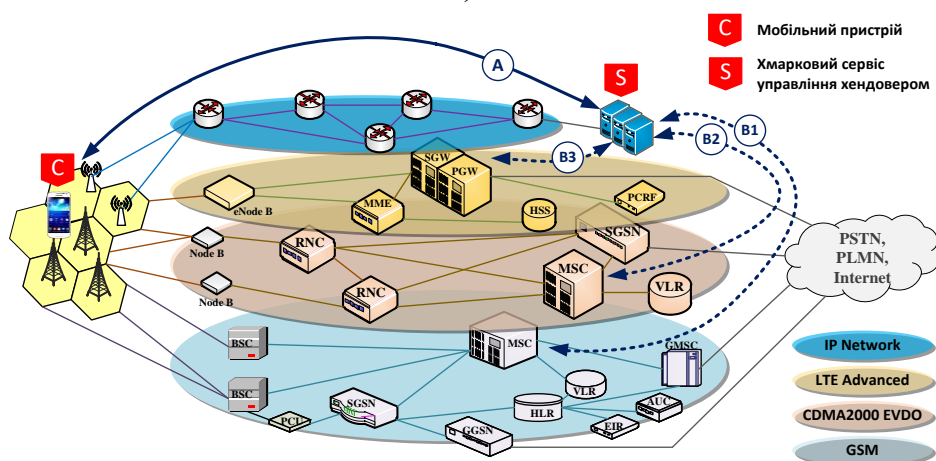
Створення такого інтелектуального алгоритму прийняття/передачі обслуговування є досить складним завданням через складність ланцюга передачі обслуговування, урахування різноманітних технічних та якісних метрик, модульності рішення передачі обслуговування та інформаційної неточності. В роботі пропонується розвиток теорії нечітких множин, як ефективного засобу для розв'язання цих завдань, також описаний хід рішення і логічний висновок (рис. 1). Процес вибору найбільш оптимальної мережної системи буде відбуватися в рамках взаємодії із системою моніторингу її завантаженості, використовуючи засоби для реалізації хмарних обчислень та методи нечіткої логіки.

Для того, щоб швидко розв'язати завдання вибору мережі доступу у гетерогенній мережній платформі, в цьому розділі роботи запропоновано централізовану реалізацію процесу управління хендовером на основі хмарних технологій із використанням методів нечіткої логіки. Оптимізація ресурсів, що представляє собою їх перерозподіл згідно інтересів кінцевих користувачів спрямована на пошук екстремального значення у процесі вивчення поведінки безпроводної системи доступу (максимум з точки зору результативності, мінімум – витрат). В процесі оптимізації з'ясується, який стан логістичної системи буде найкращим з точки зору пропонованих до неї вимог (алгоритм цього процесу розглянутий на рис.3 а). Для цього розроблено програмне забезпечення на серверному кластері, що керує процесами ресурсної

оптимізації (вертикального хендовера), які в узагальненому вигляді представлено на рис. 3 б [10].



а)



б)

Рис. 3. Алгоритм централізованого інтелектуального вертикального хендовера – а) та структурна схема гетерогенної мережі з централізованим управлінням ресурсами – б)

Використовуючи можливості та засоби хмарних сервісних платформ, подібні розрахунки щодо оптимального вибору мережної системи забезпечуються в межах кількох мілісекунд [2].

У третьому розділі “**Моделювання та дослідження процесів функціонування гетерогенної мережі**” для дослідження процесів функціонування гетерогенної мережі з високим рівнем мобільності користувачів *розроблено імітаційну модель* з використанням значної кількості параметрів і характеристик, які дозволяють описати існуючі мережні технології, використовуючи, відповідно, математичні, прогностичні і оптимізаційні моделі. Створена модель гетерогенної платформи безпроводного доступу автоматизує запропонований метод вибору мережі призначення шляхом розроблення програмного забезпечення, яке реалізує процеси моделі,

описані в розділі 2. Крім того, імітаційна модель за допомогою графічного інтерфейсу дозволяє в режимі реального часу змінювати параметри системи і, таким чином, оцінювати її поведінку в конкретній ситуації, що може виникнути в реальній сервісній мережній платформі. Імітаційна модель містить блок моделювання поведінки користувачів, який включає в себе генерацію трафіку (рис. 4 а). Сформовані об'єкти-користувачі передаються «менеджеру користувачів». Якщо користувач тільки реєструється в мережі і не має активних сесій, то він відзначається в графічному інтерфейсі моделі, як товста сіра точка. Якщо користувач має активне з'єднання з мережею, тоді він відзначається кольоровою точкою з кольором в залежності від того, до якої мережної системи він підключений (до GSM - зелений колір, до LTE - синій колір, до UMTS - розовий колір). Користувач в такій моделі представлений, як об'єкт з набором параметрів, таких як: тривалість активності, вектор руху, швидкість руху, місце перебування, відстань до базових станцій (мережних вузлів доступу), рівень сигналу від кожної базової станції LTE, UMTS і GSM (RSS) та інших додаткових параметрів, необхідних для функціонування моделі. Головне вікно програми, що реалізує моделювання відповідно до створеної імітаційної моделі показано на рис. 4 б. Інтерфейс містить компонент для відображення використання трьох базових станцій типу GSM, UMTS і трьох базових станцій типу LTE. Для розроблення цього програмного забезпечення в даній роботі використовується мова програмування C ++, базуючись на середовищі розроблення Borland Builder C ++ 6.

