

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

**МАКСИМЮК ТАРАС АНДРІЙОВИЧ**



УДК 621.396

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ  
ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИМИ СИСТЕМАМИ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

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 - доктор технічних наук, професор  
**Климаш Михайло Миколайович**, Національний університет "Львівська політехніка", завідувач кафедри телекомунікацій

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор  
**Толюпа Сергій Васильович**, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації;

доктор технічних наук, доцент  
**Отрох Сергій Іванович**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем;

доктор технічних наук, професор  
**Політанський Руслан Леонідович**, Чернівецький національний університету імені Юрія Федьковича, професор кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки.

Захист дисертації відбудеться "7" травня 2021 р. о 12:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 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., проф.*



*Р. Л. Голяка*

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток мереж 5G започаткував нову еру інформатизації суспільства, з широким впровадженням інформаційних сервісів в різні сфери життєдіяльності та повсюдним їх використанням на основі розподіленої гетерогенної мережної інфраструктури. Подальший розвиток мереж мобільного зв'язку в напрямку стандартів 6G характеризуватиметься ще вищим ступенем гетерогенності телекомунікаційної інфраструктури та більш широким прикладним застосуванням. Зокрема, повсюдне використання технологій штучного інтелекту, сервісів змішаної реальності та тактильного Інтернету, стане масовим та звичним сценарієм активності абонентів, що спричинить стрімке зростання обсягів даних, які необхідно миттєво передавати між різноманітними кінцевими пристроями. Це неодмінно призведе до розширення мережної інфраструктури та появи невідомих раніше технологій та засобів мобільного зв'язку, що суттєво підвищить складність управління мережною інфраструктурою для операторів в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу. Існуючі нормативні обмеження фрагментації та ліцензування радіочастотного ресурсу в Україні та світі передбачають централізований продаж ліцензій в національному масштабі, що потребує значних фінансових інвестицій з боку операторів на побудову мережної інфраструктури по всій території держави. Враховуючи порівняно низький середній прибуток з одного абонента в Україні, при аналогічній вартості інфраструктури, оператори не в змозі підтримувати високі темпи модернізації мережі.

Тому, в короткостроковій перспективі, поточна централізована модель побудови та експлуатації мережної інфраструктури неминуче зміниться на більш гнучку децентралізовану модель із відкритим ринком радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури. Децентралізована модель стимулюватиме появу великої кількості мікро-операторів, які будуть вузько-орієнтованими на вирішення певних потреб економіки та суспільства. Проте, така модель потребує механізмів довіреного децентралізованого управління, які б дали змогу незалежно координувати використання радіочастотного ресурсу для територіально рознесених зон покриття. Зокрема, на сьогоднішній час, немає методів ліцензування радіочастотних ресурсів з поділом на окремі територіальні зони, які б дали змогу операторам розгортати регіональні мережі мобільного зв'язку в окремих містах, районах чи областях із значно меншими капітальними та експлуатаційними витратами.

З іншого боку, децентралізована модель ускладнює процес управління мережною інфраструктурою та радіочастотним ресурсом, оскільки виникає необхідність узгодження конфігурацій між великою кількістю операторів. Децентралізація систем мобільного зв'язку створює ряд викликів, які не характерні для існуючих централізованих мереж. Зокрема, існує невизначеність з точки зору мобільності абонентів між мережами мікро-операторів, враховуючи їх обмежені зони обслуговування. Динамічна зміна мережі оператора ускладнює процедуру тарифікації та забезпечення якості обслуговування для абонента. Крім того, в централізованій моделі, оператори незалежно здійснюють синтез власної коміркової інфраструктури в рознесених частотних діапазонах. При децентралізованій моделі,

усі оператори повинні координовано синтезувати фізичну коміркову інфраструктуру як одне ціле, що потребує удосконалення існуючих підходів. Також постає питання узгодження даних моніторингу мережної інфраструктури між операторами з точки зору основних показників ефективності функціонування мережі для забезпечення ефективного навчання алгоритмів управління на основі штучного інтелекту. Крім того, на сьогоднішній час немає механізмів наскрізного управління інформаційними потоками із забезпеченням вимог до якості обслуговування при передаванні трафіку різних операторів у межах єдиної транспортної мережної інфраструктури.

Таким чином, в сучасних умовах розвитку мереж мобільного зв'язку виникає **протиріччя** між потребою у *централізованій моделі* управління інфраструктурою та радіочастотними ресурсами в мережі мобільного зв'язку на основі штучного інтелекту, для забезпечення її ефективності за множиною *технічних* показників та потребою у *децентралізованій моделі* гнучкого розгортання мереж мобільного зв'язку в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури, для забезпечення її ефективності за множиною *економічних* показників.

Розв'язок даного протиріччя потребує створення нової концепції побудови децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка інтегрує методи та засоби штучного інтелекту із інфраструктурою блокчейн, що дасть змогу поєднати переваги централізованої та децентралізованої моделей побудови мережної інфраструктури, усуваючи при цьому їх характерні недоліки та обмеження.

Проблематика побудови децентралізованих гетерогенних мереж фіксованого та мобільного зв'язку широко досліджувалася у роботах провідних українських та зарубіжних вчених як М.М. Климаш, Л.Н. Беркман, С.В. Толюпа, С.І. Отрох, Р.Л. Політанський, С.В. Гаркуша, Р.С. Одарченко, І.П. Лісовий, В.М. Безрук, О.В. Лемешко, Л.С. Глоба, А.І. Семенко, В.О. Пелішок, M. Dohler, J. Gazda, L. Hanzo, M. Bennis, M. Matinmikko-Blue, P. Ahokangas, M. Jo, X. Ge, A. Luntovskyy, R. Tafazolli, T. Taleb, A. de Almeida, W. Chien, S. Kiyomoto, K. Letaief, Y. Dai, Y. Zhang, V. Sharma, D. Niyato та багатьма іншими.

Аналіз напрацювань вітчизняних та зарубіжних учених підтверджує актуальність тематики досліджень та вказує, що проблема інтелектуального автоматизованого управління децентралізованими системами мобільного зв'язку 5G/6G є актуальною в Україні та за її межами, і може бути вирішена шляхом розроблення сукупності методів управління автоматизованою мережною інфраструктурою на основі штучного інтелекту у поєднанні із смарт-контрактами на основі технології блокчейн, що в комплексі дасть змогу підвищити техніко-економічну ефективність децентралізованих систем мобільного зв'язку в національному масштабі.

Сукупність вищенаведених аспектів можна узагальнити в цілісну **науково-прикладну проблему** розроблення методів, моделей та засобів інтелектуального управління децентралізованою мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку, з метою підвищення її техніко-економічної ефективності для операторів та абонентів, в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури.

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

Дисертаційна робота виконувалась в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт «Методи побудови та моделі інформаційно – телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN – технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN), (2015-2016), № держреєстрації 0115U000444; «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G), (2017–2019 рр.), № держреєстрації 0117U004449; «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (ДБ/LTE-U), (2017–2019 рр.), № держреєстрації 0117U007177; «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» (ДБ/Блокчейн), (2020–2022 рр.), № держреєстрації 0120U100674; «Розроблення та інтеграція інформаційних і комунікаційних технологій для побудови системи моніторингу та управління міською інфраструктурою» (ДБ/Smart City), (2020–2022 рр.), № держреєстрації 0120U102193; науково-дослідних робіт Національного дослідницького фонду Республіки Корея «High Energy Efficient D2D Assisted 5G Cellular Network», (2016-2017), № реєстрації 2016K1A3A1A20006024; «Dual Subframe/SDN-based MAC Protocols for LTE-U and Resource Sharing Modelling in Coexistence with Small Cells», (2016-2017), № реєстрації 2016R1D1A1B03932149; «IoT System for Improvement of Living Conditions based on Sensitive and Psychological Analytics», (2016-2017), № реєстрації 2016M3C1B6929221; а також науково-дослідних робіт Словацького агенства досліджень та розвитку № реєстрації APVV-18-0214 та APVV-18-0368.

**Мета і завдання дослідження.** Метою представленої дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування мультиоператорних мереж мобільного зв'язку за множиною технічних та економічних критеріїв, в умовах децентралізованого розгортання інфраструктури, відкритого ринку радіочастотного ресурсу та адаптивного обслуговування абонентів без прив'язки до оператора.

В межах дисертаційних досліджень були сформульовані та розв'язані наступні завдання:

1. Аналіз існуючих методів та моделей управління гетерогенною мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку з використанням елементів штучного інтелекту.
2. Розроблення структурно-функціональної моделі децентралізованої мережі мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням на основі технології блокчейн та штучного інтелекту.
3. Розроблення системи децентралізованого моніторингу мережі мобільного зв'язку для навчання алгоритмів штучного інтелекту в умовах екзогенних та ендогенних змін в мережі.
4. Розроблення моделі токенизації активів радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури в цифровому представленні для децентралізованого обміну у мережі блокчейн.

5. Розроблення методу адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу за техніко-економічними критеріями.
6. Розроблення алгоритму моделювання мобільності абонентів з урахуванням інфраструктури середовища та індивідуальних атрибутів абонентів.
7. Розроблення методу децентралізованого інтелектуального синтезу топологічної структури мультиоператорної мережі мобільного зв'язку.
8. Розроблення моделі спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу операторами за правилами відкритого ринку.
9. Розроблення моделі спільного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу операторами з автоматизованим уникненням інтерференційних завад.
10. Розроблення методу інтелектуального управління ресурсами в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку.
11. Розроблення методів інтелектуального управління інформаційними потоками в транспортній мережній інфраструктурі для наскрізного забезпечення якості надання сервісів.
12. Розроблення прототипу децентралізованої мережі мобільного зв'язку з автоматизованим управлінням на основі штучного інтелекту та технології блокчейн.

**Об'єктом дослідження** в дисертації є процес інтелектуального управління децентралізованими мультиоператорними системами мобільного зв'язку.

**Предметом дослідження** є методи, моделі та алгоритми децентралізованого управління мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку.

**Методи дослідження.** В процесі досліджень використано методи теорії ймовірності та математичної статистики, методи та засоби штучного інтелекту, методи оптимізації, фундаментальні основи систем безпроводного зв'язку, елементи теорії ігор, основи ринкової економіки, основи правового регулювання радіочастотного ресурсу, теоретичні та практичні аспекти розподілених реєстрів, методи аналітичного, імітаційного і натурного моделювання.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. **Вперше запропоновано** структурно-функціональну модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка базується на відокремленні площини абонентів, площини мережної інфраструктури, площини операторів, площини децентралізації та площини інтелектуального управління, що дає змогу операторам автоматизовано координувати процес спільного використання мережної інфраструктури, на основі смарт-контрактів, токенизації активів та методів штучного інтелекту.

2. **Вперше запропоновано** метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу на основі інтегральної функції корисності абонента, який забезпечує повсюдне обслуговування на основі публічного ключа у мережі блокчейн, що дає змогу покращити співвідношення між якістю та вартістю сервісу для абонентів та підвищити прибутки операторів.

3. **Набув подальшого розвитку** метод проектування покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена, який, на відміну від існуючих, використовує метрику співвідношення сигнал/шум для врахування просторових характеристик зони покриття, а також фіксовані вагові коефіцієнти для існуючих

базових станцій, що дає змогу операторам децентралізовано синтезувати квазі-оптимальну топологічну структуру за множиною критеріїв ефективності, шляхом врахування статистичних даних переміщення абонентів.

4. **Вперше запропоновано** модель спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку, яка базується на торгівлі токенизованими активами радіочастотного ресурсу на основі смарт-контрактів та теорії ігор, що дає змогу підвищити середню пропускну здатність та знизити кількість відмов в обслуговуванні для абонентів, а також забезпечити прозорий розподіл ресурсів між операторами за правилами ринкової економіки, в залежності від запитів кінцевих користувачів.

5. **Вперше запропоновано** модель спільного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу операторами мобільного зв'язку на основі смарт-контрактів та кооперативної теорії ігор, що дає змогу забезпечити автоматизований справедливий розподіл ресурсів між операторами.

6. **Набув подальшого розвитку** метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку, який на відміну від відомих, використовує прогнозування часових характеристик трафіку окремих типів сервісу з використанням глибоких рекурентних нейронних мереж, що дає змогу підвищити якість обслуговування абонентів та прибутки операторів за рахунок попереднього резервування радіочастотного ресурсу.

7. **Набув подальшого розвитку** метод інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу, який на відміну від відомих, враховує взаємозв'язок між інтенсивністю трафіку в сусідніх сегментах мережі мобільного зв'язку, що дає змогу підвищити ефективність управління потоками в децентралізованих мережах мобільного зв'язку в умовах впливу екзогенних факторів.

8. **Набув подальшого розвитку** метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі, який на відміну від відомих, забезпечує узгоджене диференціювання інформаційних потоків з різними вимогами до якості сервісу на основі штучного інтелекту, що дало змогу забезпечити наскрізне управління інформаційними потоками в децентралізованих системах мобільного зв'язку національного масштабу.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у можливості їх безпосереднього застосування для підвищення техніко-економічної ефективності існуючих мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління, а також для розвитку подальших технологій та стандартів мереж мобільного зв'язку в Україні та світі. Зокрема:

1. Розроблено систему децентралізованого краудсорсингового моніторингу просторових характеристик мережі мобільного зв'язку, яка працює на основі асинхронних протоколів Інтернету речей, що дає змогу забезпечити операторам гнучкий процес збору даних із статистичною повнотою інформації для аналітичних засобів машинного навчання, не створюючи при цьому надлишкове використання ресурсів.

2. Запропоновано модель токенизації радіочастотного та інфраструктурного ресурсу на основі стандарту ERC 721, яка дає змогу оцифрувати мережні активи операторів або сторонніх стейкхолдерів з метою їх обміну, шляхом фінансових транзакцій у мережі блокчейн, що забезпечує підвищення середньої пропускної здатності для абонентів до 30% та зменшення кількості відмов в обслуговуванні до 14%, в умовах спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу.

3. Розроблено децентралізовану блокчейн-платформу для управління смарт-контрактами, яка дає змогу підвищити пропускну здатність для абонентів до 11% при незмінній вартості сервісу та збільшити прибутки операторів до 27%, при використанні адаптивного вибору оператора в режимі реального часу.

4. Запропоновано алгоритм моделювання мобільності абонентів, який використовує генеративно-змагальні нейронні мережі у поєднанні із технологіями геоінформаційних систем, що дає змогу підвищити системну спектральну ефективність мережі мобільного зв'язку на 7%, за рахунок оцінювання просторово-часових статистичних характеристик трафіку, на етапі її синтезу, з урахуванням існуючої інфраструктури середовища та індивідуальних атрибутів кінцевих абонентів.

5. Розроблено імітаційну модель фізичної інфраструктури мережі мобільного зв'язку, яка враховує тривимірну копію місцевості на основі геоінформаційної системи OpenStreetMaps та реальне розташування базових станцій на основі OpenCellID, що дає змогу на 20% підвищити ймовірність обслуговування абонентів із прийнятним співвідношенням сигнал/шум за рахунок моделювання характеристик просторового поширення сигналу, на етапі синтезу складних топологічних структур з багатопробним поширенням хвиль.

6. Розроблено алгоритм координованого прослуховування частотних каналів у неліцензійному діапазоні, який полягає у формуванні окремих груп абонентів з унікальними дискретними інтервалами прослуховування, що дає змогу знизити ймовірність одночасного передавання даних абонентами від 5 до 30%, і відповідно підвищити середні значення пропускної здатності для абонентів до 35%.

7. Розроблено алгоритм прогнозування часових характеристик трафіку з використанням рекурентних нейронних мереж, який дає змогу досягти вигаду у ефективності використання радіочастотних ресурсів мережі мобільного зв'язку, що забезпечує підвищення середньої пропускної здатності для абонентів до 7% та збільшення прибутків операторів до 19%, в умовах спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу.

8. Розроблено алгоритм мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу при здійсненні хендоверу, який дає змогу знизити обсяг надлишкового службового трафіку до 20% за рахунок прогнозування переміщення абонентів та проактивної маршрутизації трафіку.

9. Розроблено алгоритм кешування контенту з використанням обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв, який використовує передбачення запитів абонента, шляхом аналізу його активності у соціальних мережах, що дає змогу забезпечити максимальну якість сприйняття мультимедійного контенту за рахунок зниження



затримки його доставки, а також зменшення вимоги до пропускнуї здатності радіоканалу до 70%, в момент запиту контенту абонентом.

10. Розроблено прототип децентралізованої мережі мобільного зв'язку з використанням програмно-конфігурованих базових станцій стандартів LTE та 5G на основі універсальних програмно-апаратних платформ NI USRP 2900, віртуалізованих мікросервісів ядра мереж 4G та 5G на основі платформи Raspberry Pi, тестової блокчейн інфраструктури Ethereum та системи інтелектуального управління на основі хмарної інфраструктури Google Cloud.

