

Голові спеціалізованої вченої ради  
Д.35.052.10 у Національному університеті  
«Львівська політехніка»

---

79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

## ВІДГУК

офіційного опонента професора кафедри кібербезпеки та захисту інформації Київського національного університету імені Тараса Шевченка доктора технічних наук, професора Толюпи Сергія Васильовича на дисертаційну роботу Максимюка Тараса Андрійовича за темою «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**Актуальність теми дисертації.** Поточна тенденція розвитку мереж мобільного зв'язку в Україні та світі характеризується дедалі більшим ущільненням мережної інфраструктури з метою забезпечення достатньої ємності для обслуговування різноманітних мережних пристроїв, кількість яких стрімко зростає. Додатковим викликом для операторів постає наявність широкого різноманіття сервісів, які мають суперечливі вимоги до якості, що додатково підвищує вартість побудови мережі для операторів. Тому, виникає потреба у нових децентралізованих бізнес-моделях, які б дали змогу операторам отримувати ліцензії на використання радіочастотного ресурсу в локальному або регіональному масштабі. Децентралізована модель розгортання мережної інфраструктури дасть змогу операторам будувати мережі невеликого масштабу, уникаючи при цьому значних капітальних затрат на побудову загальнонаціональної мережі мобільного зв'язку. Це, в свою чергу, стимулюватиме появу великої кількості мікро-операторів, які можуть бути представниками малого та середнього бізнесу.

Проте, така модель потребує відкритого ринку радіочастотного ресурсу з поділом на окремі територіальні зони та механізмів його спільного та координованого використання операторами. Крім того, децентралізована модель створює ряд викликів, які не характерні для існуючих централізованих мереж. Наприклад, залишається відкритим питання забезпечення мобільності абонентів, враховуючи обмежені зони обслуговування мереж мікро-операторів. Крім того, оператори повинні координувати процес побудови та спільного використання мережної інфраструктури для забезпечення повсюдного покриття в масштабах держави. Також залишається невирішеним питання управління децентралізованою мультиоператорною мережною інфраструктурою для

забезпечення її ефективного функціонування з точки зору технічних показників.

Поєднання вищенаведених аспектів породжує протиріччя між централізованим управлінням інфраструктурою та радіочастотними ресурсами, для забезпечення ефективності мережі мобільного зв'язку за множиною технічних показників та децентралізованим розгортанням мереж мобільного зв'язку, для забезпечення їх ефективності за множиною економічних показників.

В дисертаційній роботі, здобувач вирішив актуальну 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.

Актуальність проблематики досліджень підтверджується їх виконанням в рамках ряду держбюджетних науково-дослідних робіт. Зокрема, варто відзначити науково-дослідні роботи, в яких здобувач є безпосереднім науковим керівником:

- «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.

Актуальність роботи в світовому масштабі також підтверджується її виконанням в рамках 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.

**Загальна характеристика роботи.** В дисертаційній роботі запропоновано системний підхід до структурно-функціонального синтезу децентралізованих мереж мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням. Зокрема, розроблено ряд методів інтелектуального управління та автоматизації мережної інфраструктури, а також запропоновано нові моделі децентралізації радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури для адаптивного мультиоператорного обслуговування абонентів.

У *вступі* подано загальну характеристику дисертаційної роботи, розкрито існуючу науково-прикладну проблему та невирішені протиріччя, обґрунтовано всі процедурні положення, а також подано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У *першому розділі* проведено аналіз існуючого стану проблеми, проведено огляд актуальних наукових досліджень провідних фахівців в галузі технологій мереж мобільного зв'язку. Узагальнено проблему інтелектуального управління децентралізованою мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку для підвищення її техніко-економічної ефективності. Проведено класифікацію ендогенних та екзогенних факторів, які впливають на показники ефективності мережі. Систематизовано структурно-логічну схему дисертаційного дослідження шляхом виокремлення сукупності взаємопов'язаних проблем, які потребують комплексного вирішення для підвищення техніко-економічної ефективності децентралізованих систем мобільного зв'язку в національному масштабі:

- інтелектуальне управління системами мобільного зв'язку потребує ряду 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;

- автоматизоване управління складними розподіленими системами мобільного зв'язку потребує засобів автоматизованої програмної конфігурації інфраструктури мереж мобільного зв'язку, з відокремленням рівнів управління та рівнів передавання даних;

- децентралізація систем мобільного зв'язку потребує створення технологічних передумов для відкритого ринку мобільного зв'язку, які б дали змогу координувати використання радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури операторами, а також забезпечити абонентам можливість адаптивного вибору оператора в режимі реального часу.