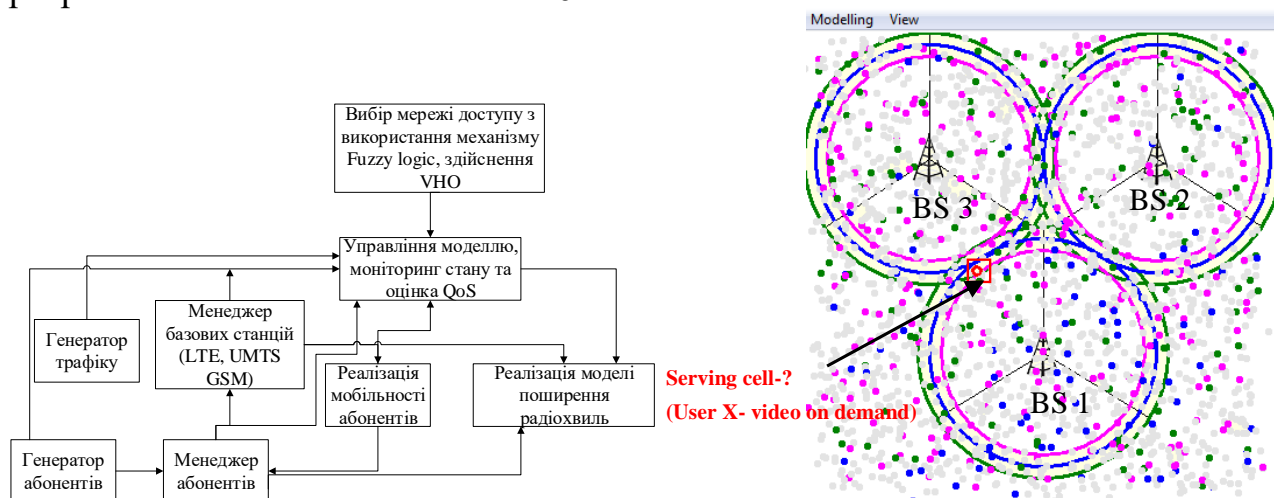


Рис. 4. Структурна схема – а) та інтерфейс імітаційної моделі гетерогенної мережної платформи безпроводного доступу – б) [1]

На рис. 5-6 показано процес балансування навантаження шляхом реалізації запропонованого методу вибору підсистеми доступу гетерогенної мережі.

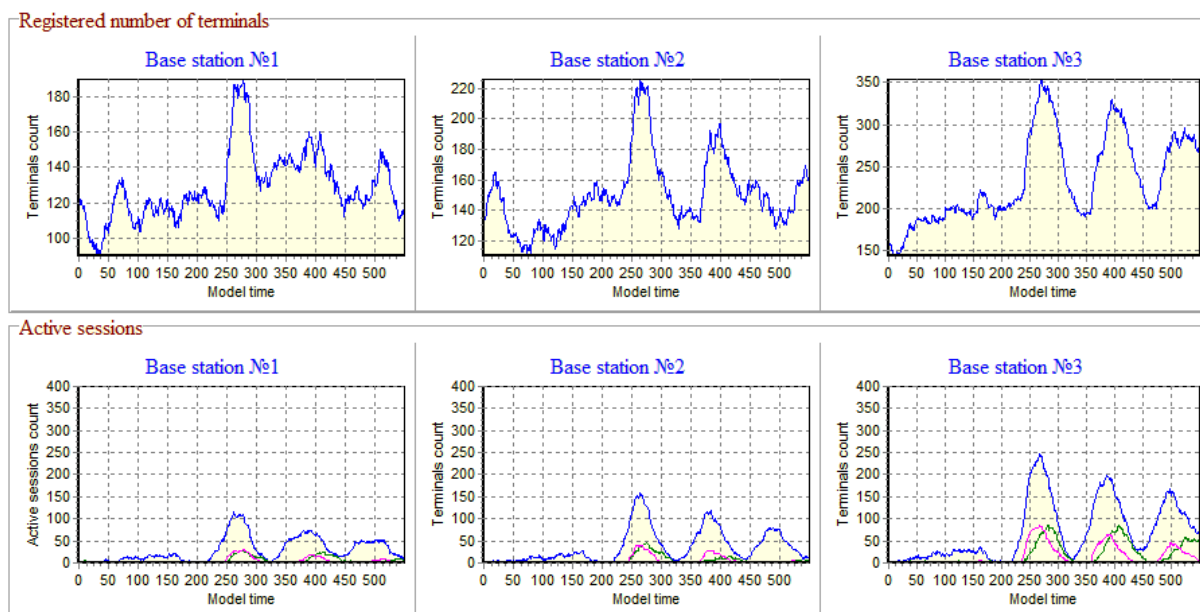


Рис. 5. Міжсистемне балансування навантаження в процесі моделювання мережі

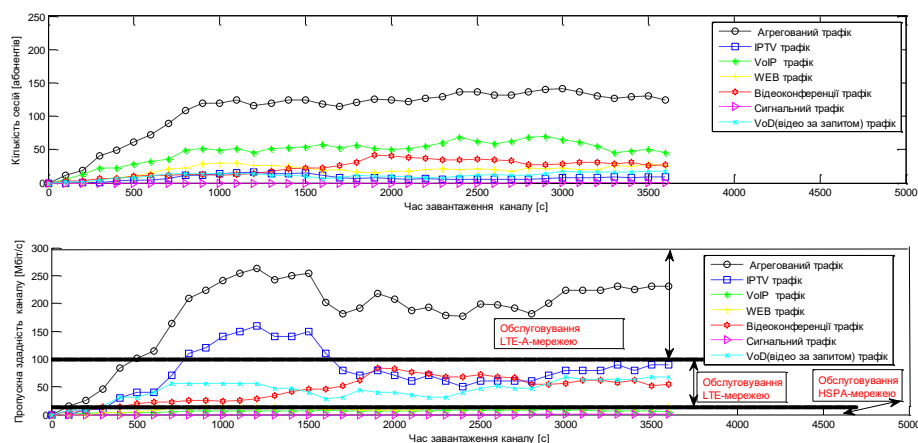


Рис. 6. Навантаження на гетерогенну мережну платформу від різних мережних систем доступу – а) та поріг ініціювання інтелектуального вертикального хендвера – б) [14-16]

Для того, щоб порівняти продуктивність системи без інтелектуальної вертикальної передачі обслуговування та із нею, програма має можливість відключити цей алгоритм. Таким чином, застосування запропонованого методу, який базується на теорії нечітких множин кількісно демонструє різницю між параметрами QoS (затримкою та джитером) відеосервісу реального часу випадкового користувача. При стандартному методі вибрано вузол доступу - UMTS BS1 (рис. 7 а), середня затримка становить 0,6 с (рис. 7 б), а джитер – 30 мс (рис. 7 в). Для запропонованого методу переключення (рис. 1), який базується на теорії нечіткої логіки вибрано вузол доступу - LTE BS1 (рис. 7 г), затримка становить 104 мс (рис. 7 д) і джитер - 5 мс (рис. 7 е).