Основні результати роботи використані та впроваджені:

– у ПАТ «УкрТелеком» та ТзОВ ВТФ «Контех» – для прогнозування часових характеристик трафіку телекомунікаційної мережі та адаптивного резервування ресурсів;

– у ТОВ «Сайпрес Семікондактор Україна» – для моделювання мобільності абонентів та інтелектуального управління діаграмою спрямованості фазованих антенних решіток;

– у ТОВ «ІнформКонсалт» – для тестування прототипу приватної мережі мобільного зв'язку на основі програмно апаратних платформ NI USRP 2900;

– у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» – для моніторингу показників ефективності функціонування телекомунікаційної мережі;

– у ТзОВ «МаксіТех» – для координації процесу розгортання мережної інфраструктури;

– у ТОВ «KeenEthics» – для тестування смарт-контрактів в інфраструктурі блокчейн;

– у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» для розроблення курсів лекцій з дисциплін «Технології мереж мобільного зв'язку» та «Проектування програмно-апаратних підсистем інформаційних систем».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях опублікованих у співавторстві авторові належать: у роботах [1,43,48] – розроблення методів та моделей побудови гетерогенної інфраструктури мережі мобільного зв'язку, [4,12,18,23,36,60,66] – розроблення імітаційної моделі, [9,37,39] – структурно-функціональні моделі децентралізованої мережі мобільного зв'язку, [11] – метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу на основі інтегральної функції корисності абонента, [6,55,61] – метод децентралізованого синтезу покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена, [44,46,52] – модель спільного використання ліцензійних радіочастотних ресурсів в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку, [25,40,45,57] – модель спільного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мобільного зв'язку на основі теорії ігор, [17,56] – метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку, [20,26,49,62] – метод інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу, [15,19,21,22,24,27,31,33,35,59] – методи та моделі інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній

інфраструктурі, [7,41,53] – система децентралізованого моніторингу на основі асинхронних протоколів Інтернету речей, [50,51,63,64,65] – алгоритм моделювання мобільності абонентів на основі генеративно-змагальних нейронних мереж, [2,3,10,32,34,38,47,54] – імітаційна модель фізичної інфраструктури мережі мобільного зв'язку, [13] – модель токенизації радіочастотного та інфраструктурного ресурсу, [14,17] – децентралізована блокчейн-платформа для управління смарт-контрактами, [28,58] – алгоритм прогнозування часових характеристик трафіку з використанням рекурентних нейронних мереж, [5,42] – алгоритм координованого прослуховування частотних каналів у неліцензійному діапазоні, [16] – алгоритм мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу при здійсненні хендоверу, [8,29] – алгоритм кешування контенту з використанням обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв, [30] – прототип децентралізованої мережі мобільного зв'язку.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати і положення дисертаційної роботи представлялися та були обговорені на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях: IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (Україна, Поляна 2013, 2015, 2019); IEEE International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (Україна, Севастополь, 2013); ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (Індонезія, Балі – 2015, В'єтнам, Да Нанг – 2016, Японія, Беппу – 2017); IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (Україна, Славське-Львів, 2014, 2016); IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (Україна, Київ – 2016, Одеса – 2018); IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (Україна, Львів, 2017, 2019); Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, (Польща, Вільга, 2017); IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (Україна, Харків, 2017, 2018); IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (Україна, Славське-Львів, 2018, 2020); IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (Україна, Львів – 2018, Франція, Метц – 2019, Німеччина, Дортмунд – 2020); IEEE International Symposium ELMAR (Хорватія, Задар, 2019); IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (Україна, Київ, 2019); IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (Румунія, Тімішоара, 2019); IEEE International Conference Radioelektronika (Словаччина, Братислава, 2020); Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій (Україна, Запоріжжя, 2016); Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій (Львів, 2012, 2013, 2014); Computer Science & Engineering (Львів, 2013), Нові технології в телекомунікаціях (Вишків, 2013); Проблеми створення, розвитку та застосування інформаційних систем спеціального призначення (Житомир, 2012); Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (Лівадія, 2012);

Наукоємні технології в інфокомунікаціях (Україна, Кам'янець-Подільський, 2019); 17-й Міжнародний радіоелектронний форум «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті» (Україна, Харків, 2013); Інфокомунікації – сучасність та майбутнє (Україна, Одеса, 2013).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 86 наукових праць, серед яких: 1 монографія [1], 1 патент [2], 12 статей у закордонних періодичних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus/Web of Science [3-14], 3 статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до інших міжнародних наукометричних [15-17], 12 статей у фахових періодичних виданнях України [18-29], 1 стаття у іншому періодичному виданні [30], 34 тези доповідей на міжнародних конференціях, які індексуються наукометричними базами Scopus/Web of Science [31-66] та 20 тез доповідей на інших конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Загальний обсяг роботи складає 435 сторінок друкарського тексту, із них 13 сторінок вступу, 304 сторінки основного тексту, 170 рисунків, 16 таблиць, список використаних джерел із 336 найменувань. Додатки містять опис розробленого програмного забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список праць автора.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** наведено основні положення дисертаційної роботи. Розкрито існуючу науково-прикладну проблему та невирішені протиріччя, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну, практичну цінність. Наведено дані про результати роботи, їх практичне значення, апробацію та впровадження.

В **першому розділі «Аналіз сучасних методів, засобів та моделей інтелектуального автоматизованого управління децентралізованими мережами мобільного зв'язку»** – проведено огляд літературних джерел за темою дисертації для визначення сучасних тенденцій розвитку технологій мереж мобільного зв'язку п'ятого та шостого покоління. На підставі аналізу останніх релевантних робіт та існуючих концепцій розвитку мереж мобільного зв'язку узагальнено проблему інтелектуального управління децентралізованою мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку для підвищення її техніко-економічної ефективності при обслуговуванні великої кількості абонентів із суперечливими вимогами до якості сервісу в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури.

Першочерговим завданням при синтезі децентралізованих систем мобільного зв'язку є чітке формулювання показників ефективності та класифікація факторів, які безпосередньо або опосередковано на них впливають. Враховуючи особливості мереж мобільного зв'язку, варто виокремити ендогенні та екзогенні фактори впливу. До ендогенних факторів можна віднести ті, які безпосередньо залежать від дій оператора мобільного зв'язку, таких як конфігурація елементів мережної інфраструктури з точки зору вибору стандартів зв'язку та режимів функціонування, а також планування ресурсів, розподіл пропускну здатності між абонентами,

пріоритезація абонентів, тощо. До екзогенних факторів відноситься фактори, на які оператор не може впливати, такі як мобільність абонентів, обмеження радіочастотного ресурсу, а також економічні та правові обмеження.

Таким чином, для забезпечення вимог до ефективності функціонування мережі, оператори мобільного зв'язку повинні оптимізувати конфігурацію своєї мережної інфраструктури з метою компенсації впливу екзогенних факторів. Особливо складним це завдання постає у контексті великої кількості операторів, які конкурують як за кінцевих абонентів, так і за обмежений радіочастотний ресурс для їх обслуговування. Це, в свою чергу, потребує нових підходів до децентралізованого розгортання мереж мобільного зв'язку та управління процесом їх функціонування.

У розділі сформовано структурно-логічну схему досліджень, яка представлена на рис. 1.

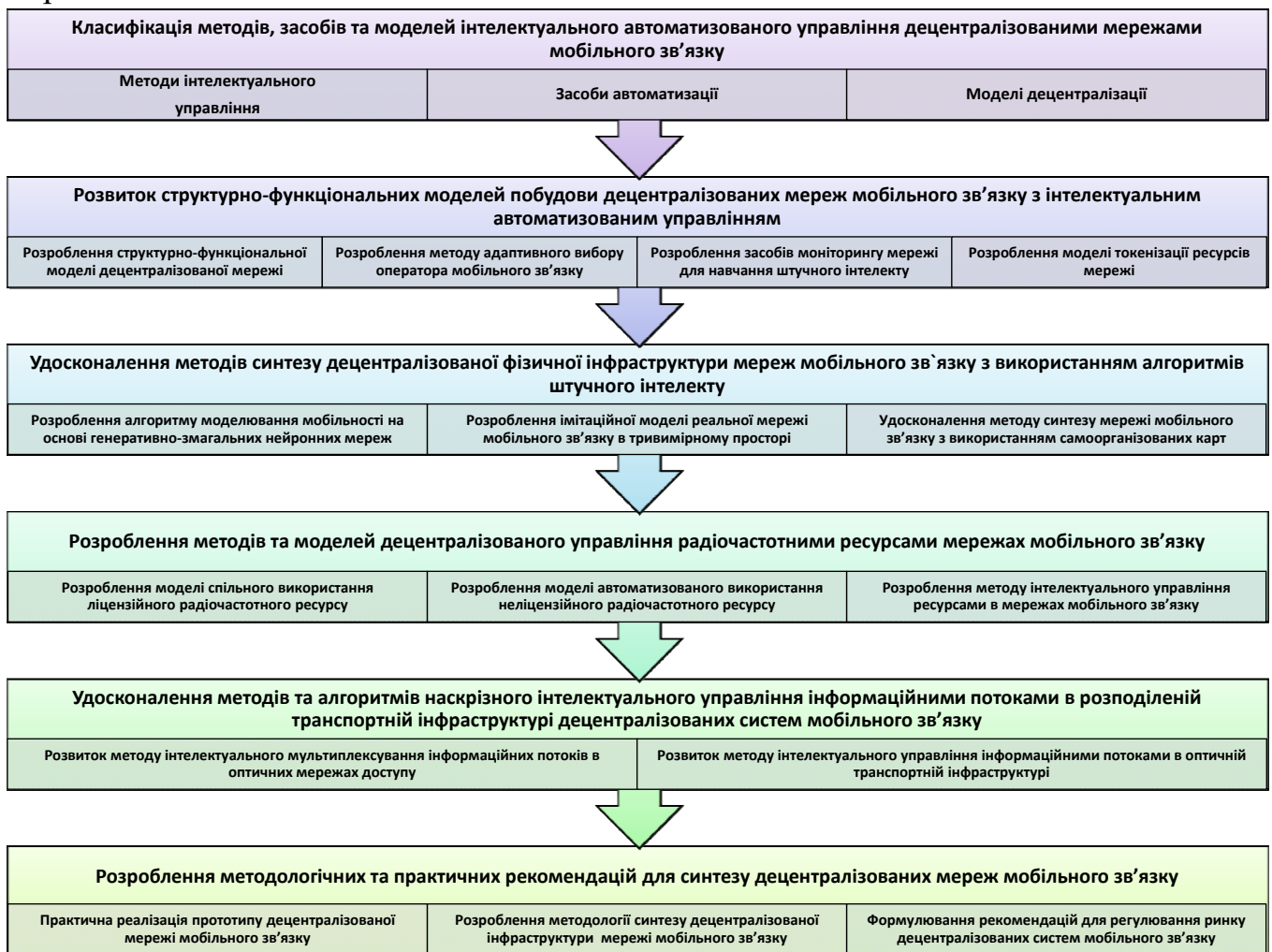


Рис. 1. Структурно-логічна схема дисертаційного дослідження.

В рамках проблематики, що розглядається у даній дисертаційній роботі необхідно виділити сукупність першочергових взаємопов'язаних проблем, вирішення яких у комплексі дасть змогу підвищити техніко-економічну ефективність децентралізованих систем мобільного зв'язку в національному масштабі:

1. Для вирішення проблеми інтелектуального управління системами мобільного зв'язку необхідно розробити сукупність методів штучного інтелекту для синтезу топологічної структури, адаптивного управління радіочастотними ресурсами ліцензійного та неліцензійного діапазонів, прогнозування інформаційних потоків у транспортних мережах та наскрізного управління якістю сервісу для абонентів.
2. Для вирішення проблеми автоматизованого управління складними розподіленими системами мобільного зв'язку необхідно розробити засоби для автоматизованої програмної конфігурації інфраструктури мереж мобільного зв'язку, з відокремленням рівнів управління та рівнів передавання даних, для забезпечення її універсальності для будь-яких стандартів безпроводного зв'язку та типів мобільних пристроїв.
3. Для забезпечення децентралізації системи мобільного зв'язку в глобальному масштабі необхідно розробити технологічні передумови для відкритого ринку мобільного зв'язку, шляхом використання розумних контрактів на основі технології блокчейн, які б дали змогу операторам спільно координувати використання радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури, в рамках регуляторних обмежень, а також забезпечити абонентам можливість адаптивного вибору оператора в режимі реального часу.

На основі систематизації усіх вищенаведених аспектів, сформовано сукупність завдань дисертаційного дослідження, окреме розв'язання яких дасть змогу досягти синергетичного ефекту підвищення техніко-економічної ефективності мультиоператорної мережі мобільного зв'язку шляхом децентралізованого інтелектуального управління інфраструктурою.

У другому розділі «Розвиток структурно-функціональних моделей побудови децентралізованих мереж мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням» запропоновано *структурно-функціональну модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку*, яка складається із площини абонентів, площини мережної інфраструктури, площини операторів, площини децентралізації та площини інтелектуального управління (рис. 2). В *площині абонентів (U)* здійснюється контроль за показниками якості та вартості сервісу.

*Площина мережної інфраструктури (N)* забезпечує обслуговування абонентів в мережі на фізичному та каналному рівнях, охоплюючи гетерогенну коміркову інфраструктуру мереж мобільного зв'язку, точки доступу Wi-Fi, з'єднання типу D2D (Device-to-Device), MTC (Machine Type Communications), V2x (Vehicle-to-Everything), Starlink, транспортні канали зв'язку, а також інфраструктуру хмарних та граничних обчислень.

В *площині операторів (O)* здійснюється розподіл ресурсів мережної інфраструктури між операторами, в залежності від їх поточних техніко-економічних стратегій, а також укладаються угоди SLA (Service Level Agreement) між операторами та абонентами.

*Площина децентралізації (D)* здійснює регулювання процесу функціонування децентралізованих систем мобільного зв'язку з використанням розподілених реєстрів даних на основі технології блокчейн. Зокрема, в даній площині

зберігаються реєстри радіочастотного ресурсу, мережної інфраструктури, операторів, абонентів та угод SLA. Блокчейн в даному контексті виконує функції нотаріального засвідчення коректності даних та прав доступу окремих абонентів чи операторів до їх зчитування або модифікації, що забезпечує технологічні передумови для автоматизованого регулювання ринку мобільного зв'язку на основі смарт-контрактів. Використання смарт-контрактів дає змогу автоматизувати процес спільного використання радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури, шляхом продажу або обміну токенизованих активів, забезпечуючи при цьому належний рівень довіри між операторами. Крім того, використання розподіленої блокчейн інфраструктури забезпечує наскрізну автентифікацію абонентів у мережі будь-якого оператора на основі публічного ключа у мережі блокчейн. В свою чергу, оператори мають змогу обмінюватись даними, для забезпечення неперервного обслуговування абонентів при хендвері абонентів між своїми мережами.

*Площина інтелектуального управління (I)* відповідає за управління процесом функціонування розподіленої мультиоператорної інфраструктури мережі мобільного зв'язку в національному або транснаціональному масштабі для забезпечення якісного зв'язку для абонентів незалежно від їх адміністративно-територіального розташування. Зокрема, в даній площині здійснюється оптимізація топологічної структури для забезпечення її максимальної ефективності, прогнозування трафіку та управління інформаційними потоками, управління доступом, мобільністю та тарифікацією абонентів, а також управління мережними слайсами та політиками якості обслуговування в децентралізованій мультиоператорній мережі. Дані функції реалізуються на основі моделей штучного інтелекту, які навчаються на основі статистики про основні параметри функціонування мережної інфраструктури. Для збору даних розроблено **систему децентралізованого краудсорсингового моніторингу** на основі протоколів HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) та MQTT (Message Queue Telemetry Transfer). Основною перевагою розробленої системи моніторингу є асинхронність та інваріантність до типу даних, що дає змогу передавати будь-яку мережну інформацію як від абонентів, так і від операторів із заданою періодичністю. Такий підхід дає змогу передавати важливу статистичну інформацію про ефективність функціонування мережі, не перевантажуючи при цьому мережу службовою інформацією. Запропонована модель передбачає чотирьох учасників ринку.

*Регулятор ринку* - це урядовий орган, який виконує функції планування та регулювання спектру в межах країни, продаж ліцензій для операторів, гармонізацію різних стандартів безпроводного зв'язку для забезпечення їх електромагнітної сумісності та багато інших аспектів. В Україні функції регулятора виконує Національна комісія, що здійснює державне регулювання в сфері зв'язку та інформатизації (НКРЗІ). У запропонованій моделі, регулятор відповідає за встановлення високорівневих політик та програмних обмежень для смарт-контрактів, які оператори не можуть порушити.

*Власниками радіочастот* є оператори мобільного зв'язку, які отримали ліцензію від регулятора у певних частотних смугах для використання в національному або регіональному масштабі. Власники радіочастот можуть

використовувати свої смуги самостійно, або здавати їх в оренду іншим операторам на основі смарт-контрактів. Наприклад, оператор може здати в оренду свої надлишкові радіочастотні ресурси іншим операторам, які їх потребують, отримавши таким чином додатковий дохід.

*Власниками інфраструктури* є оператори або сторонні стейкхолдери, які приватно володіють фізичною мережною інфраструктурою (макрокомірки, мікрокомірки, комутаційні вузли, сервери, тощо). Власники інфраструктури можуть надавати іншим операторам права на використання фізичної інфраструктури на основі смарт-контрактів. Крім того, абоненти можуть бути власниками інфраструктури, надаючи свої ресурси іншим абонентам на основі технології D2D. Таким чином, відкриваються можливості для нової бізнес-моделі, в якій сторонні стейкхолдери (наприклад будівельні компанії) мають можливість інвестувати у розвиток мережної інфраструктури з метою подальшої здачі її в оренду операторам.

*Абоненти*, які можуть адаптивно перемикатися між мережами різних операторів в режимі реального часу, або одночасно обслуговуватись у мережах різних операторів узгоджуючи угоди SLA на основі смарт-контрактів.

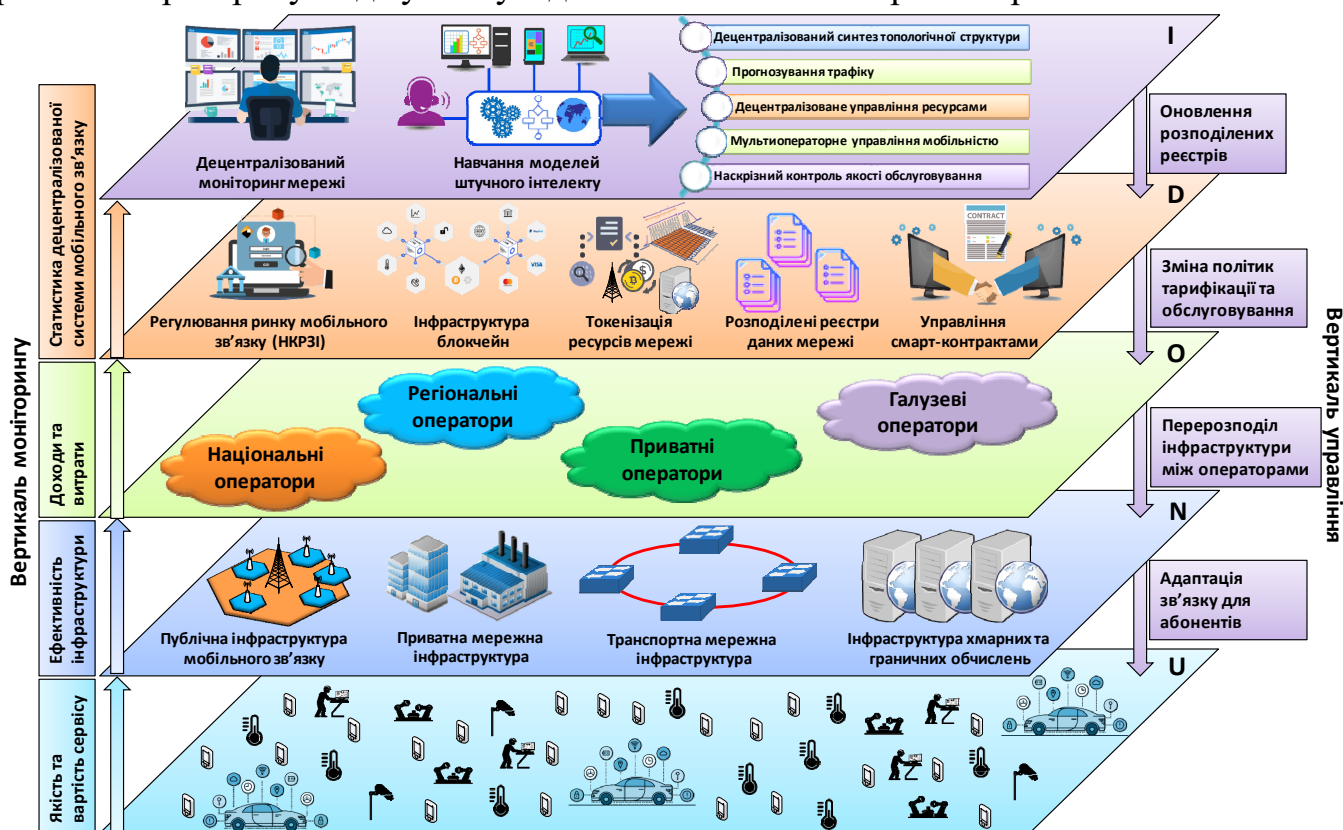


Рис. 2. Мультиплощинна архітектура мережі мультиоператорної мережі мобільного зв'язку з автоматизованим децентралізованим управлінням на основі штучного інтелекту.