Систематизація усіх вищенаведених аспектів в рамках дисертаційної роботи дає змогу досягти синергетичного ефекту підвищення техніко-економічної ефективності мережі мобільного зв'язку.

У *другому розділі* формалізовано процес функціонування децентралізованих систем мобільного зв'язку на різних рівнях управління. Для цього запропоновано нову структурно-функціональну модель мережі мобільного зв'язку, яка складається із площини абонентів, площини мережної інфраструктури, площини операторів, площини децентралізації та площини інтелектуального управління. Запропонована модель, дає змогу формалізувати аналітичний фундамент для подальших досліджень у дисертаційній роботі. Зокрема, для визначення критеріїв якості обслуговування в площині абонентів, запропоновано гібридну модель оцінки рівня задоволеності сервісом на основі функції корисності, яка поєднує параметри якості та вартості сервісу. Це дає змогу абонентам

персоналізувати вимоги до сервісів, враховуючи особисті суб'єктивні фактори.

Крім того, для децентралізації мережі формалізовано процес управління інформаційними потоками в площині розподіленої мережної інфраструктури. Важливим аспектом для забезпечення децентралізації мереж мобільного зв'язку є масштабованість та гнучкість мережної інфраструктури для забезпечення взаємодії між різними системами зв'язку, технологіями та протоколами. Використання технологій віртуалізації та програмної-конфігурації забезпечує адаптивне спільне використання інфраструктури у площині операторів, яка передбачає одночасне співіснування операторів національного та регіонального масштабів, приватних операторів, а також вузькоспеціалізованих галузевих операторів. Формалізація вищевказаних аспектів дала змогу розробити модель токенизації, яка дає змогу оцифрувати активи радіочастотного та інфраструктурного ресурсу операторів, для їх подальшого обміну шляхом фінансових транзакцій у мережі блокчейн. У розділі розв'язане одне з ключових завдань для реалізації концепції децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яке полягає у розробленні методу адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу на основі функції корисності абонента та універсального ідентифікатора абонента у мережі блокчейн. Також, запропоновано систему моніторингу децентралізованої мережної інфраструктури, яка забезпечує неперервний потік даних для самонавчання алгоритмів управління на основі штучного інтелекту.

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 у роботі методів, моделей та алгоритмів.

*Третій* розділ присвячений розв'язку завдання планування фізичної топологічної структури децентралізованої мережі мобільного зв'язку. Новизною запропонованого підходу є використання методу синтезу на основі самоорганізованих карт Кохонена, який удосконалений автором з урахуванням особливостей децентралізації мережі. Зокрема, модифікований алгоритм використовує фіксовані вагові коефіцієнти карти для вузлів існуючої мережної інфраструктури, що дає змогу враховувати їх в процесі розрахунку метрик ефективності покриття, зберігаючи при цьому їх позиції. Іншою важливою модифікацією запропонованого методу є заміна метрики Евклідової відстані, на метрику співвідношення сигнал/шум, що дає змогу використовувати запропонований метод для оптимізації покриття з урахуванням реальної забудови місцевості. Пошук квазі-оптимальних топологічних структур здійснювався з використанням реалістичного алгоритму генерації абонентів та їх траєкторій переміщення на основі генеративно-змагальних нейронних мереж, який розроблений автором. Моделювання проводились з використанням віртуальної тривимірної моделі середовища, яка враховує вплив забудови місцевості на характеристики

поширення сигналів та результуючі значення співвідношення сигнал/шум для абонентів.

У *четвертому* розділі розглядаються аспекти спільного використання радіочастотного ресурсу ліцензійного та неліцензійного діапазонів, а також методи інтелектуального управління для підвищення ефективності його використання. Зокрема, для спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку автором запропоновано техніко-економічну модель торгівлі токенованими активами на основі теорії ігор. Особливістю даної моделі є формування ігрових стратегій операторів з точки зору максимізації їх прибутків. При цьому, передбачається конкуренція за кінцевих абонентів, які мають змогу адаптивно обирати оператора з більш вигідними умовами обслуговування на основі запропонованого у другому розділі методу. Результати моделювання показали, що запропонована модель досягає еволюційно-стабільної рівноваги між ціновими політиками операторів, забезпечуючи при цьому підвищення середньої пропускної здатності та зменшення кількості відмов в обслуговуванні для абонентів на 30% та 14%, відповідно. Для спільного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів автор запропонував кооперативну ігрову модель розподілу радіочастотного ресурсу між операторами, яка досягає рівноваги Неша за незначну кількість ітерацій, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл часу доступу до неліцензійного частотного діапазону незалежно від кількості конкуруючих операторів. Для зниження ймовірності одночасного передавання даних абонентами в неліцензійному діапазоні розроблено алгоритм координованого прослуховування частотних каналів на основі унікальних дискретних інтервалів прослуховування для окремих абонентських груп, що дало змогу підвищити середні значення пропускної здатності для абонентів до 35%. Також у даному розділі автор розвинув метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом, шляхом прогнозування часових характеристик трафіку, який дає змогу операторам попередньо резервувати необхідні обсяги радіочастотного ресурсу, що збільшує їх прибутки до 19% та підвищує пропускну здатність для абонентів до 7%.