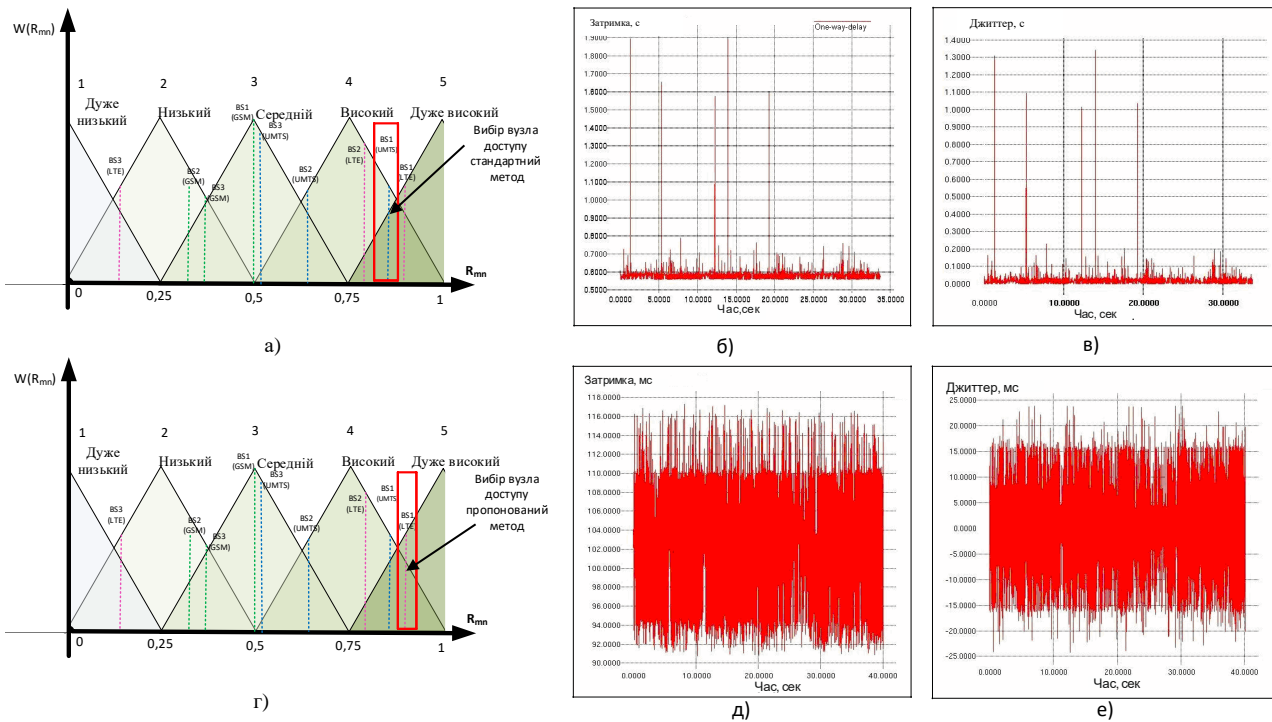


Рис. 7. Визначення оптимального вузла мережної системи доступу для виконання хендвера за шкалою Лікерта – а), середня затримка пакетів – б), та джиттер – в) при перегляді IPTV за стандартним методом; вибір мережної системи доступу – г) середня затримка пакетів – д) та джиттер – е) при перегляді IPTV із запропонованим методом (рис. 1).

Отже, з допомогою імітаційної моделі проведено дослідження не лише процесів балансування навантаження між різнотипними базовими станціями, але і підвищено якість обслуговування клієнтів операторами стільникового зв'язку.

В четвертому розділі роботи “Практична реалізація системи обробки великих об’ємів даних для підвищення ефективності гетерогенних мобільних мереж” запропоновано етапи процесу оптимізації гетерогенної мережі із використанням технології обробки великого об’єму даних (Big Data, BD). Шляхом використання BD та адаптації різних мережевих ресурсів відповідно до динамічно змінних часових характеристик можна покращити пропускну здатність усієї мережі. З метою підвищення ефективності мережної інфраструктури в умовах навантаження, що зростає на мережі мобільних операторів (Mobile Network Operators, MNOs), рекомендується класифікувати запити трафіку користувачів до необхідних мережних ресурсів та покращити ефективність їх розподілу за допомогою використання методики оброблення інтелектуальної та аналітичної інформації на основі BD. На рис. 8 представлено загальний принцип роботи запропонованого алгоритму для оптимізації ресурсів гетерогенної мережі із використанням Big Data.



Рис. 8. Етапи методу підвищення продуктивності гетерогенної мережі з використанням Big Data

На першому етапі відбувається збір “великих даних”, що досягається за допомогою користувацького обладнання (UE), мережі радіодоступу (RAN) та постачальників послуг Інтернету (ISP). На другому етапі проводиться аналіз зібраних даних. Аналіз цих даних дає змогу MNOs систематично керувати різними мережами доступу та оптимізувати надання послуг клієнтам. Функції оптимізації мережі на основі BD здатні аналізувати статистику для виявлення проблем та вирішувати, що і як оптимізувати на відповідному рівні гетерогенної мережі. На третьому етапі відбувається управління ресурсами операторів мереж радіодоступу. На основі отриманих після їх аналізу оператори приймають інтелектуальні рішення щодо обслуговування користувачів, шляхом балансування навантаження та пріоритезації трафіку для підвищення ефективності функціонування та забезпечення необхідної якості обслуговування в гетерогенній мережній системі. На четвертому етапі розв’язується завдання оптимізації гетерогенної мережі шляхом застосування комплексного методу, який включає процедуру ініціації вертикального хендоверу, перерозподілу потоків та відкидання непріоритетних сеансів користувачів.

На основі сформованих етапів методу підвищення продуктивності гетерогенної мережі запропоновано *модель функціонування гетерогенного мережного середовища*, яка, на відміну від відомих, використовує методику оброблення великого об’єму даних для ведення моніторингу за процесами передавання інформації, аналізу завдань та виведення необхідних звітностей щодо переключення або ініціації хендовера та дає змогу дослідити процес оптимізації мережевої інфраструктури операторської мережі шляхом реалізації алгоритму перерозподілу її мережних ресурсів та балансування навантаження (див. рис. 10). Для спрощення розуміння у роботі запропоновано ієрархічне представлення вхідних даних в межах реалізації розробленого комплексного процесу оптимізації гетерогенної мережі.