Для підтримки вищенаведених взаємодій між учасниками ринку у розділі розроблено модель токенизації радіочастотних та інфраструктурних ресурсів на основі стандарту ERC 721, для їх цифрового представлення у мережі блокчейн. ERC 721 – це стандарт невзаємозамінних токенів, які є унікальними цифровими еквівалентами реальних активів.



*Токен ліцензійного радіочастотного ресурсу (LRRT – Licensed Radio Resource Token)* – це цифровий еквівалент мінімального радіочастотного ресурсу в ліцензійному діапазоні, який може торгуватись операторами. LRRT формується як хеш-функція:

$$LRRT_{i,j} = f(PRB_{ij}), \quad (1)$$

де  $PRB_{ij}$  - індекс  $j$ -го ресурсного блоку в  $i$ -му частотному діапазоні згідно із стандартизованою таблицею 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project). Оператор, який орендує LRRT, отримує тимчасову ексклюзивну ліцензію на використання відповідного радіочастотного ресурсу в межах визначеної множини базових станцій, яка встановлюється смарт-контрактом. Еквівалентна грошова вартість оренди LRRT за одиницю часу встановлюється регулятором з урахуванням особливостей зони обслуговування (міста, села, гірські райони, тощо) та розміру комірок (макрокомірки, фемтокомірки, тощо).

*Токен неліцензійного радіочастотного ресурсу (URRT – Unlicensed Radio Resource Token)* – це мінімальний цифровий еквівалент радіочастотного ресурсу в неліцензійному діапазоні який може торгуватись операторами. Оскільки немає законодавчих передумов для встановлення грошової вартості оренди неліцензійного радіочастотного ресурсу, URRT орендується операторами за квотним принципом на обмежений час в межах визначеної множини базових станцій. Аналогічно до LRRT, URRT формується як хеш-функція:

$$URRT_{i,j} = f(PRB_{ij}). \quad (2)$$

*Токен інфраструктурного ресурсу (IRT – Infrastructure Resource Token)* – це мінімальний еквівалент ресурсу мережної інфраструктури (передавач базової станції, віртуальна машина, довжина хвилі в оптичних каналах зв'язку, тощо), який може бути орендованим операторами. Вартість IRT є договірною при укладанні смарт-контракту в залежності від типу інфраструктури, місця розташування, вартості електроенергії тощо.

*Національна криптовалюта (CBDC – Central Bank Digital Currency)* - це офіційна криптовалюта, яка емітується центральним банком як еквівалент фіатної валюти країни. Абоненти використовують CBDC для оплати послуг зв'язку через мережу блокчейн. В свою чергу оператори використовують CBDC для купівлі LRRT або IRT в рамках спільного використання ресурсів.

У розділі запропоновано **метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу шляхом інтегрального оцінювання якості та вартості послуг** на основі смарт-контрактів у мережі блокчейн. Ключовою особливістю запропонованого методу є унікальна функція корисності абонента, яка аналітично виведена на основі інтегрального параметру якості сервісу –  $q$ , параметру вартості сервісу нормованого по часу –  $p$  та компромісного коефіцієнту між вартістю та якістю сервісу –  $\mu \in (0,1)$ :

$$u(q^k, p^k) = \left[ \mu(q^k - q_{\min}) + (1 - \mu)(p_{\max} - p^k) \right] \Theta(p_{\max} - p^k) \Theta(q^k - q_{\min}), \quad (3)$$



де  $k$  – індекс оператора,  $q_{\min}$  – мінімальна якість сервісу, яка задовольняє абонента,  $p_{\max}$  – максимальна вартість, яку кінцевий користувач готовий сплатити за відповідний сервіс,  $\Theta(x)$  – функція Хевісайда, яка забезпечує відкидання усіх пропозицій SLA, які не задовольняють порогові вимоги абонента. Критерій  $\mu \in (0,1)$  у виразі (3) є важливим для уникнення протиріччя, при якому сервіс з високою вартістю та якістю матиме таке ж значення функції корисності, як і сервіс з пропорційно нижчою вартістю та якістю. Це дає змогу абоненту заплатити вищу ціну при важливій відео-конференції, і водночас мінімізувати свої витрати та знизити навантаження на мережну інфраструктуру, при використанні менш критичних сервісів або при фоновому завантаженні оновлень. Алгоритм функціонування запропонованого методу адаптивного вибору оператора представлений на рис. 3,б.

**Етап 1.** Початково, абонент  $i$  встановлює з'єднання з довільною базовою станцією, і надсилає власні вимоги  $q_{\min}$  та  $p_{\max}$ , а також виміряні значення RSRP (Reference Signal Received Power) для усіх видимих gNB.

**Етап 2.** Базова станція надсилає запит сервісу абонента разом з його публічним ключем у блокчейн для перевірки смарт-контрактом.

**Етап 3.** Якщо інформація про абонента підтверджена у розподіленому реєстрі, смарт-контракт оголошує тендер між операторами, які є у зоні видимості абонента.

**Етап 4.** Оператори аналізують усі запити користувачів, визначають наявні можливості для обслуговування абонентів, враховуючи значення RSRP, доступний обсяг радіочастотного ресурсу в ліцензійному та неліцензійному діапазоні та здійснюють планування ресурсів згідно специфікації 3GPP TS 38.306.

**Етап 5.** Кожен оператор формує пропозицію SLA для абонента, яка складається із множини показників якості та вартості сервісу:

$$\langle \mathbf{S}^{(i)}, p_i \rangle = \langle [R_i, Q_i, T_i, L_i, I_i], p_i \rangle, \quad (4)$$

де  $R_i, Q_i, T_i, L_i$  – параметри швидкості передавання даних, пріоритету сервісу, затримки та втрат, які визначаються ідентифікатором 5QI (5G Quality Identifier),  $I_i$  – пріоритет абонента,  $p_i$  – вартість сервісу нормована по часу,  $i$  – індекс абонента.

**Етап 6.** Абонент розраховує значення функції корисності для кожного оператора. Для спрощення, представимо множину пропозицій SLA операторів у вигляді матриці  $\underline{\mathbf{X}} \in [J \times K]$ , де  $x_{j,k} = \underline{\mathbf{X}}(j,k)$  – значення параметру якості  $\mathbf{S}_j^{(k)}$ , яке пропонується абоненту оператором  $k$ , з вартістю  $p$ . Тоді, часткові функції корисності для абонента, записуються у вигляді матриці  $\underline{\mathbf{U}} \in [J \times K]$ , де:

$$u_{jk} = \left[ \mu^{(S_j^{(k)})} (x_{j,k} - S_j^{(\min)}) + \left( 1 - \mu^{(S_j^{(k)})} \right) (p^{(\max)} - p^{(k)}) \right] \Theta(p^{(\max)} - p^{(k)}) \Theta(x_{j,k} - S_j^{(\min)}). \quad (5)$$

Серед усіх пропозицій операторів, абонент вибирає пропозицію з найвищим значенням інтегральної функції корисності:

$$f^{(i)} = \max_{\forall k} \sum_j \underline{\mathbf{U}}(j,k). \quad (6)$$

**Етап 7.** Абонент надсилає запит на реєстрацію у мережі обраного оператора.

**Етап 8.** Оператор підтверджує реєстрацію абонента в мережі.

**Етап 9.** Оператор оновлює реєстр SLA в мережі блокчейн для запуску процесу тарифікації зв'язку для абонента.

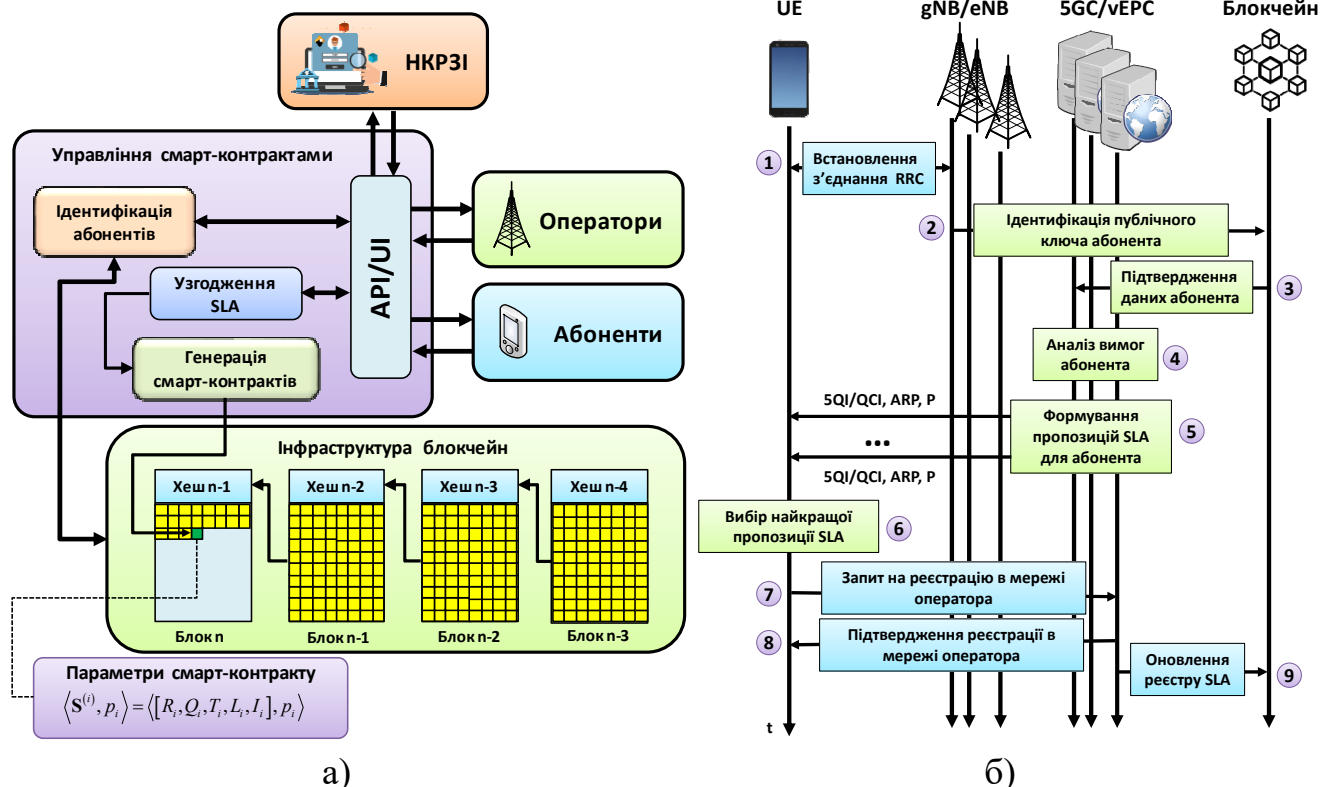


Рис. 3. Платформа для управління смарт-контрактами – а) та функціональна схема методу адаптивного вибору оператора – б).

Розроблений метод реалізований в рамках *платформи для управління смарт-контрактами* (рис.3,а), яка є складовою площини децентралізації (рис. 2). Розроблена платформа взаємодіє з операторами та абонентами через прикладний програмний інтерфейс (API), що забезпечує можливість адаптивного вибору оператора та узгодження SLA.

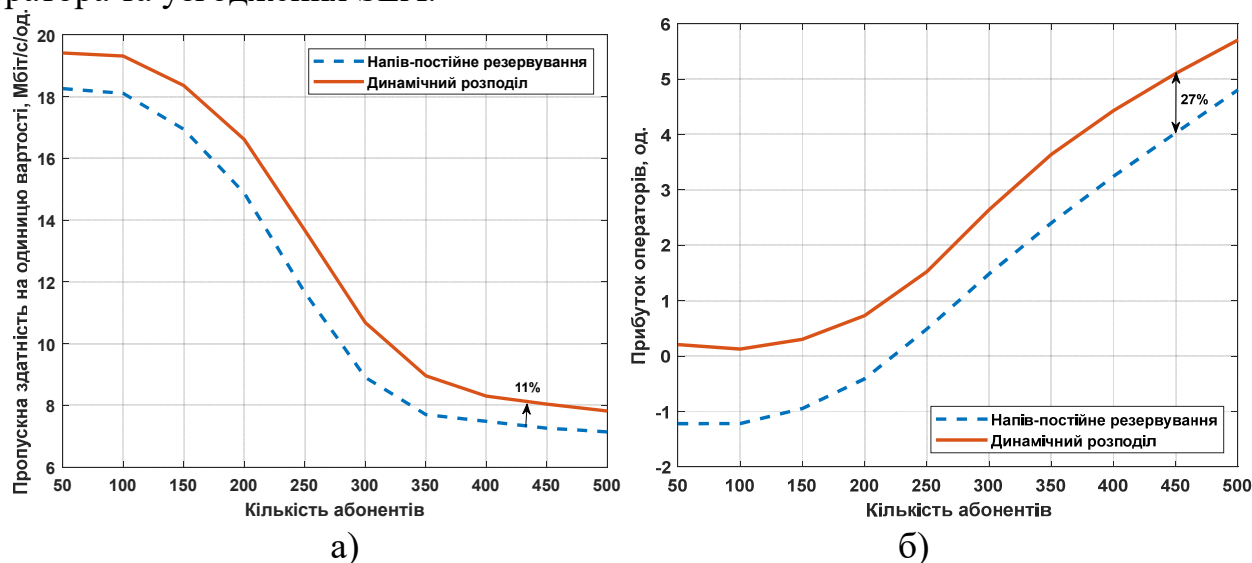


Рис. 4. Результати моделювання запропонованого методу адаптивного вибору оператора з точки зору пропускної здатності абонента за одиницю вартості – а) та прибутку операторів – б).

Усереднені результати експериментальних досліджень на основі ряду моделювань показали, що метод адаптивного вибору оператора дає змогу на 11% підвищити пропускну здатність для абонентів при незмінній вартості сервісу (рис. 4,а), а також на 27% збільшити прибутки операторів (рис. 4,б), у порівнянні із статичним розподілом абонентів.

Таким чином, у другому розділі систематизовано основні технічні аспекти реалізації децентралізованої системи автоматизованого інтелектуального управління інфраструктурою мереж мобільного зв'язку, яка є основою для усіх запропонованих методів, моделей та алгоритмів, які описуються в наступних розділах.

**Третій розділ «Методи синтезу децентралізованої фізичної інфраструктури мереж мобільного зв'язку з використанням алгоритмів штучного інтелекту»** – присвячено теоретичним та практичним аспектам синтезу багаторівневої коміркової структури мережі мобільного зв'язку. Особливістю синтезу багаторівневих коміркових структур є необхідність одночасного поєднання як повсюдного покриття на основі макрокомірок, так і нерівномірно розподіленого покриття мікрокомірок різного розміру для підвищення пікових швидкостей передавання даних для абонентів. Складність даного процесу полягає у необхідності встановлення мікрокомірок у місцях із високою густиною абонентів для максимізації сумарної пропускну здатності мережі, що потребує адекватної моделі мобільності абонентів. Для цього у роботі запропоновано *алгоритм моделювання мобільності абонентів, який використовує генеративно-змагальні нейронні мережі у поєднанні із технологіями геоінформаційних систем*. Запропонована архітектура складається із рекурентного генератора на основі архітектури LSTM (Long-Short Term Memory) та згорткового дискримінатора на основі архітектури CNN (Convolutional Neural Network). Генератор (G) відповідає за генерацію траєкторій, які повинні бути схожими на реальні траєкторії переміщення абонентів у відповідній місцевості. В свою чергу, дискримінатор (D) відповідає за класифікацію траєкторій на реальні траєкторії та траєкторії згенеровані дискримінатором. Запропонований метод працює за наступним алгоритмом.

**Етап 1.** Аналіз даних геоінформаційних систем для цільової території моделювання з використанням відкритої бібліотеки OpenStreetMaps.

**Етап 2.** Генерація навчальної вибірки шляхом моделювання періодичних та випадкових траєкторій переміщення абонентів в межах графу пішохідних та автомобільних маршрутів, який отримується із геоінформаційної системи Open Street Maps. Такий підхід, дає змогу врахувати особливості цільової зони покриття території з точки зору не лише маршрутів переміщення абонентів, але й типу району (спальний, бізнес, індустріальний або туристичний), що в свою чергу забезпечує адекватність моделі з точки зору просторово-часової локалізації абонентів.

**Етап 3.** Навчання моделі GAN з використанням згенерованого датасету.

**Крок 3.1.** Генератор формує вектор випадкових даних за нормальним законом розподілу.

**Крок 3.2.** Дискримінатор випадковим чином вибирає або вектор реальних даних із датасету, або вектор сформований генератором.

**Крок 3.3.** Дискримінатор здійснює класифікацію вхідних даних та приймає рішення про приналежність вхідного вектору до реальних або згенерованих даних.

**Крок 3.4.** Після класифікації обчислюється функція втрат дискримінатора на основі бінарної перехресної ентропії:

$$L = \log D(x) + [1 - \log(D(G(z)))] , \quad (7)$$

де  $G(x)$ ,  $D(x)$  – функції втрат генератора та дискримінатора, відповідно.

Таким чином, генератор має на меті мінімізувати відхилення згенерованих траєкторій переміщення абонентів, від тих траєкторій, які притаманні досліджуваній територіальній зоні покриття мережі. У свою чергу, дискримінатор повинен відрізнити реальні та згенеровані траєкторії.