У *п'ятому* розділі розв'язано завдання інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі для наскрізного забезпечення якості надання різних типів сервісів у децентралізованих системах мобільного зв'язку. Автором запропоновано новий підхід до інтеграції децентралізованих мереж мобільного зв'язку та розподіленої транспортної інфраструктури, який дає змогу забезпечити наскрізне управління якістю передавання інформаційних потоків. Зокрема, автором розвинуто метод інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу, що дало змогу враховувати взаємозв'язок між інтенсивністю трафіку в сусідніх сегментах мережі мобільного зв'язку. Також, розвинуто метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі, що забезпечує узгоджене диференціювання інформаційних

потоків з різними вимогами до якості сервісу для наскрізного управління інформаційними потоками в децентралізованих системах мобільного зв'язку національного масштабу.

**Шостий** розділ присвячено розробленню методологічних та практичних рекомендацій щодо синтезу децентралізованої інфраструктури мереж мобільного зв'язку, з можливістю інтелектуального автоматизованого управління. Для практичної перевірки запропонованих у роботі методів, автором розроблено прототип децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі програмно апаратних платформ NI USRP 2900, які використовуються у якості віддалених програмно-конфігурованих базових станцій. Для реалізації системи децентралізованого управління мережною інфраструктурою, розгорнуто програмні компоненти віртуалізованих функцій ядра мережі, використовуючи хмарну та блокчейн-інфраструктуру. Також автором запропоновано ряд альтернативних стратегій розгортання децентралізованих приватних мереж мобільного зв'язку для операторів та сторонніх стейкхолдерів. Розглянуто основні принципи правового регулювання ринку мобільного зв'язку та сформовано основні рекомендації стосовно регулювання технології блокчейн для управління відкритим ринком мобільного зв'язку.

У **висновках** дисертаційної роботи показано, що в результаті проведених досліджень автором вирішена науково-прикладна проблема 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.

У **додатках** до роботи подано опис розробленого програмного забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список праць автора.

**Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій.** Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Максимюка Тараса Андрійовича, підтверджуються наступним:

- коректне використання математичного апарату теорії ймовірності та математичної статистики, методів та засобів штучного інтелекту, методів оптимізації та елементів теорії ігор;

- отримані результати не суперечать фундаментальним основам систем безпроводного зв'язку, основам ринкової економіки, а також теоретичним та практичним аспектам функціонування розподілених реєстрів;

- достовірність підтверджено шляхом аналітичного, імітаційного та експериментального моделювання, що засвідчено актами впровадження;

- отримані нові результати гармонійно доповнюють відомі;

- матеріали дисертації обговорювались на 34 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, а також на наукових семінарах, і отримали схвальну оцінку.

## **Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі**

### ***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;

- 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;

- 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;

- 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;

### ***Розвинуто:***

- 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;

- 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;

- 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;

- 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.

**Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях.** Основні результати, які отримані в дисертаційній роботі, опубліковано у 86 наукових публікаціях, серед них – 1 монографія, 1 патент, 12 статей у закордонних періодичних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus/Web of Science, 3 статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до інших міжнародних наукометричних баз, 12 статей у фахових періодичних виданнях України, 1 стаття у іншому періодичному виданні, 34 тези доповідей на міжнародних конференціях, які індексуються наукометричними базами Scopus/Web of Science та 20 тез доповідей на інших конференціях. Опубліковані праці повністю висвітлюють матеріали дисертаційної роботи.

Результати дисертаційної роботи претендента пройшли всебічну апробацію на семінарах та конференціях, в тому числі міжнародних, і отримали схвалення провідних фахівців телекомунікаційної галузі в Україні та світі.

**Структура роботи.** Дисертація 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.

**Відповідність дисертації встановленим вимогам.** Оформлення дисертації відповідає вимогам до дисертаційних робіт, та вимогам до докторських дисертацій п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., а також змінам і доповненням, які внесені згідно з Постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015 р. та №567 від 27.07.2016 р. Автореферат дисертації повністю відповідає змісту дисертаційної роботи, висвітлює всі отримані результати, сформульовані висновки та запропоновані рекомендації. Стиль викладення матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття.