На рис. 9 представлено ієрархічну структуру вхідних даних для моделювання досліджуваної мережі, яка складається із площин *технологій*, *сервісів* та *QoS*.



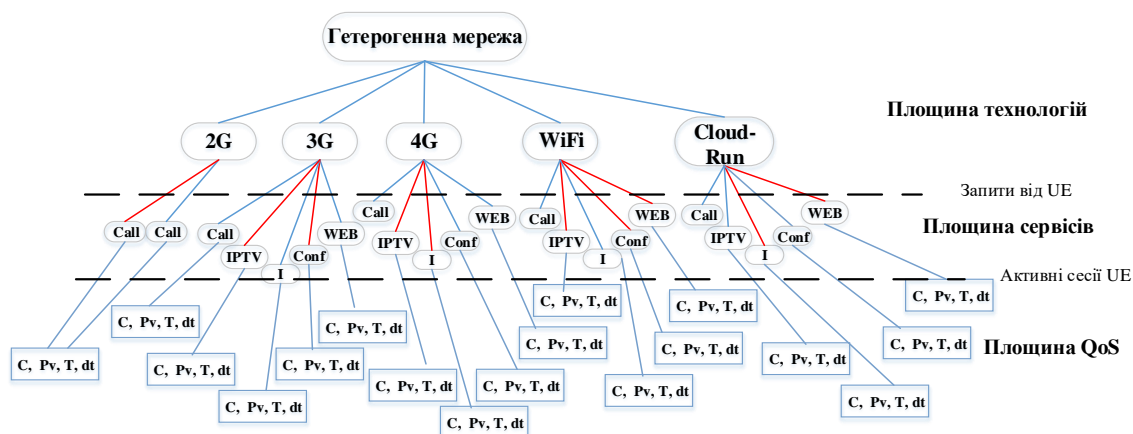


Рис. 9. Ієрархічна структура вхідних даних досліджуваної гетерогенної мережі

Для практичної реалізації запропонованих підходів вирішено застосувати хмарне рішення, а саме оренду DigitalOcean cloud, на основі створення акаунту в DigitalOcean із налаштуванням серверу з ОС Ubuntu 16.04 та встановленням програмного забезпечення, необхідного для експериментального дослідження.

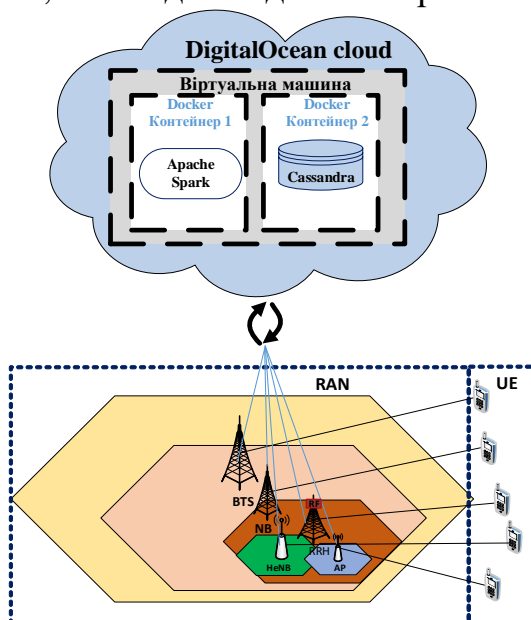


Рис. 10. Загальна схема моделі гетерогенної мережі з використанням BD

Далі переходимо до аналізу даних. На рис. 11 представлено алгоритм роботи моделі, який дає змогу оптимально управляти ресурсами гетерогенної мережі. Робота алгоритму розпочинається із запису вхідних даних у БД Cassandra. До вхідних даних належать запити на обслуговування від UE, а також дані про стан гетерогенної мережі (активні сесії для кожної технології доступу). Після запису статистичних даних переходимо до їх аналізу та порівняння з максимально допустимими значеннями для кожної із технологій. За допомогою аналізу даних оцінюються критичні точки в мережі та приймаються рішення про підключення запитів від UE (якщо є вільні ресурси в мережі), що поступають в конкретний момент часу. У випадку завантаження гетерогенної мережі проводиться детальний аналіз NP (Network Parameters) активних сесій та запитів, що надійшли. Далі обчислюються вільні ресурси в

гетерогенній мережі та порівнюються із необхідною кількістю ресурсів для обслуговування вхідних запитів. Якщо існує необхідна кількість ресурсів, тоді відбувається перерозподіл та балансування навантаження в гетерогенній мережі, а кожному з UE надсилаються сигналізаційні дані з оптимальною БС, яка може його обслужити. В іншому випадку, аналізується пріоритетність активних сесій та вхідних запитів. Непріоритетні сесії та запити відкидаються та будуть обслужені пізніше, а пріоритетні запити обслуговуються із необхідною якістю обслуговування. Після цього через час  $\Delta t$  алгоритм виконується знову.