**Крок 3.5.** В залежності від результатів дискримінатора, здійснюється обчислення функції втрат та коригування ваг  $G$  і  $D$  методом зворотного поширення помилки.

$$\begin{aligned} \nabla_{\theta_G} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \log(1 - D(G(z_i))) \\ \nabla_{\theta_D} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\log D(x_i) + \log(1 - D(G(z_i)))] \end{aligned} , \quad (8)$$

де  $\nabla_{\theta_G}, \nabla_{\theta_D}$  - операції градієнта для оновлення вагових коефіцієнтів для генератора та дискримінатора, відповідно.

**Крок 3.6.** Кроки 3.1-3.5 повторюються до досягнення мінімаксного стану рівноваги, при якому дискримінатор не зможе відрізнити згенеровані траєкторії переміщення абонентів, від реальних. Аналітично дана модель може бути представлена у формі мінімаксної задачі оптимізації:

$$\min_G \max_D (E_{x \sim p(x)} [\log D(x)] + E_{z \sim p(z)} [1 - \log(D(G(z)))]), \quad (9)$$

де  $x$  – реальна траєкторія, отримана шляхом моніторингу мережі, яка відповідає ймовірнісному розподілу  $p(x)$ ;  $z$  – траєкторія згенерована генератором, яка відповідає ймовірнісному розподілу  $p(z)$ .

**Етап 4.** Дискримінатор класифікує вектори генератора, як вектори реальних даних. Порівняння результатів генерації просторового розподілу абонентів представлено на рис. 5.

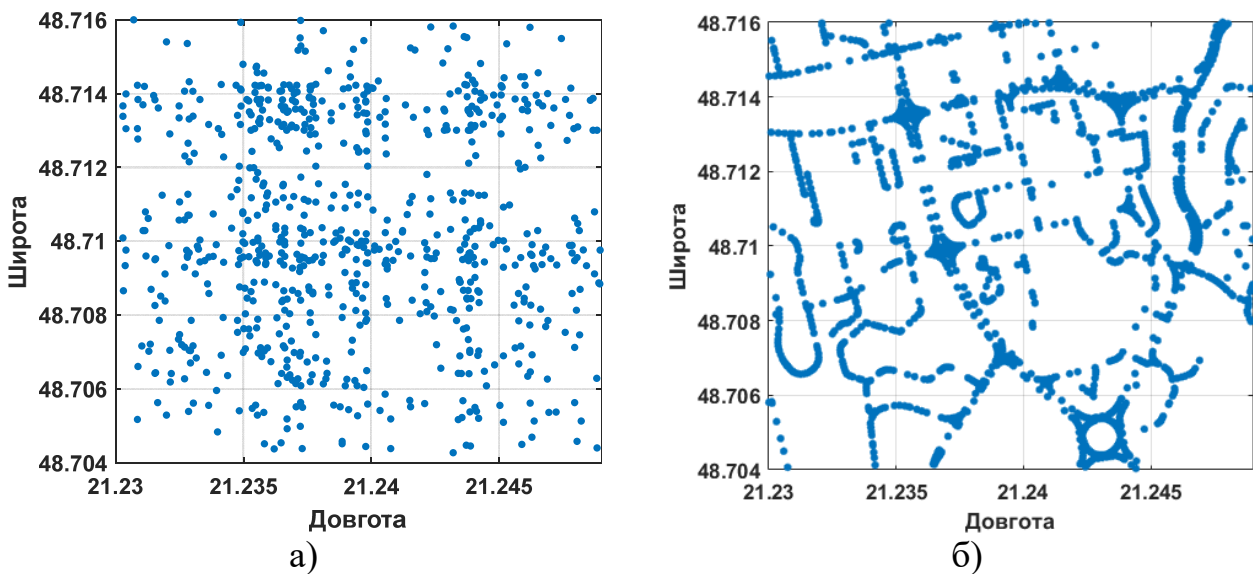


Рис. 5. Порівняння генерації розташування абонентів мобільного зв'язку з використанням Пуассонівського точкового процесу – а) та запропонованого методу на основі нейронних мереж GAN.

Для розв'язку завдання децентралізованого структурного синтезу топологічної структури в роботі розвинуто *метод проектування покриття мережі мобільного зв'язку на основі алгоритму самоорганізованих карт Кохонена (SOM – Self-Organizing Maps)*. Ключовою особливістю методу є його адаптація до децентралізованого синтезу інфраструктури багатьма операторами у середовищах з щільною забудовою та великою густиною абонентів, що має важливе значення для майбутніх бізнес-моделей операторів у мережах 6G. Нижче наведено покрокове формалізоване представлення запропонованого методу.

**Етап 1.** Аналіз даних геоінформаційної системи OpenStreetMaps та визначення інфраструктурних обмежень цільової території синтезу топологічної структури.

**Етап 2.** Перевірка існуючої топологічної структури базових станцій та їх параметрів у межах цільової території синтезу покриття на основі інформації розподілених реєстрів блокчейн.

**Етап 3.** Навчання моделі мобільності абонентів для цільової території покриття на основі *розробленого алгоритму GAN*.

**Етап 4.** Ініціалізація алгоритму SOM на основі вхідних обмежень. На даному етапі здійснюється фіксація ваг нейронів, які відповідають за позиції існуючих макро та мікрокомірок у мережі та виключення їх з множини ваг SOM, які оновлюються в процесі навчання.

**Крок 4.1.** Запуск алгоритму синтезу топологічної структури.

**Крок 4.2.** Генерація множини точок розташування абонентів для цільової території, з використанням навченої моделі GAN (див. Етап 3).

$$\{x_i, y_i\} \in \mathbb{R}^2, i \in (1, N_{UE}), \quad (10)$$

де  $N_{UE}$  - кількість абонентів.

**Крок 4.3.** Оптимізація топологічної структури мережі за алгоритмом SOM у відповідності до множини розташування абонентів.

**Крок 4.3.1.** Визначення підмножини базових станцій, які мають достатньо ресурсів для обслуговування як мінімум одного абонента:

$$\mathcal{N}_{\blacktriangleright}(t) \equiv \{\forall u; N_{RB,u}(t) > N_{UE,u}(t)\}. \quad (11)$$

де  $N_{RB,u}(t)$  – кількість ресурсних блоків, які є доступними для базової станції  $u$  у дискретний момент часу  $t$ ,  $N_{UE,u}(t)$  – кількість абонентів, які асоціюються з базовою станцією  $u$  у дискретний момент часу  $t$ .

**Крок 4.3.2.** Визначення позицій розташування базових станцій для підмножини нейронів SOM (4) в просторі  $\mathbb{R}^2$ :

$$\mathcal{W}_{\blacktriangleright}(t) \equiv \{\mathbf{w}_j(t); \forall j \in \mathcal{N}_{\blacktriangleright}(t)\}. \quad (12)$$

**Крок 4.3.3.** Вибір оптимальної базової станції серед підмножини базових станцій (4) за *розробленим критерієм забезпечення максимального значення SINR* для  $i$ -го абонента:

$$c(t) \equiv \arg \max_{w_u(t) \in \mathcal{W}_{\blacktriangleright}(t)} SINR(x(t), w_u(t)) \quad (13)$$

**Крок 4.3.4.** Обчислення нових ваг SOM  $w_i \in \mathcal{W}$  на основі *введеної параметричної функції для децентралізованого синтезу топології мережі*:

$$w_i(t + \Delta t) = \begin{cases} w_i(t), w_i(t) \in \{\text{множина фіксованих комірок}\} \\ w_i(t) + \beta_{[c(t), i]}(t)(x(t) - w_i(t)), [\text{в інших випадках}] \end{cases} \quad (14)$$

Кроки 4.3.1-4.3.4 повторюються ітераційно для усіх абонентів  $i$ .

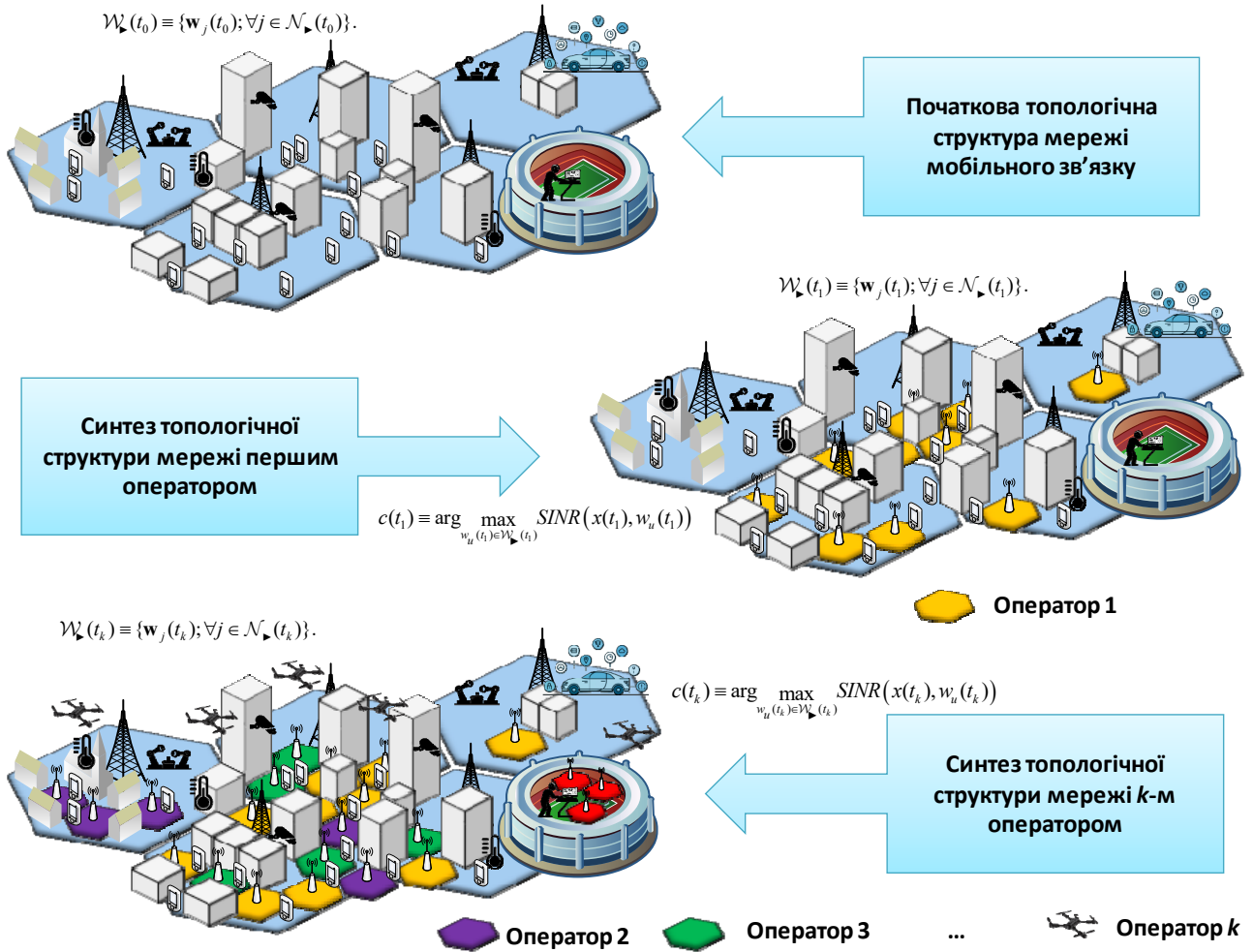


Рис. 6. Графічне представлення методу децентралізованого синтезу топологічної структури

**Крок 4.4.** Оцінювання показників ефективності функціонування мережної інфраструктури. Ймовірність відмови в обслуговуванні із заданим рівнем SINR (Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio) обчислюється шляхом порівняння всіх значень SINR, із заданою пороговою величиною. Абонент вважається таким, якому відмовлено в обслуговуванні, якщо значення SINR для його пристрою є нижчим від порогового  $SINR_{thr}$ :

$$P_{Out} = \frac{1}{N_{UE}} \sum_{i=1}^{N_{UE}} \tilde{\delta}_{thr} [SINR_i(t), SINR_{thr}], \quad (15)$$

де  $SINR_i(t)$  – SINR  $i$ -го абонента у дискретний момент часу  $t$ . Пороговий ефект виражається у вигляді параметричної функції:

$$\tilde{\delta}_{thr} [SINR, SINR_{thr}] \equiv \begin{cases} 1 & \text{if } SINR < SINR_{thr} \\ 0 & [\text{otherwise}] \end{cases} \quad (16)$$

Середня пропускна здатність абонента розраховується як сумарна кількість

ресурсних блоків, які передаються абоненту протягом однієї секунди.

$$C = \frac{1}{N_{UE}} \sum_{i=1}^{N_{UE}} C_i(t) \quad (17)$$

Системна спектральна ефективність визначається як сумарна пропускна здатність усіх абонентів фрагменту мережі, яка досягається в межах абсолютної смуги радіочастотних ресурсів  $B_{sys}$ , яка використовується для даного сегменту. При цьому, значення системної спектральної ефективності зростає пропорційно до коефіцієнту перевикористання спектру в межах фрагменту мережі:

$$S = \frac{1}{B_{sys}} \sum_{i=1}^{N_{UE}} C_i(t) \quad (18)$$

Справедливість розподілу ресурсів між абонентами визначається на основі індексу Джейна:

$$J_A = \frac{1}{N_{UE}} \frac{\left[ \sum_{s=1}^{N_{UE}} C_s(t) \right]^2}{\sum_{z=1}^{N_{UE}} C_z^2(t)} \quad (19)$$

**Крок 4.5.** Зменшення кроку навчання на основі функції інтенсивності навчання:

$$\beta_{[c(t),i]}(t) = \begin{cases} \alpha(t) & \text{при } \|n_{c(t)} - n_i\|_{Eu}^{2d} < \rho(t), \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad \rho(t) \geq 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \rho(t) = 0, n_k \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}; k \in \{1, 2, \dots\} \quad (20)$$

де  $\alpha(t)$  – монотонно спадна в часі функція, яка забезпечує нейропластичність алгоритму SOM з точки зору динаміки навчання.

**Крок 4.6.** Кроки 4.1-4.5 повторюються до досягнення стабільної топологічної структури, яка буде вказувати на квазі-оптимальне розташування комірок у цільовій зоні покриття. Таким чином, процес навчання запропонованого алгоритму синтезу топологічної структури мережі мобільного зв'язку полягає у переміщенні нейронів в межах простору допустимих карт на площині:

$$x(t) \in \mathbb{R}^2 \mapsto w_{c(t)} \in \mathcal{N}_{\blacktriangleright}(t) \quad (21)$$

З кожною наступною ітерацією переміщення окремих нейронів зменшуються до тих пір, поки вони остаточно не зафіксуються у вигляді стабільної топологічної структури  $w_{c^*} \in \mathbb{R}^2$ , яка буде вказувати на оптимальне розташування комірок у цільовій зоні покриття.

Для експериментального дослідження *розроблено імітаційну модель фізичної інфраструктури мережі мобільного зв'язку у тривимірному просторі*, враховуючи реальні розташування та розміри будівель з бази даних OpenStreetMaps, реальне розташування макрокомірок на основі даних сервісу OpenCellID, параметри мережі радіодоступу згідно рекомендацій 3GPP, а також *розробленої моделі мобільності на основі GAN*. Практичною цінністю розробленої тривимірної моделі середовища є можливість реалістичного моделювання співвідношення SINR у зонах з щільною забудовою (рис. 7,а). Результати експериментальних досліджень показали, що запропонований метод синтезу топологічної структури дає змогу підвищити ймовірність обслуговування абонентів із прийнятним співвідношенням



SINR до 20%, у порівнянні із алгоритмом Пуасонівського точкового процесу, забезпечуючи при цьому схожі результати з алгоритмом К-середніх (рис. 7,б). Порівняння з точки зору системної спектральної ефективності показує перевагу запропонованого методу над алгоритмом К-середніх та алгоритмом Пуасонівського точкового процесу на 7% та 40%, відповідно (рис. 8,а). Водночас, запропонований метод забезпечує найбільш справедливий розподіл ресурсів, переважаючи алгоритми К-середніх та Пуасонівського точкового процесу на 6% та 8%, відповідно (рис. 8,б).

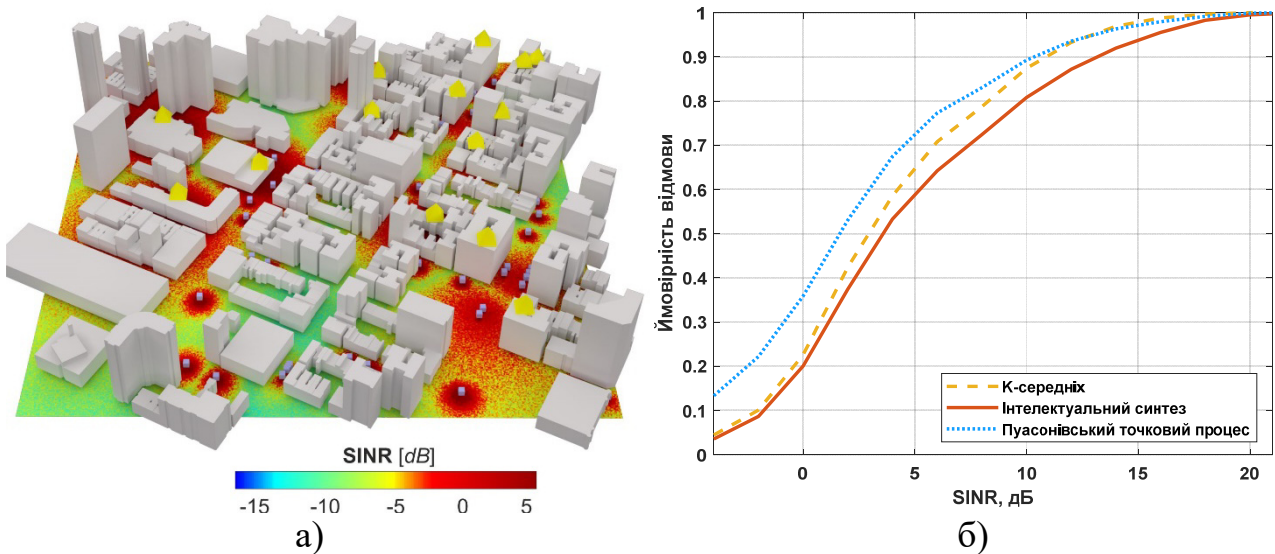


Рис. 7. Просторове представлення розробленої імітаційної моделі – (а) та залежність ймовірності відмови в обслуговуванні від співвідношення SINR – (б).