**Важливість для науки і народного господарства одержаних результатів та шляхи їх використання.** 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, варто відзначити основні практичні результати, які можуть бути використані операторами мереж мобільного зв'язку:

1. Система 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. 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. Децентралізована блокчейн-платформа 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. 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. Імітаційна 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 багатопроменевим поширенням хвиль.

6. 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. Алгоритм прогнозування часових характеристик трафіку з використанням рекурентних нейронних мереж, який дає змогу досягти виграшу 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. 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. 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 пропускної здатності радіоканалу до 70%, в момент запиту контенту абонентом.

10. 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.

У додатку до роботи подано акти використання результатів роботи у промисловості та навчальному процесі, які підтверджують їх достовірність.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. У першому розділі автор детально розглядає існуючі досягнення провідних вчених з точки зору використання технології блокчейн та методів штучного інтелекту для управління мережами мобільного зв'язку. Проте, недостатньо уваги приділяється фундаментальному опису даних технологій, що ускладнює подальше розуміння деяких аспектів їх використання у наступних розділах роботи.

2. Впродовж усього тексту дисертаційної роботи автор використовує терміни «децентралізовані мережі мобільного зв'язку» та «децентралізовані системи мобільного зв'язку», проте не зовсім зрозуміло чи автор ототожнює дані поняття, чи між ними є принципова відмінність, на якій акцентується увага.

3. У другому розділі доцільно було б представити порівняння реалізації смарт-контрактів з використанням різних існуючих блокчейнів, для того щоб зрозуміти, як їх характеристики впливають на ефективність функціонування запропонованого методу адаптивного вибору оператора.

4. В процесі досліджень, дисертант припускає, що абоненти зможуть вільно реєструватись в мережі будь-якого оператора з використанням унікального блокчейн-ідентифікатора. Проте, не зовсім зрозуміло чи можна реалізувати даний ідентифікатор в існуючих апаратних пристроях абонентів, чи вони потребують відповідних модифікацій.

5. В запропонованому методі децентралізованого проектування топологічної структури, дисертант використовує фіксовані вагові коефіцієнти нейронів для існуючих базових станцій. Проте, в роботі не наведено порівняння результатів синтезу при різних співвідношеннях між кількістю фіксованих та «плаваючих» нейронів в самоорганізованій карті, що не дає змогу в повній мірі зрозуміти масштаби процесу проектування. Наприклад, чи буде ефективним запропонований метод для вибору місця встановлення однієї додаткової базової станції, при наявності великої кількості фіксованих базових станцій навколо?

6. В процесі моделювання запропонованого методу адаптивного використання радіочастотного ресурсу неліцензійного діапазону, дисертант наводить результати рівномірного розподілу пропускної здатності між операторами. Проте незрозуміло, чи враховувались поточні вимоги абонентів при розрахунку пропускної здатності.

7. У четвертому розділі, при описі методу інтелектуального управління радіочастотним ресурсом, незрозуміло за якими критеріями повинно прийматись рішення про необхідність повторного навчання моделі рекурентних нейронних мереж, при зниженні її точності в процесі довготривалого функціонування мережі.

8. Для кращого розуміння аспектів регулювання ринку мобільного зв'язку, у шостому розділі було б доцільно привести приклад здійснення заборони на використання радіочастотного ресурсу для окремих частотних діапазонів з використанням запропонованої дисертантом моделі управління.

### **Загальні висновки**

1. Дисертаційна робота Максимюка Тараса Андрійовича є завершеною науковою працею, що містить нові науково обґрунтовані результати, важливі для подальшого розвитку систем мобільного зв'язку в Україні.

2. Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих у дисертаційній роботі, має практичну цінність і становить вирішення науково-прикладної проблеми 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.

3. Дисертаційна робота за змістом відповідає вимогам Паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

4. Матеріали дисертації достатньо апробовані, доповідались на міжнародних і всеукраїнських конференціях, наукових семінарах, висвітлені в наукових публікаціях.

5. Автореферат об'єктивно і з необхідною повнотою відображає зміст і основні положення дисертації.

6. Структура дисертації є обґрунтованою.

7. Наведені зауваження не змінюють загальну позитивну оцінку наукової значимості і практичної цінності дисертаційної роботи.

8. За актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною значимістю одержаних результатів дисертаційна робота Максимюка Т.А., яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, відповідає вимогам пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567 (зі змінами внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015 р. та №567 від 27.07.2016 р.), а її автор Максимюк Тарас Андрійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

### ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

Професор кафедри кібербезпеки та захисту  
інформації факультету інформаційних технологій  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка

доктор технічних наук, професор



С.В. Толупа