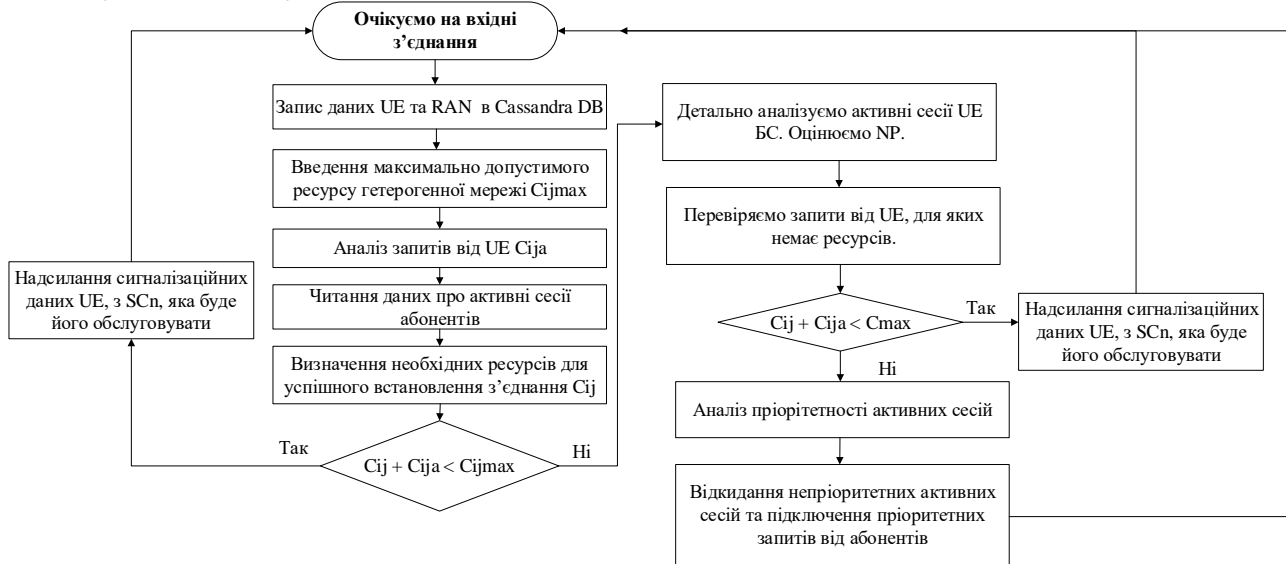


Рис. 11. Алгоритм роботи імітаційної моделі гетерогенної мережі з використанням аналізу BD

Для генерації даних та подальшого їх аналізу використовуємо розроблений математичний метод:

$$P_{\text{req.ij}}(t) = P_{\text{max.ij}}(t) - P_{\text{cur.ij}}(t),$$

$$P_{\text{max.ij}} = \text{const.} \quad (15)$$

де  $P_{\text{req.ij}}(t)$  – кількість запитів від абонентів, які можуть бути обслужені БС в конкретний момент часу,  $P_{\text{max.ij}}(t)$  – максимально допустима кількість активних сесій абонентів без погіршення якості обслуговування QoS, де  $i$  – технологія,  $j$  – тип сервісу,  $P_{\text{cur.ij}}(t)$  – поточна кількість активних сесій в момент часу  $t$ .

$$P_{\text{input.ij}}(t) = P_{\text{req.ij}}(t) + P_{\text{cur.ij}}(t), \quad (16)$$

де  $P_{\text{input.ij}}(t)$  – кількість вхідних запитів від абонентів на БС в конкретний момент часу

$$P_{\text{lost.ij}}(t) = P_{\text{req.ij}}(t) - P_{\text{req.ij}}(t), \quad (17)$$

де  $P_{\text{lost.ij}}(t)$  – кількість відкинутих запитів від абонентів для надання певного типу сервісу в момент часу  $t$ ,  $P_{\text{req.ij}}(t)$  – кількість вхідних запитів від абонентів для надання певного типу сервісу в момент часу  $t$ .

На основі отриманих від аналізу роботи мережі даних (згідно (15-17)), побудовані графіки завантаження гетерогенної мережі. Аналіз проводився для кожної технології та сервісу окремо. Для обрахунку та аналізу даних написані Jobs-скрипти на мові програмування Python для Spark.

В роботі для гнучкого управління ресурсами пропонується оцінювати пропускну здатність системи, оскільки зі зростанням кількості користувачів пропускну здатність зменшується, а це, у свою чергу, призводить до збільшення часу затримки на обслуговування та до зростання кількості втрачених даних, як показано на рис. 12.

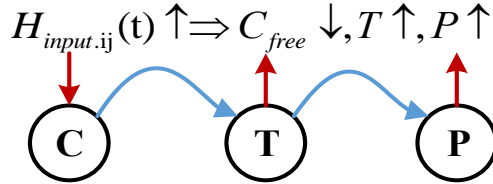


Рис. 12. Вплив параметра поточного використання пропускну здатності системи на час затримки та втрати даних

Для оптимального управління ресурсами в роботі запропоновано комплексний метод розрахунку, що дає змогу рівномірно розподіляти вхідне навантаження в гетерогенній мережі. Для визначення максимальної пропускну здатності гетерогенної мережі використовуємо формулу:

$$C_{\max} = \sum_{n=1}^5 C_{\max.ij}, \quad (18)$$

де  $C_{\max}$  – максимальна пропускну здатність мережі,  $C_{\max.ij}$  – максимальна пропускну здатність  $i$ -ої технології  $j$ -го сервісу,  $n$  – кількість мережних технологій.

$$C_{\max.ij} = P_{\max.ij} \cdot C_{QoS.j}, \quad (19)$$

де  $C_{QoS.j}$  – пропускну здатність, необхідна для надання  $j$ -го сервісу.

Після обчислення максимальної пропускну здатності мережі переходимо до розрахунку пропускну здатності, яка виділена для обслуговування поточних активних сесій.

$$C_{cur.ij} = P_{cur.ij} \cdot C_{QoS.j}, \quad (20)$$

де  $C_{cur.ij}$  – пропускну здатність  $i$ -ої технології  $j$ -го сервісу, виділена для активних сесій. При цьому:

$$C_{cur} = \sum_{n=1}^5 C_{cur.ij} = C_{cur.2G} + C_{cur.3G} + C_{cur.4G} + C_{cur.w} + C_{cur.c}, \quad (21)$$

де  $C_{cur}$  – сумарна пропускну здатність, яка виділяється гетерогенною мережею для обслуговування поточного навантаження. Переходимо до обчислення пропускну здатності, яку необхідно виділити для запитів, що поступають від абонентів:

$$C_{\text{req}} = \sum_{j=1}^6 P_{\text{req},j} \cdot C_{\text{QoS},j}, \quad (22)$$

де  $C_{\text{req}}$  – пропускна здатність, необхідна для обслуговування вхідних запитів від абонентів в гетерогенній мережній системі.

$$C_{\text{loss}} = C_{\text{max}} - (C_{\text{req}} + C_{\text{cur}}), \quad (23)$$

де  $C_{\text{loss}}$  – пропускна здатність, яка втрачається, якщо кількість запитів перевищує допустиме значення.

З метою підвищення ефективності роботи гетерогенної мережної системи в роботі запропоновано реалізацію комплексного методу оптимізації, що включає в себе:

- Статичне резервування кількості сесій, виділеної під кожен тип сервісу в гетерогенній мережі;
- Динамічне резервування кількості сесій, що дає змогу рівномірно розподілити навантаження від абонентів.
- Відкидання неперіоритетних сесій для забезпечення гарантованої якості обслуговування пріоритетним абонентам.