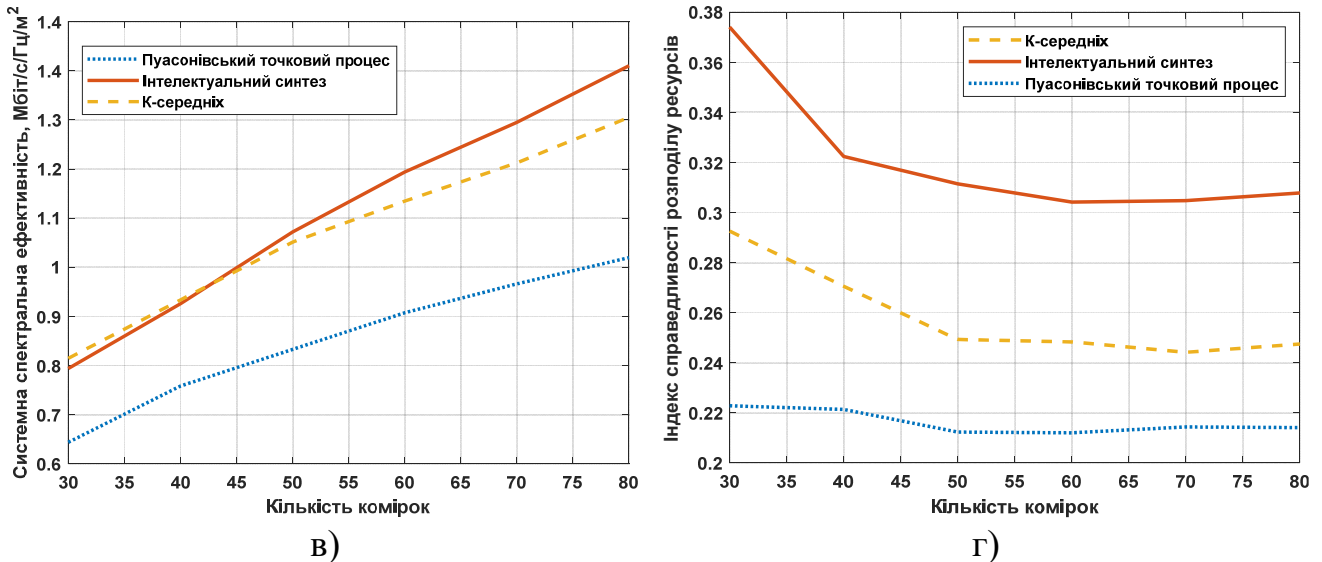


Рис. 8. Залежність системної спектральної ефективності – (а) та справедливості розподілу ресурсів між абонентами – (б) для різної кількості комірок синтезованої топологічної структури.

Підсумовуючи результати, можна зробити висновок, що синергічне поєднання запропонованих у розділі технічних рішень, забезпечує значно вищий потенціал ефективності мережі мобільного зв'язку ще на етапі її проектування, забезпечуючи при цьому узгоджений децентралізований синтез мережної інфраструктури незалежно від кількості операторів мобільного зв'язку.



В четвертому розділі «Методи та моделі децентралізованого управління радіочастотними ресурсами в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку» розв'язано завдання спільного використання радіочастотного ресурсу ліцензійного та неліцензійного діапазону конкуруючими операторами мобільного зв'язку національного та регіонального масштабу, в режимі реального часу, за правилами відкритого ринку радіочастот.

Для наближення до існуючого ринку мобільного зв'язку, запропоновано модель спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку, яка базується на торгівлі токенизованими активами ліцензійних радіочастотних з використанням елементів теорії ігор. Запропонована модель дає змогу операторам, які мають ексклюзивну ліцензію на використання радіочастотного ресурсу, здавати його в суборенду іншим операторам в режимі реального часу. Таким чином, модель передбачає конкуренцію операторів за правилами ринкової економіки таким чином, що вони не лише конкурують за надання сервісу абонентам, але й співпрацюють в рамках спільного використання радіочастотних ресурсів. Розглянемо формалізоване представлення моделі для часткового випадку двох операторів (рис. 9).

Оператор  $M$  є ексклюзивним власником ліцензії на використання радіочастотного ресурсу та інфраструктури макрокомірок. В свою чергу, оператор  $S$  є власником інфраструктури мікрокомірок, проте не має жодної ліцензії на використання радіочастотного ресурсу. Таким чином, оператор  $S$  може обслуговувати абонентів лише за умови оренди радіочастотного ресурсу в оператора  $M$ . Позначивши кількість абонентів кожного оператора як  $N^{(M)}$  та  $N^{(S)}$ , функції прибутку кожного оператора можуть бути виведені як:

$$\begin{aligned}\Phi^{(S)} &= (p^{(S)} - w)N^{(S)} \\ \Phi^{(M)} &= wN^{(S)} + p^{(M)}N^{(M)},\end{aligned}\tag{22}$$

де  $w$  – вартість оренди токена  $LRRT$  з розрахунку на одного абонента, яка фіксується регулятором,  $p^{(k)}$  – вартість сервісу оператора, яка визначається з дискретного простору цінових стратегій:

$$\mathcal{A}_R^{(k)} = \{p_0^{(k)}, p_1^{(k)}, \dots, p_{R-1}^{(k)}\}.\tag{23}$$

В свою чергу, абоненти підключаються до мережі одного з операторів, використовуючи метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку на основі інтегральної функції корисності (6). Таким чином, абоненти формують попит на ринку мобільного зв'язку, у той час як пропозиція представлена двома операторами із незалежними політиками ціноутворення.

Для синтезу ігрової моделі в нормальній формі, простір стратегій операторів пов'язується з відповідними їм виграшами:

$$\left[ \underbrace{\{S, M\}}_{\text{оператори}} \rightarrow \underbrace{\{p^S, p^M\}}_{\text{цінові стратегії}} \in \mathcal{A}_R^S \times \mathcal{A}_R^M; \underbrace{\Phi^S, \Phi^M}_{\text{виграші}} : \mathcal{A}_R^S \times \mathcal{A}_R^M \rightarrow \mathbb{R}^+ \right]\tag{24}$$

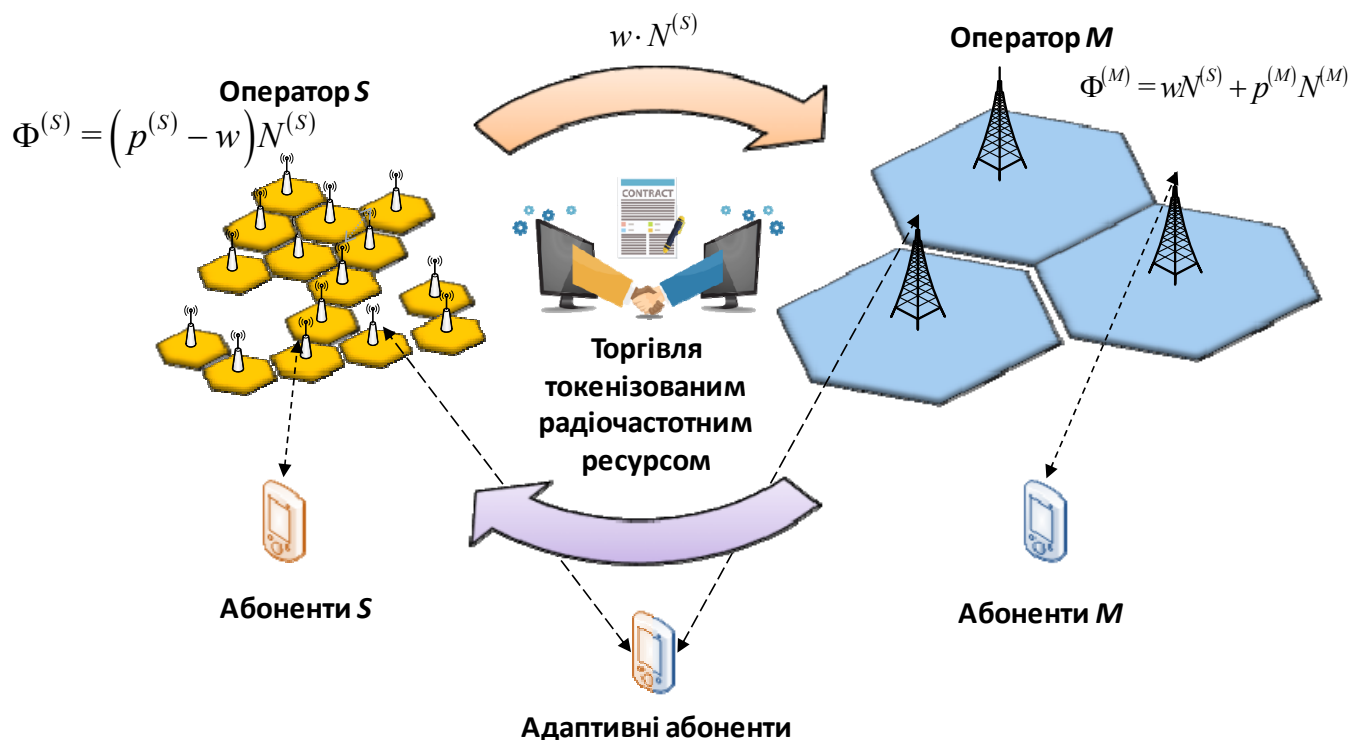


Рис. 9. Функціональна схема моделі спільного використання ліцензійних радіочастотних ресурсів в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку.

Введемо вектор ймовірностей вибору ціни оператором  $k \in \{S, M\}$  із загальної множини стратегій:

$$\pi^{(k)} = \left[ \pi_i^{(k)} \right]_{i=0}^{R-1} \quad (25)$$

В процесі еволюції, вектор ймовірностей модифікується за критерієм максимізації прибутку оператора на основі знаходження еволюційно-стабільної рівноваги. Ітераційний процес гри описаний нижче.

**Етап 1. Формування початкових умов.** Початково, вектор  $\pi^{(k)}$  встановлюється рівним  $[1/R, 1/R, \dots, 1/R]$ , що відображає однакові значення ймовірностей вибору кожної стратегії.

**Етап 2. Дії операторів.** Оператор  $k \in \{S, M\}$  випадково вибирає вартість сервісу з множини  $p^{(k)} \in \{0, 1, \dots, R-1\}$  на основі вектора ймовірностей  $\pi^{(k)}$ .

**Етап 3. Розподіл виграшів.** Кінцеві абоненти приймають рішення про підключення до одного з операторів на основі інтегральної функції корисності (6), фіксуючи таким чином вартість послуг  $l$ . Рішення кінцевих абонентів безпосередньо впливають на розподіл виграшів між операторами:

$$\Phi_l^{(k)} = f(p^{(k)}), l = p^{(k)}, p^{(k)} \in \{p^{(M)}, p^{(S)}\}, p^{(S)} \in \{0, 1, \dots, R-1\}, p^{(M)} \in \{0, 1, \dots, R-1\} \quad (26)$$

**Етап 4. Самонавчання.** Виграш оператора масштабується в інтервалі (0,1):

$$\Phi_l^{(k)} \leftarrow \left( \Phi_l^{(k)} - \min_{\forall j \neq l} \Phi_j^{(k)} \right) / \left( \max_{\forall j \neq l} \Phi_j^{(k)} - \min_{\forall j \neq l} \Phi_j^{(k)} \right). \quad (27)$$

Оператор  $k \in \{S, M\}$  оновлює відповідні компоненти вектора ймовірностей  $\pi^{(k)}$ , на основі параметру навчання  $\eta \in (0, 1)$ :

$$\begin{aligned}\pi_j^{(k)} &\leftarrow \pi_j^{(k)} - \eta \pi_j^{(k)} \Phi_l^{(k)}, \quad j \neq l, \\ \pi_l^{(k)} &\leftarrow \pi_l^{(k)} + \eta \left( \sum_{z \neq l} \pi_z^{(k)} \right) \Phi_l^{(k)},\end{aligned}\tag{28}$$

Етапи 2, 3, і 4 повторно виконуються до досягнення критерію еволюційно-стабільної рівноваги. При цьому, асимптотична складність алгоритму рівна  $\mathcal{O}(R)$ .

Для експериментального дослідження використано *імітаційну модель мережі мобільного зв'язку у тривимірному просторі*. Результати моделювання підтверджують ефективність техніко-економічної моделі торгівлі радіочастотним ресурсом, з точки зору підвищення середньої пропускної здатності для абонентів до 30% (рис. 10,а) та зменшення кількості відмов в обслуговуванні до 14% (рис. 10,б).

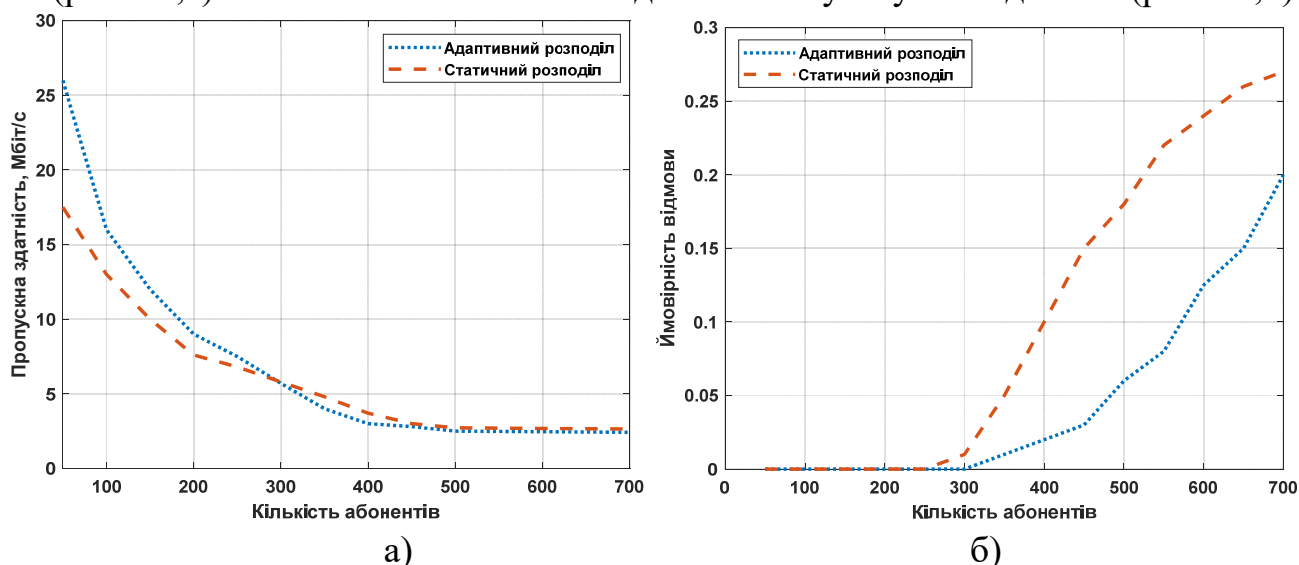


Рис. 10. Ефективність ігрової моделі спільного використання ліцензійних радіочастотних ресурсів з точки зору середньої пропускної здатності для абонентів – а) та ймовірності відмови в обслуговуванні – б).

Аналіз еволюції цінових стратегій показує, що запропонована ігрова модель дає змогу знизити вартість послуг для абонентів, при збереженні якості сервісу, або підвищити якість послуг, при збереженні їх вартості.

Для розв'язку завдання адаптивного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу в децентралізованій мережі мобільного зв'язку, запропоновано кооперативну ігрову модель оренди токенів *URRT* з адаптацією вигащів обернено-пропорційно до обсягу використання ресурсів операторами. Для визначення квоти на оренду ресурсів, операторам нараховується  $m$  утилітарних токенів стандарту ERC 20, які дають право орендувати токени *URRT*. Розглянемо модель для випадку фіксованого обсягу радіочастотного ресурсу.

**Етап 1.** Визначення кількості операторів  $n$ , які приймають участь у грі.

**Етап 2.** Розподіл утилітарних токенів порівну між операторами:

$$m_k = \frac{M}{n}, \quad k \in [1, n]\tag{29}$$

де  $m_k$  – кількість утилітарних токенів для оператора  $k$ ,  $M$  – сумарна емісія утилітарних токенів.

**Етап 3.** Оператори використовують ресурси неліцензійного діапазону надсилаючи свої утилітарні токени на адресу смарт-контракту:

$$0 \leftarrow m_k \leftarrow m_k - \omega_k \cdot t_k, k \in [1, n] \quad (30)$$

де  $\omega_k, t_k$  – вартість використання радіочастотного ресурсу за секунду та тривалість використання неліцензійного радіочастотного ресурсу в секундах, відповідно. Даний етап триває поки усі  $M$  утилітарних токенів не будуть надіслані на баланс смарт-контракту.

**Етап 4.** Смарт-контракт перерозподіляє утилітарні токени між операторами обернено-пропорційно до обсягу використаного неліцензійного радіочастотного ресурсу оновлюючи баланси операторів:

$$m_k = \frac{\sum_{i \neq k} \omega_i \cdot t_i}{n}, i, k \in [1, n] \quad (31)$$

При ітерації етапів 3, 4 оператори наближаються до стратегії рівноваги Неша:

$$\omega_k = \frac{W}{n}, k \in [1, n]. \quad (32)$$

де  $W$  – сумарний обсяг радіочастотного ресурсу неліцензійного діапазону.

Результати моделювання показують, що запропонована модель досягає рівноваги Неша за незначну кількість ітерацій, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл доступу до неліцензійного частотного діапазону незалежно від кількості конкуруючих операторів (рис. 11).