Для оцінювання ефективності функціонування мережі враховується нормоване значення обсягів ресурсів для кожної з технологій. Відповідно K1 – показник, який визначає сумарну продуктивність гомогенних мереж, K2 – показник, який визначає продуктивність гетерогенної мережі зі статичним резервуванням кількості сеансів для кожного типу сервісу, K3 – показник, який визначає продуктивність гетерогенної мережі з динамічним резервуванням кількості сеансів для кожного типу сервісу. На рис. 13 б представлено результат застосування комплексного методу підвищення продуктивності гетерогенної мережної системи, який дає змогу в загальному підвищити продуктивність мережі на 29%, у порівнянні із існуючими гомогенними системами.

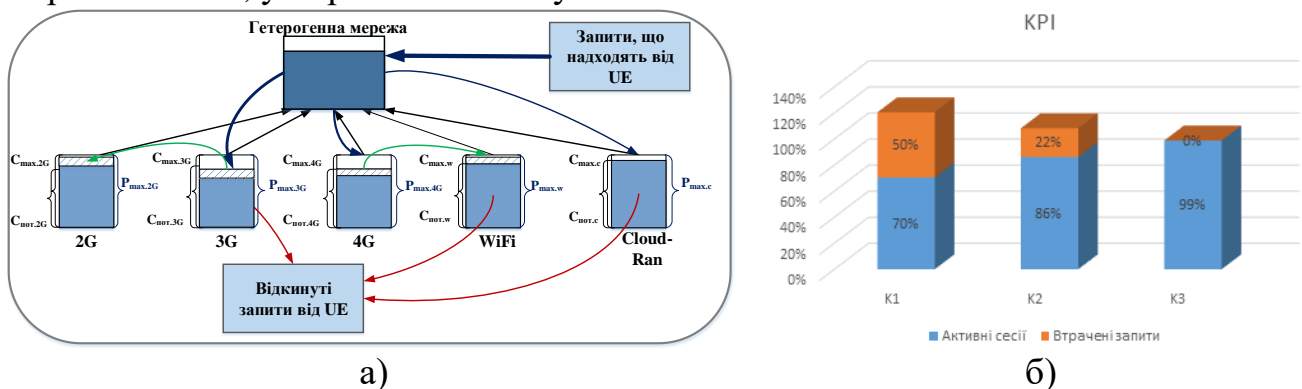


Рис. 13. Функціональна блок-схема гетерогенної мережної системи із балансуванням навантаження – а) та оцінки ефективності запропонованих рішень – б)

З рис. 13 б видно, що застосування динамічного резервування дає змогу максимально використовувати ресурси гетерогенної мережі. Також, в роботі

пропонується аналізувати пріоритетність запитів від UE (рис.14 а). При цьому пріоритетні запити будуть переходити в активні сесії, а непріоритетні – відкидатись, якщо ресурсів мережі не буде вистачати для обслуговування пріоритетних запитів (в межах активних сесій). На рис. 14 б представлено діаграму щодо роботи мережі з аналізом пріоритетності користувачів.

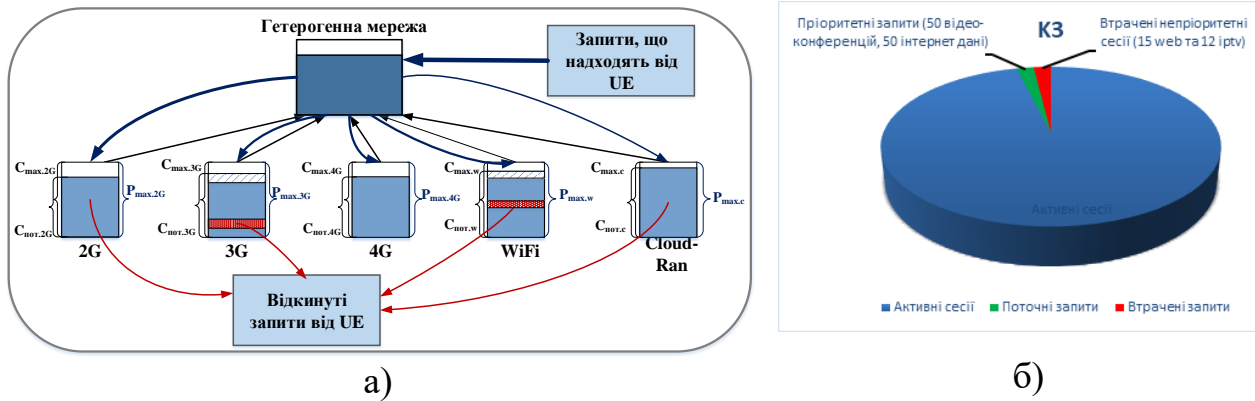


Рис. 14. Функціональна блок-схема гетерогенної мережі із оцінками пріоритетності користувачів – а) та діаграма кількості пріоритетних і непріоритетних користувачів – б)

В даному випадку гетерогенна мережа є максимально завантаженою, при цьому в момент часу  $t$  поступає 100 пріоритетних запитів від абонентів, які вже не можуть бути обслужені. Для того, щоб виділити ресурси для пріоритетних користувачів проводимо аналіз пріоритетності поточних сесій і визначаємо ті, що є непріоритетними, але займають велику кількість ресурсів. Для обслуговування 50 запитів на відео-конференцію та 50 запитів на інтернет-дані було відкинуто 15 поточних сесій (web) та 12 сесій (IPTV). Отже, нехтуючи малою кількістю непріоритетних запитів, забезпечується гарантована пропускна здатність запитам, що поступили від пріоритетних клієнтів, тим самим зменшується кількість незадоволених користувачів.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, становить розв'язок наукового завдання підвищення ефективності функціонування безпроводних гетерогенних мережних систем і покращення якості обслуговування користувачів за рахунок удосконалення методу адаптивного вибору систем радіодоступу та розроблення моделі спільного управління ресурсами з використанням технологій оброблення великих обсягів даних.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз існуючих проблем у сучасних мережах зв'язку та встановлено, що основною проблемою мереж мобільного зв'язку є орієнтованість на площу покриття, а не на користувача, а також неможливість

мережі адаптивно реагувати на сплески великих об'ємів інформації, створених абонентами.