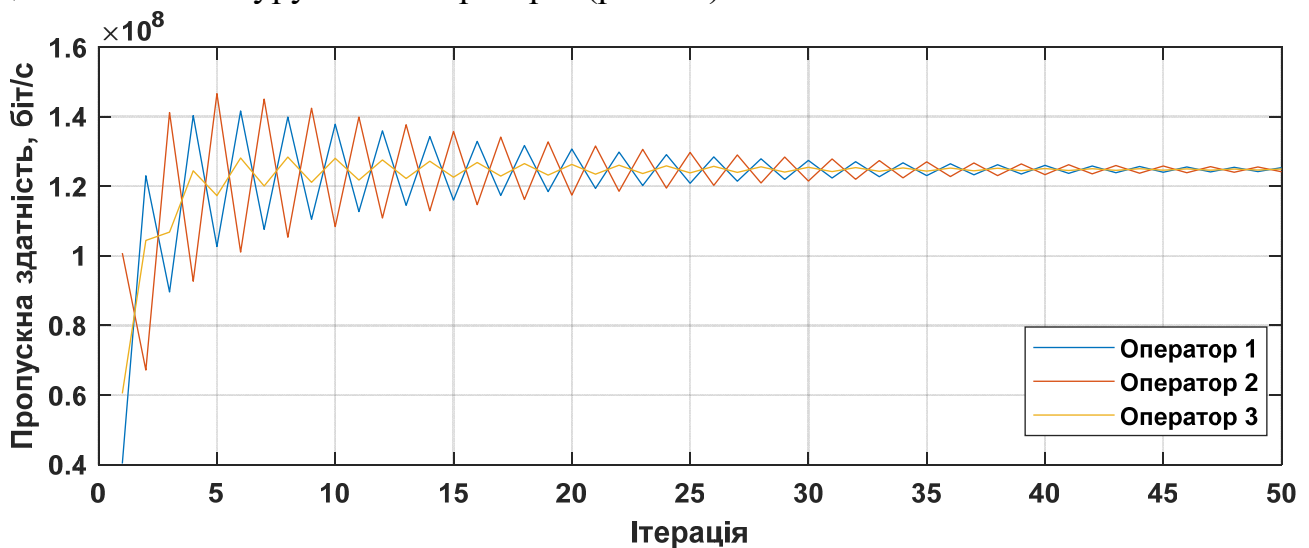


Рис. 11. Результати ігрової моделі спільного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу для 3-х операторів.

Для додаткового підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу в неліцензійному діапазоні, розроблено **алгоритм координованого прослуховування каналів на основі D2D груп**. Особливістю запропонованого методу, є використання унікальних дискретних інтервалів прослуховування, які не перетинаються між собою для кожної D2D групи. При експериментальному моделюванні запропонованого алгоритму, вдалося знизити ймовірність одночасного передавання даних абонентами в неліцензійному діапазоні від 5 до 30% в залежності

від співвідношення між кількістю одночасних абонентів та кількістю D2D груп. Це в свою чергу дало змогу знизити рівень інтерференційних завад у мережі та підвищити пікові значення пропускної здатності абонентів у неліцензійному діапазоні до 35%.

Для розв'язку завдання управління радіочастотними ресурсами в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку **розвинуто метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку, шляхом прогнозування часових характеристик трафіку з використанням рекурентних нейронних мереж**. Розроблений метод дає змогу операторам в децентралізованій мережі мобільного зв'язку попередньо резервувати необхідні обсяги радіочастотного ресурсу для обслуговування прогнозованих запитів абонентів, що збільшує їх прибутки до 19% (рис.12,б) та підвищує пропускну здатність для абонентів до 7% (рис.12,а).

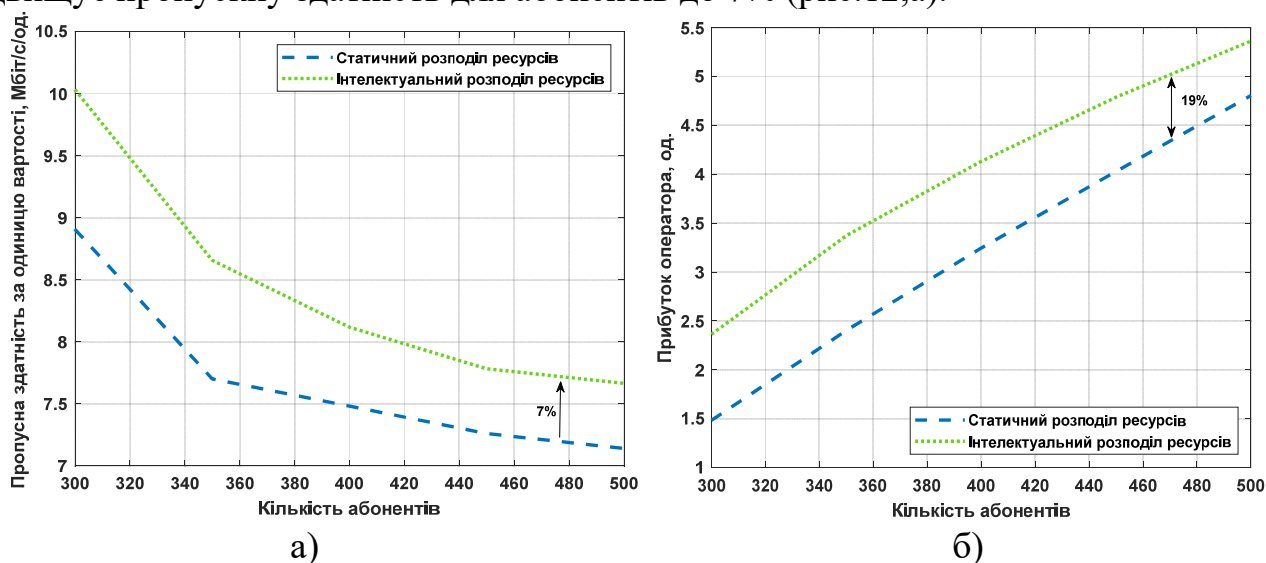


Рис. 12. Результати моделювання пропускної здатності абонента – а) та прибутку операторів – б) при інтелектуальному управлінні радіочастотними ресурсами.

Синергічне поєднання запропонованих у розділі методів автоматизованого управління ліцензійним та неліцензійним радіочастотним ресурсом в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку дає змогу забезпечити передумови для децентралізації ринку мобільного зв'язку із забезпеченням його технічної та економічної ефективності.

**П'ятий розділ «Методи та алгоритми наскрізного інтелектуального управління інформаційними потоками в розподіленій транспортній інфраструктурі децентралізованих систем мобільного зв'язку»** присвячений розв'язку завдання **інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі для наскрізного забезпечення якості надання різних типів сервісів у децентралізованих системах мобільного зв'язку**. У розділі запропоновано нову парадигму побудови розподіленої транспортної інфраструктури для децентралізованих мереж мобільного зв'язку, яка дає змогу ефективно інтегрувати сегменти мереж мобільного зв'язку із забезпеченням

наскрізного управління якістю інформаційних послуг для абонентів. Враховуючи особливості стандарту 3GPP TS 23.501, в якому передбачено, що усі функції ядра мережі 5GC (5G Core) є віртуалізованими, запропонована архітектура забезпечує першочергове підключення базових станцій до мережі Інтернет, що дає їм змогу взаємодіяти з інфраструктурою блокчейн та ядром 5GC, яке розгортається у вигляді віртуальних машин або контейнерів у інфраструктурі хмарних або граничних обчислень (рис. 13). Дана трансформація мережної інфраструктури дає змогу базовим станціям перемикатися між віртуалізованими функціями 5GC різних операторів, шляхом простих транзакцій в мережі блокчейн, що забезпечує вищу ступінь децентралізації, у порівнянні з існуючою мережною інфраструктурою.

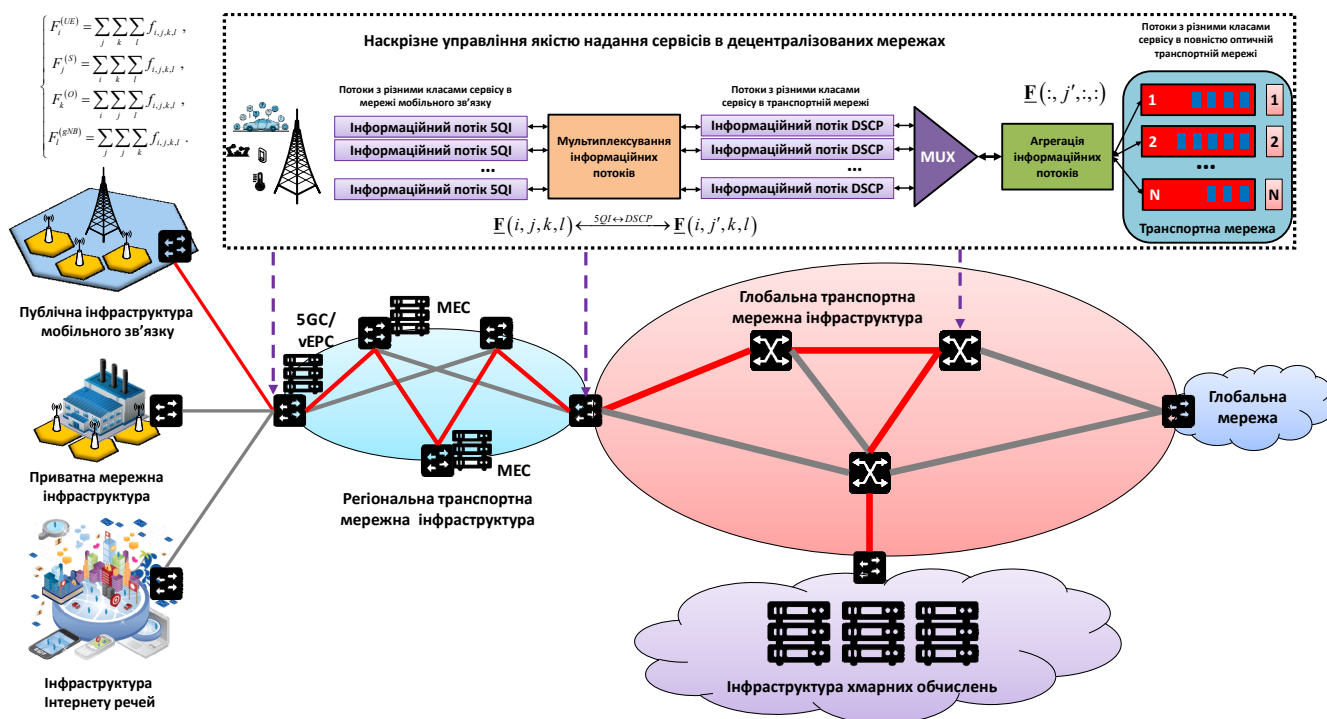


Рис. 13. Архітектура децентралізованої мережної інфраструктури мобільного зв'язку глобального масштабу.

Враховуючи новий підхід до побудови транспортної інфраструктури, у розділі удосконалено **метод інтелектуального мультимуплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу**. Ключовою особливістю даного методу є врахування взаємозв'язків між інтенсивністю трафіку сусідніх сегментів мережі мобільного зв'язку на основі глибоких рекурентних нейронних мереж. Врахування даного аспекту дало змогу підвищити точність прогнозування сумарної інтенсивності трафіку у вузлах агрегації в залежності від інтенсивності трафіку окремих локальних сегментів мережі, що в свою чергу підвищує ефективність управління потоками в регіональній транспортній мережній інфраструктурі. На основі даного методу розроблено **алгоритм мультимуплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу при здійсненні хендоверу** між сусідніми комірками децентралізованої мережі мобільного зв'язку, який дає змогу знизити обсяг надлишкового трафіку в оптичних мережах доступу до 20%, за рахунок проактивного перенаправлення трафіку абонента на основі глибоких нейронних мереж.



Для підвищення гнучкості управління інформаційними потоками, розроблено **алгоритм кешування контенту з використанням обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв**, який забезпечує максимальну якість сприйняття мультимедійного контенту за рахунок зниження затримки доставки та вимог до пропускну здатності радіоканалу *в момент його запиту абонентом*.

**Етап 1.** Клієнтський додаток Інтернет-сервісу (Youtube, Instagram, тощо) у пристрої користувача отримує сповіщення про новий актуальний контент для користувача на основі його підписок та вподобаних сторінок.

**Етап 2.** Абонентський пристрій аналізує поточну активність користувача у мережі та обсяг доступної пам'яті для кешування.

**Етап 3.** Абонентський пристрій надсилає запит сервісу кешування у блокчейн.

**Етап 4.** Кожен оператор формує пропозицію SLA для абонента, згідно параметрів, які визначені для кешування контенту.

**Етап 5.** Абонентський пристрій обирає найкращу пропозицію за критерієм (6) та розпочинає кешування контенту.

Згідно з результатами експериментальних досліджень, середня інтенсивність трафіку при кешуванні є на 70% нижчою, ніж при його перегляді в режимі квазі-реального часу, і є співмірною з фоновим трафіком пристрою.

У розділі удосконалено **метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі**, який забезпечує узгоджене диференціювання інформаційних потоків між вузлами мереж мобільного зв'язку та вузлами оптичної транспортної інфраструктури. Запропонований метод полягає у використанні комбінованої архітектури глибоких нейронних мереж, яка складається із класифікатора сервісів, який забезпечує логічне розділення інформаційних потоків та множини незалежних рекурентних нейронних мереж LSTM, кожна з яких відповідає за прогнозування трафіку окремого класу сервісу.

Для формалізації запропонованих методів представимо сумарний інформаційний потік у вузлі агрегації у матричний формі  $\underline{\mathbf{F}} \in [I \times J \times K \times L]$ , яка описує простір абонентів  $i = \{1, 2, \dots, I\}$ , сервісів  $j = \{1, 2, \dots, J\}$ , операторів  $k = \{1, 2, \dots, K\}$  та базових станцій  $l = \{1, 2, \dots, L\}$ . Найменша складова інформаційного потоку визначається як трафік абонента  $i$ , з сервісом  $j$ , через базову станцію  $l$ , яка обслуговується оператором  $k$ :

$$f_{i,j,k,l} = \underline{\mathbf{F}}(i, j, k, l). \quad (33)$$

З виразу (33) легко бачити, що простір  $[I \times J \times K \times L]$  передбачає прогнозування трафіку для будь-яких комбінацій абонентів, сервісів, базових станцій та операторів у децентралізованій мережі.

На основі прогнозованих значень сумарних інформаційних потоків приймаються відповідні рішення стосовно управління трафіком у вузлах транспортної мережної інфраструктури.

Зокрема, в сегменті мобільного зв'язку, сумарні інформаційні потоки обчислюються як:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_i^{(UE)} = \sum_j \sum_k \sum_l f_{i,j,k,l} - \text{для абонента } i; \\ F_j^{(S)} = \sum_i \sum_k \sum_l f_{i,j,k,l} - \text{для сервісу } j; \\ F_k^{(O)} = \sum_i \sum_j \sum_l f_{i,j,k,l} - \text{для оператора } k; \\ F_l^{(gNB)} = \sum_j \sum_k \sum_i f_{i,j,k,l} - \text{для базової станції } l. \end{array} \right. \quad (34)$$

Зокрема,  $F^{(O)}$  використовується для резервування ресурсів оператором на рівні каналів зв'язку між власними базовими станціями та віртуалізованим ядром в інфраструктурі граничних обчислень;  $F^{(gNB)}$  – для визначення взаємозалежності трафіку між сусідніми комірками та мультиплексування інформаційних потоків при здійсненні хендоверу;  $F^{(UE)}$  – для управління сервісами та кешування контенту на рівні абонентського пристрою;  $F^{(S)}$  – для управління мережними слайсами та наскрізного забезпечення якості передавання інформаційних потоків.

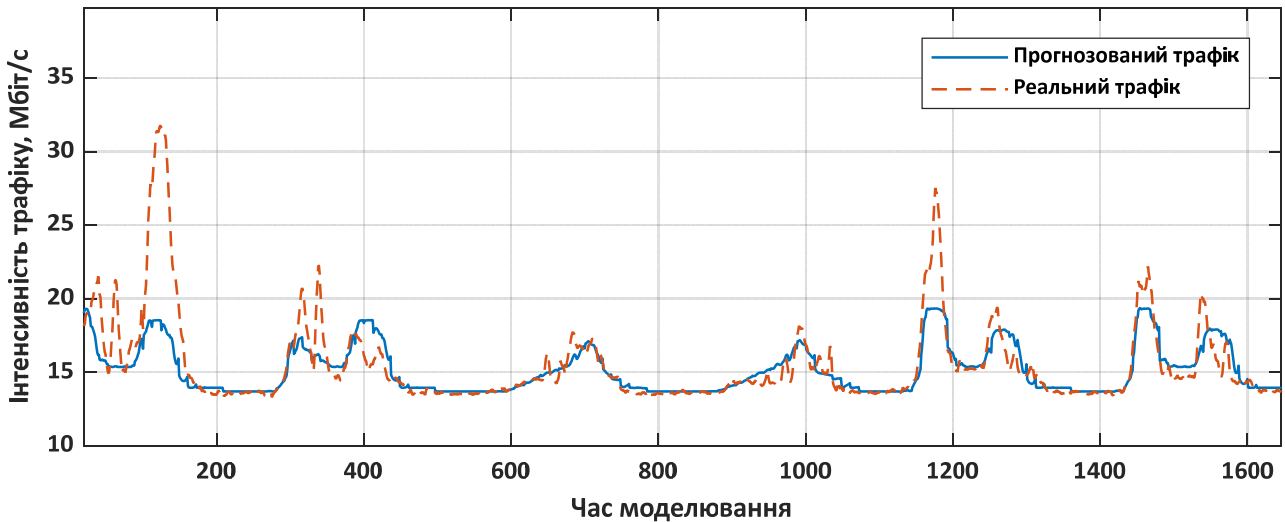


Рис. 14. Результати прогнозування трафіку для методу інтелектуального управління інформаційними потоками.

При агрегації інформаційних потоків з мереж мобільного зв'язку у транспортній мережі, класи сервісу 5QI трансформуються у класи DSCP (DiffServ Code Point):

$$\underline{F}(i, j, k, l) \xrightarrow{5QI \leftrightarrow DSCP} \underline{F}(i, j', k, l), \quad (35)$$

де  $j' = \{1, 2, \dots, J'\}$  – множина значень ідентифікатора DSCP. Після цього, здійснюється формування агрегованих потоків  $\underline{F}(:, j', :, :)$ , та прогнозування сумарних обсягів трафіку  $F_j^{(S)}$  з використанням рекурентних нейронних мереж.

Згідно з результатами експериментальних досліджень, запропонований метод дає змогу досягти 90% точності прогнозування трафіку мережі (рис. 14), що дає змогу адаптивно перерозподіляти ресурси оптичних транспортних мереж між мережними слайсами.



**Шостий розділ «Методологічні та практичні аспекти синтезу децентралізованої інфраструктури мереж мобільного зв'язку»** присвячено розробленню методологічних та практичних рекомендацій для синтезу децентралізованої інфраструктури мереж мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням.

Зокрема, запропоновано ряд стратегій розгортання приватних мереж мобільного зв'язку. В загальному їх можна класифікувати на дві основні групи: приватні та орендовані в оператора. У випадку приватної мережі, стейкхолдери розгортають автономну мережу, яка є незалежною від публічних мереж операторів мобільного зв'язку. Такий підхід дає змогу повністю відокремити процес управління ресурсами та інфраструктурою та забезпечити підприємствам високу гнучкість з точки зору оптимізації мережної інфраструктури під власні бізнес-процеси. Крім того, технології автоматизації мережі, такі як самовідновлення на основі елементів штучного інтелекту, дає змогу приватним операторам мінімізувати втручання в інфраструктуру для відновлення несправностей та масштабування ресурсів, що значно зменшує операційне навантаження ІТ-персоналу на підприємстві. Таким чином, приватна мережа поєднує в собі найсучасніші технології зв'язку, обчислень та автоматизації для ефективної цифрової трансформації підприємств та секторів економіки. Проте, у такому випадку, підприємства повинні отримати права на використання радіочастотних ресурсів, або використовувати лише неліцензійні частотні діапазони. Для цього, підприємствам необхідно реєструватися, як віртуальним операторам мобільного зв'язку в системі блокчейн, щоб мати доступ до децентралізованого ринку радіочастотних ресурсів.

Для випадку орендованої інфраструктури мережі, стейкхолдери можуть укладати угоди з операторами мобільного зв'язку для локального розгортання інфраструктури на підприємстві та її інтеграції з мережею ядра оператора. В такому варіанті, передбачається функціонування розгорнутої мережі 5G разом з публічною 5G мережею оператора в спільному частотному діапазоні. Така модель потребує управління ресурсами в мережі оператора для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування відповідно до угоди SLA з підприємством. Варто зазначити, що оператор в такому випадку повинен резервувати необхідні обсяги радіочастотних ресурсів шляхом здійснення відповідних транзакцій в мережі блокчейн. Крім того, в залежності від масштабів корпоративної мережі, підприємства можуть одночасно укладати угоди з різними операторами для підтримки різноманітних внутрішніх процесів. Наприклад, оператор А може надавати сервіси широкосмугового доступу до мережі Інтернет та інфраструктури граничних обчислень, у той час як оператор Б забезпечуватиме інфраструктуру для Інтернету речей та Індустрії 4.0.

Розроблено *прототип децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі програмно апаратних платформ NI USRP 2900*, які використовувалися у якості віддалених програмно-конфігурованих базових станцій стандартів LTE (3GPP Release 14) та 5G (3GPP Release 16) (рис. 15). Для реалізації системи децентралізованого управління мережною інфраструктурою, розгорнуто програмні компоненти віртуалізованих функцій ядра мереж vEPC (Virtual Evolved Packet Core)/5GC, використовуючи хмарну інфраструктуру Google Cloud та сервіс Google

Kubernetes Engine для розгортання віртуалізованих мережних функцій, а також блокчейн-інфраструктуру для управління смарт-контрактами.

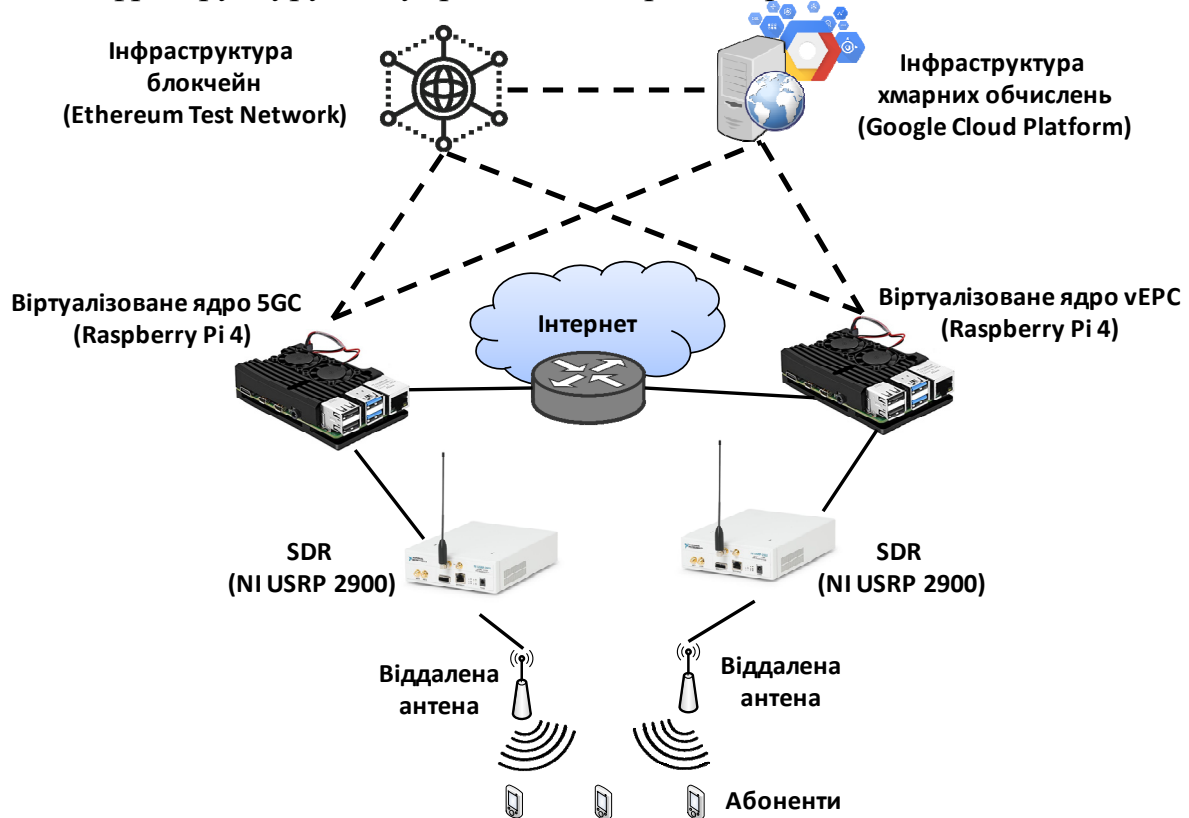


Рис.15. Структурна схема прототипу децентралізованої мережі мобільного зв'язку.

Для реалізації алгоритмів на основі нейронних мереж в запропонованій системі розгортається фреймворк TensorFlow, який складається із набору програмних бібліотек для машинного навчання та вирішення завдань побудови і тренування нейронної мережі. Основний інтерфейс для роботи з даною бібліотекою реалізований на мові Python.

Для інтеграції розробленої системи із інфраструктурою блокчейн використано тестову мережу Ethereum, в рамках якої здійснювалась реалізація смарт-контрактів для вирішення завдань децентралізованого управління мережною інфраструктурою. Крім того, в роботі проведено порівняння різних блокчейн інфраструктур та алгоритмів консенсусу з точки зору часу швидкості обробки транзакцій, а також наведено практичні рекомендації стосовно вибору оптимальних інфраструктур розподілених реєстрів, в залежності від вимог окремих смарт-контрактів.

Розглянуто основні принципи правового регулювання ринку мобільного зв'язку. Варто зазначити, що на сьогоднішній час сфера правового регулювання технології блокчейн та штучного інтелекту знаходиться на етапі свого становлення. Зокрема, смарт-контракт на практиці не має жодної юридичної сили з точки зору чинного законодавства, а є лише фрагментом програмного забезпечення, яке інтегроване в рамках автоматизованої системи управління децентралізованими системами мобільного зв'язку. У розділі сформовано основні рекомендації стосовно правового регулювання технології блокчейн для надання їй чіткого статусу з точки зору управління відкритим ринком мобільного зв'язку.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему розроблення методів, моделей та засобів інтелектуального управління децентралізованою мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку, з метою підвищення її техніко-економічної ефективності для операторів та абонентів, в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури.

1. Систематизовано основні аспекти інтелектуального управління, автоматизації та децентралізації мультиоператорної інфраструктури мереж мобільного зв'язку. Сформовано сукупність окремих завдань, розв'язок яких дав змогу досягти синергетичного ефекту підвищення ефективності функціонування мультиоператорних мереж мобільного зв'язку за множиною технічних та економічних критеріїв, в умовах децентралізованого розгортання інфраструктури, відкритого ринку радіочастотного ресурсу та адаптивного обслуговування абонентів без прив'язки до оператора.

2. Запропоновано структурно-функціональну модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка базується на відокремленні площини абонентів, площини мережної інфраструктури, площини операторів, площини децентралізації та площини інтелектуального управління, що дало змогу операторам автоматизовано координувати процес спільного використання мережної інфраструктури, на основі смарт-контрактів, токенизації активів та методів штучного інтелекту. В рамках моделі визначено основних учасників ринку мобільного зв'язку, які взаємодіють між собою, а саме: регулятор, власники радіочастот, власники інфраструктури та абоненти.

3. Розроблено систему децентралізованого краудсорсингового моніторингу просторових характеристик мережі мобільного зв'язку на основі протоколів HTTP та MQTT, що дає змогу передавати будь-яку мережну інформацію як від абонентів, так і від операторів із заданою періодичністю. Розроблена система дає змогу передавати важливу статистичну інформацію, не перевантажуючи при цьому мережу та забезпечує операторам гнучкий процес збору даних із статистичною повнотою інформації для аналітичних засобів машинного навчання.

4. Запропоновано модель токенизації радіочастотного та інфраструктурного ресурсу на основі стандарту невзаємозамінних токенів ERC 721, що дало змогу оцифрувати мережні активи операторів та сторонніх стейкхолдерів, для їх подальшого обміну шляхом фінансових транзакцій у мережі блокчейн. Зокрема, запропоновано токен LRRT – як цифровий еквівалент мінімального ліцензійного радіочастотного ресурсу, токен URRT – як цифровий еквівалент неліцензійного радіочастотного ресурсу, токен IRT – як цифровий еквівалент ресурсів мережної інфраструктури, таких як базова станція, віртуальна машина, довжина хвилі у волоконно-оптичних каналах зв'язку, тощо. Для торгівлі токенами використовується національна криптовалюта CBDC, яка емітується центральним банком як еквівалент фіатної валюти.

5. Розроблено метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу на основі смарт-контрактів у мережі блокчейн. Ключовою особливістю запропонованого методу є унікальна функція корисності абонента, яка

аналітично виведена на основі інтегрального параметру якості сервісу, параметру вартості сервісу та компромісного коефіцієнту між ними. Розроблений метод функціонує на основі децентралізованої блокчейн-платформи управління смарт-контрактами, що забезпечує повсюдне обслуговування абонентів з використанням їх публічних ключів у мережі блокчейн. Такий підхід дав змогу підвищити пропускну здатність для абонентів до 11% при незмінній вартості сервісу, а також збільшити прибутки операторів до 27%.

6. Запропоновано алгоритм моделювання мобільності абонентів, який використовує генеративно-змагальні нейронні мережі. Особливістю запропонованого алгоритму, є можливість адаптації до довільного середовища та індивідуальних атрибутів кінцевих абонентів. Для моделювання просторово-часових статистичних характеристик трафіку, запропонований алгоритм використовує геоінформаційну систему OpenStreetMaps, яка дає змогу представити досліджувану територію у вигляді графа маршрутів, на основі якого генеруються траєкторії переміщення абонентів. Такий підхід, дав змогу врахувати особливості цільової зони покриття території з точки зору не лише маршрутів переміщення абонентів, але й типу району, що в свою чергу забезпечує адекватність моделі просторово-часової локалізації абонентів. Використання даної моделі, в процесі синтезу коміркової структури, дало змогу підвищити системну спектральну ефективність мережі мобільного зв'язку на 7%.

7. Розвинуто метод проектування покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена. Ключовими відмінностями методу є використання метрики співвідношення сигнал/шум, замість метрики Евклідової відстані, що дало змогу враховувати просторові характеристики зони покриття із щільною забудовою, а також використання фіксованих вагових коефіцієнтів нейронної мережі, що дало змогу врахувати існуючі базові станції в процесі проектування нової мережної інфраструктури. Таким чином, забезпечується децентралізований синтез цілісної топологічної структури мережі мобільного зв'язку різними операторами. Для дослідження, розроблено імітаційну модель фізичної інфраструктури мережі мобільного зв'язку, яка враховує тривимірну копію забудови місцевості на основі геоінформаційної системи OpenStreetMaps та реальне розташування базових станцій на основі бази OpenCellID. Запропонований підхід дав змогу на 20% підвищити ймовірність обслуговування абонентів із прийнятним співвідношенням сигнал/шум, за рахунок моделювання просторових характеристик радіоканалів з багатопроблемним поширенням хвиль на етапі синтезу складних топологічних структур.

8. Запропоновано техніко-економічну модель спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку на основі теорії ігор. Особливістю даної моделі є торгівля токенизованими активами радіочастотного ресурсу на основі смарт-контрактів між операторами, за правилами ринкової економіки. Результати моделювання показують, що запропонована модель дає змогу досягти еволюційно-стабільної рівноваги між ціновими політиками операторів, забезпечуючи при цьому лінійну залежність складності алгоритму від кількості абонентів. Експериментальні дослідження

підтверджують ефективність розробленої моделі, з точки зору підвищення середньої пропускну здатності для абонентів до 30% та зменшення кількості відмов в обслуговуванні до 14%.

9. Запропоновано модель спільного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мобільного зв'язку, яка використовує смарт-контракти на основі кооперативної ігрової моделі. Результати моделювання показують, що запропонована модель досягає рівноваги Неша за незначну кількість ітерацій, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл доступу до неліцензійного частотного діапазону незалежно від кількості конкуруючих операторів. Для додаткового підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу в неліцензійному діапазоні розроблено алгоритм координованого прослуховування частотних каналів, який полягає у формуванні окремих груп абонентів з унікальними дискретними інтервалами прослуховування. Таким чином, вдалося знизити ймовірність одночасного передавання даних абонентами в неліцензійному діапазоні від 5 до 30%, а також підвищити середні значення пропускну здатності для абонентів до 35%.

10. Розвинуто метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку, шляхом прогнозування часових характеристик трафіку окремих типів сервісу з використанням глибоких рекурентних нейронних мереж. Розроблений алгоритм прогнозування дав змогу операторам мобільного зв'язку попередньо резервувати необхідні обсяги радіочастотного ресурсу для обслуговування запитів абонентів, що збільшило їх прибутки до 19% та підвищило пропускну здатність для абонентів до 7%.

11. Розвинуто метод інтелектуального управління інформаційними потоками в транспортній мережній інфраструктурі для наскрізного забезпечення якості надання сервісів. Для цього розвинуто метод інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу, який враховує взаємозв'язок між інтенсивністю трафіку в сусідніх сегментах мережі мобільного зв'язку, при здійсненні хендверу між ними. Це дало змогу знизити обсяг надлишкового трафіку в оптичних мережах доступу до 20% за рахунок прогнозування переміщення абонентів та проактивної маршрутизації трафіку. Розвинуто метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі, який забезпечує узгоджене диференціювання інформаційних потоків з різними вимогами до якості сервісу на основі штучного інтелекту, що дало змогу забезпечити наскрізне управління інформаційними потоками в децентралізованих системах мобільного зв'язку національного масштабу.

12. Для перевірки запропонованих у роботі технічних рішень, розроблено прототип децентралізованої мережі мобільного зв'язку з використанням програмно-конфігурованих базових станцій стандартів LTE та 5G на основі універсальних програмно-апаратних платформ NI USRP 2900, віртуалізованих мікросервісів ядра мереж 4G та 5G на основі платформи Raspberry Pi, тестової блокчейн інфраструктури Ethereum та системи інтелектуального управління на основі хмарної інфраструктури Google Cloud.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографії:

1. М. М. Климаш, Т. А. Максимюк, М. І. Бешлей. Методи та моделі побудови гетерогенних мереж мобільного зв'язку 4G/5G — Львів: Видавництво «Львівської політехніки», 2020 – 388 с.

### Патенти:

2. Патент України на корисну модель UA 127803 U, H04J 13/00, Спосіб просторово-часового блочного кодування багатоантенних систем /М.М. Климаш, В.О. Пелішок, Т.А Максимюк – № u201801658; заявл. 19.02.2018; опубл. 27.08.2018. – Бюл. № 16/2018.

### Статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus/Web of Science:

3. D. Araújo, T. Maksymyuk, A. Almeida, T. Maciel, J. Mota, M. Jo, “Massive MIMO: survey and future research topics,” *IET Communications*, vol. 10, no. 15, pp. 1938-1946, 2016.
4. B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Jo, “Clustering hypervisors to minimize failures in mobile cloud computing,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 16, no. 18, pp. 3455-3465, 2016.
5. T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo, “Comprehensive spectrum management for heterogeneous networks in LTE-U,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 8-15, 2016.
6. J. Gazda, E. Šlapak, G. Bugár, D. Horváth, T. Maksymyuk, M. Jo, “Unsupervised learning algorithm for intelligent coverage planning and performance optimization of multitier heterogeneous network,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 39807-39819, 2018.
7. B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo, “Probabilistic recovery of incomplete sensed data in IoT,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 2282-2292, 2018.
8. L.Han, T. Maksymyuk, X. Bao, J. Zhao, Y. Liu, “Deep learning based loss recovery mechanism for video streaming over mobile information-centric network,” *KSI Transactions on Internet & Information Systems*, vol. 13, no.9, 2019.
9. T. Maksymyuk, E. Šlapak, G. Bugár, D. Horváth, J. Gazda, “Intelligent framework for radio access network design,” *Wireless Networks*, vol.26, pp. 759–774, Nov. 2019.
- 10.D. Horváth, J. Gazda, E. Šlapak, T. Maksymyuk, “Modeling and analysis of self-organizing UAV-assisted mobile networks with dynamic on-demand deployment,” *Entropy*, vol. 21, no. 11, article 1077, pp. 1-26, 2019.
- 11.G. Bugár, M. Vološin, T. Maksymyuk, J. Zausinová, V. Gazda, D. Horváth, J. Gazda, “Techno-economic framework for dynamic operator selection in a multi-tier heterogeneous network,” *Ad Hoc Networks*, vol. 97, pp. 102007, Feb. 2020.
- 12.Y. Liu, W. Hu, L. Han, T. Maksymyuk, Z. Chen. “A fast filling algorithm for image restoration based on contour parity,” *CMC-Computers, Materials & Continua*, vol. 63, no. 1, pp. 509–519, 2020.

13. M. Khan, M. Jamali, T. Maksymyuk, J. Gazda, "A blockchain token-based trading model for secondary spectrum markets in future generation mobile networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, article 7975393, 2020.
14. T. Maksymyuk, J. Gazda, M. Volosin, G. Bugar, D. Horvath, M. Klymash, M. Dohler, "Blockchain-empowered framework for decentralized network management in 6G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 9, pp. 86-92, Sep. 2020.

**Статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до інших міжнародних наукометричних баз:**

15. T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, "Study and development of next-generation optical networks," *Smart Computing Review*, vol. 4, no. 6, pp. 470-480, 2014.
16. T. Maksymyuk, O. Krasko, M. Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy, "Designing the new backhaul for 5G heterogeneous network based on converged optical infrastructure," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 4, pp. 9-13, 2017.
17. T. Maksymyuk, V. Andrushchak, S. Dumych, B. Shubyn, G. Bugar, J. Gazda, "Blockchain-based network functions virtualization for 5G network slicing," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 20, no. 4, pp. 54-59, 2020.