2. Представлена математична постановка задачі вибору мережі доступу для покращення якості надання послуг мобільного зв'язку за рахунок ефективного використання ресурсів гетерогенної бездротової мережі та оптимальної процедури горизонтально-вертикального хендовера, на основі якої запропоновано метод адаптивного вибору вузла безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі шляхом застосування теорії нечітких множин, що дало змогу забезпечити глобальний доступ та безшовну мобільність між безпроводними мережами із забезпеченням необхідної якості обслуговування, а користувачеві – ефективно використовувати власний мобільний пристрій в різних типах мереж.

3. Розроблено централізований алгоритм хендовера в гетерогенних мобільних мережах на основі хмарних обчислень. Таким чином, використовуючи можливості та засоби хмарних сервісних платформ, необхідні розрахунки для оптимального вибору мережної системи забезпечується в межах кількох мілісекунд.

4. Для дослідження процесів функціонування гетерогенних мережних систем в умовах високої мобільності користувачів розроблено імітаційну модель, яка, в свою чергу, реалізує запропонований метод прийняття рішення щодо хендовера на основі механізму нечіткої логіки та оцінює якість обслуговування користувачів. Це дає змогу здійснювати налаштування великої кількості параметрів моделювання, використовуючи допоміжні математичні моделі, зокрема для опису та прогнозування процесів руху користувачів, а також ефективно використовувати ресурси операторів і надавати послуги з кращою якістю, а саме, у процесі дослідження зменшено середню затримку та джитер пакетів при обслуговуванні відео потоків реального часу до 6 разів.

5. Розроблено структурну схему етапів оптимізації безпроводних гетерогенних мереж, що дає змогу підвищити ефективність їх функціонування. Як практичний результат, у роботі реалізовано систему обробки великих об'ємів даних. На мові програмування Python розроблено скрипти, що дають змогу аналізувати великі об'єми даних та шляхом їх фільтрації і впорядкування виводити узагальнення, що дають змогу приймати інтелектуальні рішення для управління мережними ресурсами та прогнозувати поведінку гетерогенної мережної системи з використанням технологій Big Data.

6. Оцінено ефективність запропонованих рішень та досягнуто підвищення продуктивності гетерогенної мережі на 16% із використанням методу статичного резервування ресурсів мережі в порівнянні з гомогенними мережами; додатково на 13% – із використанням рівномірного розподілу ресурсів та динамічним процесом їх резервування, та у порівнянні з попереднім методом. Підвищено якість обслуговування користувачів в гетерогенній мережі за допомогою їх пріоритезації за групами.

**ОСНОВНІ РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**  
**Статті у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз**

**даних:**

1. Masiuk A. The method of adaptive selection of a wireless access network in a heterogeneous environment based on the theory of fuzzy sets / A. Masiuk, M.Klymash, I. Demydov, M. Beshley, H. Beshley, O. Panchenko // Internet of Things (IoT) and Engineering Applications (Canada). – May, 2018. – Vol. 3. – Issue 1. – P. 11-22. (іноземне наукове періодичне видання з напряму дисертації, ISSN 2371-8617 (Print) (CrossRef).

2. Strykhalyuk B. Service provisioning by using a structure stability algorithm in a virtualized data center based on cloud technology / Bogdan Strykhalyuk, Olga Shpur, Andriy Masiuk // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2014. – Volume 4, Number 1. – P. 81–86. (Index Copernicus).

3. Масюк А. Р. Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень / А. Р. Масюк, І. Б. Стрихалюк, М. В. Брич, І. О. Кагало, Г. В. Бешлей // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. — № 874. — С. 110–121. (Index Copernicus).

4. Бешлей М.І. Оцінка адекватності функціонування програмного маршрутизатора у процесі обслуговування мультимедійного трафіку // М.І. Бешлей, О.М. Селюченко, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк, Г.В. Холявка// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. - № 818. - С. 162-173. (Index Copernicus)

5. Лунтовський А. О. Етапи розвитку сучасних інфокомунікаційних сервісів та енергетична ефективність мережевих технологій / А.О. Лунтовський, П. О. Гуськов, А. Р. Масюк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. - № 796. - С. 131-139. (Index Copernicus)

**Публікації у матеріалах конференцій, що входять до складу міжнародних наукометричних баз даних:**

6. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk and M. Klymash // "2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2016. - P. 33-35. (Scopus)

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

8. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masiuk // IEEE

International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015)], (Kharkiv, October 13-15, 2015). – Kharkiv, Ukraine – P. 69-72. (Scopus)

9. Beshley M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network test bed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko and A. Masiuk // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Lviv, 2015. - P. 1-4. (Scopus)

10. Masiuk A. Common radio resource management model for heterogeneous cellular networks / Masiuk, M. Beshley, O. Lavriv and Y. Deschynskiy // IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2016), Feb. 23-26, 2016, Lviv, Ukraine. - P. 661-663. (Scopus)

11. Krasko O. Enhanced MAC design for convergence of 5G backhaul network / O. Krasko, H. Al-Zayadi, A. Masyuk and M. Klymash // 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017. - P. 213-216. (Scopus)

12. Klymash M. Concept for ensuring effective functioning of mobile communication system in heterogenous 5G infrastructure / M. Klymash, H. Beshley, A. Masiuk and I. Strykhalyuk // 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, 2017. - P. 272-274. (Scopus)

13. Masiuk A. Resource management method in LTE heterogeneous networks / A. Masiuk, H. Beshley, B. Koval and R. Basa // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 2018. - P. 1131-1134. (Scopus)

**Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:**

14. Бешлей М.І. Підвищення ефективності роботи гетерогенних мереж методом динамічного перерозподілу ресурсів між різними безпроводовими технологіями / Бешлей М.І., Селюченко М.О., Гуськов П.О., Масюк А.Р. // Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології»: матеріали науково-технічної конференції (17-20 листопада 2015 р. м.Київ), Т.2 – К: ДУТ. – 2015. – С. 49–50.

15. Бешлей М.І. Розробка і дослідження імітаційної моделі безпроводної гетерогенної мережі / Климаш М.М., Масюк А.Р. // X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції (19-22 квітня 2016р., м. Київ, Україна), 2016. - К.: НТТУ «КПІ». – С. 70-72.