**Статті у фахових періодичних виданнях України:**

18. О.І. Сиротинський, І.С. Беляєв, Т.А. Максимюк, М.І. Олексін, "Захист інформаційних систем від мережеских DDOS атак на основі Марківської моделі поведінки ботнету", *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №738, С. 192-197, 2012.
19. Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, В.З. Пашкевич, "Модель акустооптичного комутатора для повністю оптичних телекомунікаційних систем", *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №766, С. 90-95, 2013.
20. М.М. Климаш, О.В. Красько, Т.А. Максимюк, "Метод спектрально-часового мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу", *Вісник ДонНТУ*, №2(27), С. 71-79, 2014.
21. М.В. Кайдан, С.С. Думич, Т.А. Максимюк, Р.А. Бурачок, Л.М. Готра, "Розрахунок параметрів якості обслуговування у фотонних транспортних мережах", *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №796, С. 147-156, 2014.
22. С.С. Думич, Д.С. Жуковська, Т.А. Максимюк, "Дослідження процесу агрегації трафіку в оптичних транспортних мережах з комутацією блоків", *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №818, С. 130-136, 2015.
23. А.П. Бондарев, І.П. Максимів, Т.А. Максимюк, "Метод підвищення енергетичної ефективності HQPSK сигналів", *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №849, С. 18-22, 2016.
24. М.В. Кайдан, М.І. Бешлей, Т.А. Максимюк, Б.М. Стрихалюк, "Теорія кернера та фазові переходи для потоків у телекомунікаційних мережах", *Вісник*

*Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», № 909, С. 29–34, 2018.*

25. Т.А. Максимюк, С.С. Думич, М.В. Брич, О.М. Яремко, “Метод адаптивного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мереж LTE”, *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, том 29(68), № 2, С. 58-63, 2018.
26. Т.А. Максимюк, О.В. Красько, С.С. Думич, О.М. Яремко, А.М. Варенко, “Метод мультиплексування інформаційних потоків у пасивній оптичній мережі з інтеграцією фіксованого та мобільного доступу”, *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, том 29(68), № 3, С. 59-65, 2018.
27. В.С. Андрущак, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, С.С. Думич, Ю.В. Пиріг, “Інтелектуальне управління інформаційними потоками в оптичних транспортних мережах”, *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), С. 4-16, 2019.
28. Т.А. Максимюк, Б.П. Шубин, Д.О. Мисаковець, В.С. Андрущак, С.С. Думич, “Метод адаптивного логічного розділення мережі 5G на основі глибокого навчання”, *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, том 31(70), № 5, С. 36-42, 2020.
29. Т.А. Максимюк, Б.П. Шубин, В.С. Андрущак, С.С. Думич, М.М. Климаш, “Метод інтелектуального управління контентом у мережах мобільного зв’язку”, *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(68), С. 15-26, 2020.

#### **Статті у інших періодичних виданнях:**

30. Максимюк Т. А., Шубин Б. П., Андрущак В. С., Бешлей Г. В., Думич С. С., Климаш М. М., «Практична реалізація програмно-конфігурованої мережі 5G на основі технологій Cloud-RAN та SDR», *Вісник Університету «Україна»*, №1 (24), С. 23-34, 2020.

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

31. S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko and P. Guskov, "The virtual channel parameters calculation in all-optical network," *IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Feb. 2013, Polyana-Svalyava, Ukraine, p. 88.
32. O. Yaremko and T. Maksymyuk, "Power control method in multiuser cellular networks," *IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Feb. 2013, Polyana-Svalyava, Ukraine, pp. 386-387.
33. S. Dumych, P. Guskov, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Simulation of characteristics of optical burst switched networks," *IEEE International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo)*, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013, pp. 492-493.
34. T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo, "Increasing of energy efficiency of a cognitive radio network," *IEEE International Crimean Conference "Microwave &*



- Telecommunication Technology" (CriMiCo)*, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013, pp. 277-278.
35. T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko and M. Jo, "Software defined optical switching for cloud computing transport systems," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, Jan. 2015, Bali, Indonesia, article #46.
  36. B. Fekade, T. Maksymyuk and M. Jo, "A virtual server qos enhancement method in cloud computing," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, Jan. 2016, Da Nang, Vietnam, article #81.
  37. T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo, "Deployment strategies and standardization perspectives for 5G mobile networks," *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Feb. 2016, Slavske, Ukraine, pp. 953-956.
  38. A. Bondarev, I. Maksymiv and T. Maksymyuk, "Method of improving the power efficiency of QPSK signals," *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Feb. 2016, Slavske, Ukraine, pp. 253-255.
  39. M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley, "State of the art and further development of information and communication systems," *IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Sep. 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 1-6.
  40. T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Klymash and M. Jo, "Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed and unlicensed spectrum for multi-operator 5G hetnet," *IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Sep. 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 315-318.
  41. T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria and M. Jo, "An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, Jan. 2017, Beppu, Japan, article #105.
  42. T. Maksymyuk, M. Brych, M. Klymash and M. Jo, "Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, July, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 197-200.
  43. M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and T. Maksymyuk, "Improving architecture of LTE mobile network for IoT services provisioning," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, July, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 209-212.
  44. T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Klymash, M. Jo, R. Romaniuk, A. Kotyra, A. Zhanpeisova, A. Kozbekova, "Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed spectrum for multi-operator 5G hetnet," *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, vol.10445, Wilga, Poland, Aug. 2017, article #5T.

45. T. Maksymyuk, M. Brych, Yu. Klymash, M. Kyryk and M. Klymash, "Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks," *IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2017, Kharkiv, Ukraine, pp. 515-518.
46. J. Gazda, M. Volosin, E. Slapak, P. Drotar and T. Maksymyuk, "Frequency spectrum distribution dynamics: Evidence from an agent-based experimental economy mode," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1123-1126.
47. T. Maksymyuk, M. Beshley, O. Petrenko, M. Klymash and Yu. Matsevityi, "Eavesdropping-resilient wireless communication system based on modified OFDM/QAM air interface," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1127-1130.
48. H. Beshley, T. Maksymyuk, M. Beshley and I. Strykhalyuk, "Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1147-1151.
49. V. Andrushchak, S. Dumych, T. Maksymyuk, M. Kaidan and O. Urikova, "Intelligent data flows management for performance improvement of optical label switched network," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1143-1146.
50. V. Andrushchak, T. Maksymyuk, D. Ageyev and M. Klymash, "Development of the ibeacon's positioning algorithm for indoor scenarios," *IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2018, Kharkiv, Ukraine, pp. 741-744.
51. T. Maksymyuk, J. Gazda, A. Luntovskyy and M. Klymash, "Artificial intelligence based 5G coverage design and optimization using deep generative adversarial neural networks," *IEEE International Conference on Information and Communications Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Sep. 2018, Odessa, Ukraine, pp. 1-4.
52. J. Zausinová, J. Gazda and T. Maksymyuk, "Real-time spectrum secondary markets: Agent-based model of investment activities of heterogeneous operators," *IEEE International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, Prague, April, 2018, pp. 1-6.
53. M. Klymash, T. Maksymyuk, S. Dumych and O. Yaremko, "Designing the industrial and environmental monitoring system based on the Internet of Things architecture," *IEEE International Symposium on Wireless Systems Within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2018, Lviv, Ukraine, pp. 187-190.
54. T. Maksymyuk, J. Gazda, O. Yaremko and D. Nevinskiy, "Deep learning based massive MIMO beamforming for 5G mobile network," *IEEE International*

- Symposium on Wireless Systems Within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2018, Lviv, Ukraine, pp. 241-244
55. E. Šlapak, J. Gazda, D. Horváth, G. Bugár, M. Vološin and T. Maksymyuk, "HetNet spatial topology design using mini-batch K-means clustering," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779242
56. T. Maksymyuk, L. Han, S. Larionov, B. Shubyn, A. Luntovskyy and M. Klymash, "Intelligent spectrum management in 5G mobile networks based on recurrent neural networks," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779301
57. T. Maksymyuk, J. Gazda, L. Han and M. Jo, "Blockchain-based intelligent network management for 5G and beyond," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 36-39.
58. B. Shubyn, T. Maksymyuk, "Intelligent handover management in 5G mobile networks based on recurrent neural networks," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 348-351.
59. V. Andrushchak, M. Kaidan, S. Dumych, Y. Pyrih and T. Maksymyuk, "Research on the scalability of all-optical switches in the OLS networks," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779310
60. T. Rosa, M. Kaidan, J. Gazda, P. Bykovyy, G. Sapozhnyk and T. Maksymyuk, "Scalable QAM modulation for physical layer security of wireless networks," *IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Sep. 2019, Metz, France, pp. 1095-1098.
61. E. Šlapak, J. Gazda, G. Bugár and T. Maksymyuk, "Review of cellular radio network cell placement design, from traditional to artificial intelligence based approaches," *IEEE International Symposium ELMAR*, Sep. 2019, Zadar, Croatia, pp. 93-96.
62. V. Andrushchak, M. Kaidan, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Smart payload management in edge nodes of optical label switching networks," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, Dec. 2019, Kyiv, Ukraine, pp. 175-178.
63. M. Vološin, J. Gazda and T. Maksymyuk, "Realistic user mobility simulator for 5G communication networks," *IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, May, 2019 Timisoara, Romania, pp. 263-268.
64. T. Maksymyuk, J. Gazda, M. Ružička, E. Šlapak, G. Bugar and L. Han, "Deep learning based mobile network management for 5G and beyond," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2020, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 890-893.

65. M. Ružička, M. Vološin, J. Gazda and T. Maksymyuk, "The extension of existing end-user mobility dataset based on generative adversarial networks," *IEEE International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, April, 2020, Bratislava, Slovakia, DOI: 10.1109/RADIOELEKTRONIKA49387.2020.9092404.
66. I. V. Yatskiv, S. Kulyna, P. Bykovyy, T. Maksymyuk and A. Sachenko, "Method of reliable data storage based on redundant residue number system," *IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2020, Dortmund, DOI: 10.1109/IDAACS-SWS50031.2020.9297052.

### АНОТАЦІЯ

**Максимюк Т.А. Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку.** – 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, Львів, 2021.

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему розроблення методів, моделей та засобів інтелектуального управління децентралізованою мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку, з метою підвищення її техніко-економічної ефективності для операторів та абонентів, в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури. Запропоновано системний підхід до структурно-функціонального синтезу децентралізованих мереж мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням, який полягає у розробленні множини методів інтелектуального управління мережною інфраструктурою, засобів автоматизації мережі для забезпечення її універсальності до будь-яких стандартів безпроводного зв'язку та типів мобільних пристроїв, а також моделей децентралізації радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури із адаптивним мультиоператорним обслуговуванням абонентів.

**Ключові слова:** децентралізована система мобільного зв'язку, автоматизоване управління, радіочастотний ресурс, блокчейн, смарт-контракт, методи штучного інтелекту, 5G/6G.

### АННОТАЦИЯ

**Максимюк Т.А. Интеллектуальное автоматизированное управление децентрализованными системами мобильной связи.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет «Львовская политехника», Министерства образования и науки Украины, Львов, 2021.

В диссертационной работе решена научно-прикладная проблема разработки методов, моделей и средств интеллектуального управления децентрализованной мультиоператорной инфраструктурой сетей мобильной связи, с целью повышения

ее технико-экономической эффективности для операторов и абонентов, в условиях открытого рынка радиочастотного ресурса и сетевой инфраструктуры. Предложен системный подход к структурно-функциональному синтезу децентрализованных сетей мобильной связи с интеллектуальным автоматизированным управлением, который заключается в разработке множества методов интеллектуального управления сетевой инфраструктурой, средств автоматизации сети для обеспечения ее универсальности к любым стандартам беспроводной связи и типам мобильных устройств, а также моделей децентрализации радиочастотного ресурса и сетевой инфраструктуры с адаптивным мультиоператорным обслуживанием абонентов.

**Ключевые слова:** децентрализованная система мобильной связи, автоматизированное управление, радиочастотный ресурс, блокчейн, смарт-контракт, методы искусственного интеллекта, 5G/6G.

### ABSTRACT

**T. Maksymyuk. Intelligent automated management of decentralized mobile communication systems.** – As a manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the D.Sc. degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication networks and systems. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry for education and science of Ukraine, Lviv, 2021.

The thesis solves a scientific problem of the development of methods, models and means for the intelligent decentralized multi-operator infrastructure management in mobile networks, to increase its technical and economic efficiency for operators and users in the scenario of open spectrum and infrastructure markets.

This work aims to resolve an uncertainty between the need of centralized management to enhance the technical efficiency of the mobile network by leveraging the advanced capabilities of artificial intelligence, and the demand for decentralized open spectrum market with flexible business models for infrastructure deployment and sharing by operators to increase the economic efficiency of the entire mobile ecosystem.

In particular, we have developed a concept of a decentralized mobile network that integrates the means of artificial intelligence and the blockchain technology to leverage the advantages of both centralized and decentralized business models in the mobile network, while eliminating their corresponding drawbacks and constraints. Such a solution allows to disrupt the mobile network market by enabling a trustable spectrum and infrastructure sharing among operators, underpinned by economic and legislative mechanisms. This in turn, raises a challenge of the effective operation of the multi-operator mobile network in terms of technical and economic factors, while assuming the conditions of the decentralized infrastructure deployment, the open spectrum market and the ubiquitous connectivity of end users regardless of the serving operator. Thus, the key scientific contributions of the thesis are summarized as following.

A new structural and functional model of decentralized mobile network is proposed to decouple the user plane, infrastructure plane, operator plane, decentralization plane and intelligent control plane to enable an automated coordination of the spectrum and infrastructure sharing among operators based on the smart contracts, the assets tokenization and the artificial intelligence. To provide a data supply chain for the artificial intelligence we have developed a decentralized monitoring system that can cope with an

exogenous dynamic of the mobile network and allows operators to react in advance. To enable the trading of spectrum and infrastructure among operators within the decentralized blockchain ecosystem, we propose a tokenization model of spectrum and infrastructure based on the non-fungible tokens, utility tokens and central bank digital currencies. Considering the demand for the ubiquitous connectivity and the upcoming paradigm of the micro-operators in 6G, we propose a new model of adaptive operator selection based on technical and economic criteria to enable seamless user connectivity across multiple operators with flexible SLA smart contracts, negotiated and executed in quasi real time.

A particular attention in the thesis is given to the problem of decentralized coverage planning to allow operators extending the network coverage by placing new base stations in the most optimal way, taking into account the existing network infrastructure that has been built before. This challenge is solved by a modified version of the self-organizing maps with a combination of immutable and mutable neurons to exhibit the positions of existing and potential network infrastructure during the coverage optimization. An additional enhancement of the model has been done by replacing the conventional metric of Euclidean distance to the metric of SINR that allows optimizing the network coverage in a spatial domain, considering the impact of buildings in the urban environment on the coverage quality.

To resolve the problem of spectrum management in a current semi-centralized scenario, we have developed a game theoretical model that allows big operators with a nationwide spectrum license to share it with micro-operators in a local scale based on the smart-contracts. Such a solution allows both improving the connectivity and experience of the end users as well as increasing profits of operators by sharing the spectrum based on evolutionary stable equilibrium strategies. In addition, the challenge of unlicensed spectrum sharing with interference mitigation is solved by the cooperative game model based on the trading of utility tokens among the operators in a blockchain. The proposed model converges to the Nash equilibrium within few iterations that ensures the fair utilization of unlicensed spectrum regardless of the number of operators. To further enhance the efficiency of spectrum sharing among operators considering their time-varying demands, we have developed the intelligent spectrum management model for mobile networks based on the recurrent neural networks, which allows to predict a traffic demand of the particular network service and allocate enough spectrum in advance. This allows operators to adjust their corresponding strategies to ensure the best tradeoff between technical and economic efficiency of the mobile network.

Finally, we have proposed a method of intelligent data flows management in an optical transport network infrastructure. Proposed method implements a flexible data flows multiplexing and aggregation across wireless and optical domain to support an adaptive end-to-end quality of service provision for different network slices in the large scale decentralized mobile ecosystem.

**Keywords:** decentralized mobile communication system, automated management, blockchain, smart contract, methods of artificial intelligence, 5G/6G.

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

**ERC** (Ethereum Request for Comments) – стандарт токенизації у блокчейні *Ethereum*;

**LTE** (Long-Term Evolution) – стандарт мобільного зв'язку 4G;

**USRP** (Universal Software Radio Peripheral) – програмований радіомодуль;

**D2D** (Device-to-Device) – зв'язок між абонентськими пристроями;

**SLA** (Service Level Agreement) – угода про рівень якості обслуговування;

**HTTP** (Hyper Text Transfer Protocol) – протокол прикладного рівня;

**MQTT** (Message Queue Telemetry Transfer) – протокол телеметрії;

**НКРЗІ** – Національна комісія, що здійснює державне регулювання в сфері зв'язку та інформатизації;

**LRRT** (Licensed Radio Resource Token) – токен ліцензійного радіочастотного ресурсу;

**URRT** (Unlicensed Radio Resource Token) – токен неліцензійного радіочастотного ресурсу;

**IRT** (Infrastructure Resource Token) – токен інфраструктурного ресурсу;

**CBDC** (Central Bank Digital Currency) – національна криптовалюта;

**3GPP** (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) – консорціум стандартизації мереж мобільного зв'язку;

**RSRP** (Reference Signal Received Power) – потужність прийнятого сигналу;

**gNB/eNB** – базові станції мереж 5G/4G;

**5QI** (5G Quality Identifier) – ідентифікатор якості сервісу в мережах 5G;

**API** (Application Programming Interface) – прикладний програмний інтерфейс;

**UI** (User Interface) – інтерфейс користувача;

**GAN** (Generative Adversarial Networks) – генеративно-змагальна мережа;

**LSTM** (Long-Short Term Memory) – рекурентна нейронна мережа;

**CNN** (Convolutional Neural Network) – згорткова нейронна мережа;

**SOM** (Self-Organizing Maps) – самоорганізовані карти Кохонена;

**SINR** (Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio) – співвідношення сигнал/шум;

**5GC** (5G Core)/**vEPC** (Virtual Evolved Packet Core) – ядро мережі 5G/LTE;

**DSCP** (DiffServ Code Point) – ідентифікатор класу сервісу в мережах IP.

Підписано до друку 31.03.2021р. Папір офсетний. Друк на різогр.  
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,9. Наклад 120 прим. Зам. №320  
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