16. Климаш М.М. Модель адаптивного управління радіоресурсами в безпроводних гетерогенних мережах / М.М. Климаш, М.І. Бешлей, А.Р. Масюк // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015: збірник матеріалів конференції (22-25 квітня 2015р., м. Київ, Україна), 2015 - К.: НТТУ «КПІ». – С.40-42.

17. Селюченко М.О. Багаторівневе управління ресурсами в гетерогенній мульти - операторській мережі // Селюченко М.О., Бешлей Г.В., Масюк А.Р.,



Бешлей М.І. // 1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT'2015). Conference proceedings. (29 October – 01 November, Lviv, Ukraine), 2015. – P. 125-128.

18. Климаш М.М. Аналіз властивостей вихідного потоку в системі розподілу інформації із самоподібним вхідним трафіком і обслуговуванням за порядком черги / Климаш М.М., Бугиль Б.А, Масюк А.Р. // Науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій": Програма. К.: НТУУ "КПІ", 2011. - С. 37-38.

19. Кожуров, Д. В. Модель обміну керуючою інформацією в сервісно-орієнтованій Cloud-мережі / Д.В. Кожуров, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій-2013 (СПТЕЛ-2013), 30 жовт.- 2 листоп. 2013 р. — Львів, 2013. — С. 105-108.

20. Бешлей М.І. Концепція програмно конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR / Климаш М.М., Масюк А.Р., Бешлей Г.В., Бешлей М.І. // Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (3-5 листопада 2016 р. м. Чернівці), 2016. - С. 35-36.

### АНОТАЦІЯ

Масюк А.Р. Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Львів, 2018.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню науково-технічного завдання підвищення ефективності функціонування безпроводної гетерогенної мережі та покращення якості обслуговування користувачів за рахунок удосконалення методу адаптивного вибору мережі радіодоступу і розроблення моделі спільного управління ресурсами з використанням технології оброблення великих об'ємів даних. Удосконалено метод вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин. Розроблено імітаційну модель процесу функціонування гетерогенної мережі, яка автоматизує запропонований метод вибору вузла доступу на основі теорії нечітких множин та дає змогу здійснювати налаштування великої кількості параметрів моделювання, використовуючи допоміжні математичні моделі, зокрема для опису та прогнозування процесів руху користувачів. Розроблено модель для дослідження та підвищення продуктивності роботи гетерогенної мережі із використанням системи обробки великих даних. Запропоновано використання технологій обробки великих об'ємів даних для оптимального управління ресурсами в мобільних мережах. В роботі вперше розроблено комплексний метод гнучкого управління ресурсами в гетерогенній мережі, який включає в себе: статичне резервування ресурсів для певного типу

сервісу в кожній з технологій, динамічне резервування ресурсів, аналіз пріоритетності користувачів, що дає змогу зменшити кількість незадоволених клієнтів. Даний метод дає змогу підвищити продуктивність гетерогенної мережі на 29%, в порівнянні з гомогенними мережами мобільного зв'язку.

**Ключові слова:** гетерогенна мережа, якість обслуговування, розподіл ресурсів, хмарні обчислення, нечітка логіка.

### АННОТАЦИЯ

Масюк А.Р. Модели и алгоритмы совместного управления ресурсами в беспроводных гетерогенных сетях. – На правах рукописи.

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

Диссертационная работа посвящена решению научно-технической задачи повышения эффективности функционирования беспроводной гетерогенной сети и улучшения качества обслуживания пользователей за счет совершенствования метода адаптивного выбора сети радиодоступа и разработки модели совместного управления ресурсами с использованием технологии обработки больших объемов данных. Усовершенствован метод выбора беспроводной сети доступа в гетерогенной среде на основе применения теории нечетких множеств.

Разработана имитационная модель процесса функционирования гетерогенной сети, которая автоматизирует предложенный метод выбора узла доступа на основе теории нечетких множеств и позволяет осуществлять настройку большого количества параметров моделирования, используя вспомогательные математические модели, в частности для описания и прогнозирования процессов передвижения пользователей. Разработана модель для исследования и повышения производительности работы гетерогенной сети с использованием системы обработки больших данных. Предложено использование технологий обработки больших объемов данных для оптимального управления ресурсами в мобильных сетях. В работе впервые разработан комплексный метод гибкого управления ресурсами в гетерогенной сети, включающий в себя: статическое резервирование ресурсов для определенного типа сервиса в каждой из технологий, динамическое резервирование ресурсов, анализ приоритетности пользователей, что позволяет уменьшить количество недовольных клиентов. Данный метод позволяет повысить производительность гетерогенной сети на 29%, по сравнению с гомогенными сетями мобильной связи.

**Ключевые слова:** гетерогенная сеть, качество обслуживания, распределение ресурсов, облачные вычисления, нечеткая логика.

### ABSTRACT

Masiuk A. R. Models and algorithms for common resource management in wireless heterogeneous networks. – On the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Ph. D. degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to solving the scientific and technical task of increasing the efficiency of the wireless heterogeneous network operation and enhancing the quality of service for users by improving the method of adaptive selection of radio access network and developing a model for joint management of resources using the technology for Big Data processing. The method for selecting wireless access network in a heterogeneous environment based on the theory of fuzzy sets has been improved. This method allows for a centralized, well-founded decision to carry out a horizontal-vertical handover procedure based on a group of QoS-dependent criteria and criteria that depend directly on the properties of the radio interface of the network system. The method also enables decision-making rules, depending on different telecommunication conditions and network policies. A simulation model of the heterogeneous network has been developed. The model allows to automate investigation of the proposed method of selecting an access node based on the theory of fuzzy sets. The model enables configuration of a large number of simulation parameters using auxiliary mathematical models, in particular for describing and predicting user motion processes. A model for investigation and increasing the productivity of a heterogeneous network using a system of Big Data processing has been enhanced. It is proposed to use technologies of Big Data processing for optimal management of resources in mobile networks.

For the first time, in this paper, a complex method of flexible resource management in a heterogeneous network has been developed, which includes: static reserving of resources for a certain type of service in each technology, dynamic resource reserving, analysis of priority of users, which allows to reduce the number of unsatisfied clients. This method makes it possible to increase the performance of a heterogeneous network up to 29% compared to homogeneous mobile communication networks.

**Key words:** heterogeneous network, service quality, resource allocation, cloud computing, fuzzy logic.