

## ВІДГУК

офіційного опонента професора кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» доктора технічних наук, професора Отроха Сергія Івановича на дисертацію Максимюка Тараса Андрійовича «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

### Актуальність теми дисертації

Одним із важливих напрямків розвитку сучасних телекомунікацій є удосконалення існуючих і створення нових технологій передавання інформації для різних безпроводових систем зв'язку. Життєвий цикл мобільних технологій суттєво зменшується, оскільки розробка і впровадження більш технічних і економічних безпроводових технологій складає до 5 років. На сьогоднішній час, розвиток мереж мобільного зв'язку досягнув критичної точки, при якій подальше вдосконалення технічних характеристик мережі є неможливим без врахування економічних факторів. Незважаючи на те, що відомі на сьогодні інформаційні технології дають змогу забезпечити безпрецедентний рівень інформаційних сервісів для кінцевих абонентів, їх масове впровадження в мережах мобільного зв'язку є суттєво ускладненим, у зв'язку із економічною недоцільністю для операторів.

Враховуючи обсяги інвестицій операторів у побудову мережної інфраструктури національного масштабу, а також необхідність придбання дорогих ліцензій на використання радіочастотного ресурсу, оператори не можуть підтримувати високі темпи модернізації мереж мобільного зв'язку до нових технологій, без суттєвого підвищення тарифів для абонентів, що і спостерігалось в останні роки при впровадженні стандарту 3G у 2015 році та 4G у 2018 році в Україні.

Незважаючи на те, що формально мережі 5G вже функціонують у понад 30 країнах світу, широке їх впровадження можна очікувати не раніше 2025 року. Це зумовлено рядом економічних факторів, таких як складне ліцензування радіочастотного ресурсу та висока вартість розгортання мережної інфраструктури, за рахунок меншого радіусу дії базових станцій. З іншого боку, не сьогоднішній день ще немає критичної кількості абонентів, які готові платити вищу ціну за мобільний зв'язок 5G, оскільки 4G наразі забезпечує значно краще покриття території, з достатньою якістю сервісу. Поєднання цих факторів призводить до того, що пріоритетом великих операторів наразі залишаються мережі LTE, які достатньо широко розбудовані та майже повністю забезпечують поточні потреби ринку.

З іншого боку, ситуація може докорінно змінитись, якщо ринок мобільного зв'язку буде відкритим та децентралізованим, що дасть змогу

перейти до децентралізованої парадигми мікро-операторів, які обслуговують невелику територію, аналогічно до того як наразі працюють провайдери фіксованого доступу до мережі Інтернет. За рахунок зниження витрат на локальне ліцензування радіочастотного ресурсу та невеликого масштабу мережної інфраструктури мікро-оператори матимуть змогу більш активно впроваджувати нові технічні рішення, які дадуть змогу підвищити якість послуг, забезпечуючи при цьому конкурентну вартість сервісу для абонентів.

Проте, перед такою моделлю функціонування постає ряд проблем, які потребують вирішення. В першу чергу, це стосується процесу децентралізованого розподілу радіочастотного ресурсу, що потребує наявності методів його координованого використання операторами у різних територіальних зонах із уникненням інтерференційних завад. Крім того, важливо забезпечити можливість мікро-операторам тимчасово орендувати радіочастотний ресурс, у великих операторів. Другою важливою проблемою є забезпечення повсюдного обслуговування абонентів при їх переміщенні, що в свою чергу потребує методів адаптивного перемикання між мережами різних операторів. Третя проблема полягає у складності управління процесом функціонування систем мобільного зв'язку різних операторів як єдиної децентралізованої мережі з наскрізним наданням сервісів для абонентів та гармонічним функціонуванням мультиоператорної мережної інфраструктури.

Саме вирішенню вищевказаних проблем присвячена дисертаційна робота Максимюка Т.А., метою якої 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.

### **Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій**

Основні наукові положення дисертаційної роботи адекватно обґрунтовані та не суперечать теорії систем безпроводного зв'язку, методам штучного інтелекту та основним принципам реалізації розподілених реєстрів блокчейн. Запропоновані методи та моделі коректно формалізовані з використанням математичного апарату лінійної алгебри, теорії ігор, теорії ймовірності та математичної статистики. Адекватність імітаційного моделювання підтверджується використанням програмних бібліотек та конфігурацій, які рекомендовані розробниками стандартів мобільного зв'язку. Наукові результати дисертаційної роботи доповідались на 34 конференціях, з яких 8 проводились за кордоном. Результати дисертаційної роботи Максимюка Т.А. перевірені на практиці, що підтверджено відповідними актами впровадження. Нові наукові результати, які отримані автором доповнюють попередньо відомі наукові дослідження за напрямком дисертаційної роботи.

## Наукова новизна дисертаційної роботи

### 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;
- 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;
- 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;
- 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.

### 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.

### **Відповідність дисертації чинним вимогам**

Дисертаційна робота Максимюка Т.А. на тему «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку» оформлена у відповідності до чинних вимог «Порядку присудження наукових ступенів» до докторських дисертацій. Автореферат написаний у строгому науковому стилі та повною мірою відображає основні положення дисертації.

### **Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях**

За результатами дисертаційної роботи, автором опубліковано 86 наукових праць, серед яких: 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, 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 повною мірою висвітлюють матеріали дисертаційної роботи.

### **Важливість одержаних результатів для науки і народного господарства та перспективи їх використання**

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.

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.

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.

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.

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 багатопроменевим поширенням хвиль.

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%.

Розроблено 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.

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.

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 пропускної здатності радіоканалу до 70%, в момент запиту контенту абонентом.

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.

Використання результатів дисертаційної роботи дасть змогу підвищити ефективність існуючих мереж мобільного зв'язку за технічними та економічними критеріями.

### **Загальна характеристика дисертаційної роботи**

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.

Дисертаційна 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.

У *вступі* подано загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано всі процедурні положення та подано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У *першому* розділі дисертаційної роботи систематизовано основні аспекти процесу інтелектуального управління та децентралізації мультиоператорної інфраструктури мереж мобільного зв'язку. Сформовано структурно-логічну схему у вигляді послідовності окремих завдань, розв'язок яких має на меті підвищити ефективність функціонування мультиоператорних мереж мобільного зв'язку за множиною технічних та економічних критеріїв.

У *другому* розділі дисертантом запропоновано структурно-функціональну модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка є основою для подальших досліджень у роботі. Запропоновано модель токенизації мережних ресурсів на основі невзаємозамінних токенів, що дало змогу оцифрувати мережні активи операторів та сторонніх стейкхолдерів, для їх подальшого обміну у мережі блокчейн. Розроблено метод адаптивного

вибору оператора мобільного зв'язку, який враховує компроміс абонента між якістю та вартістю сервісу. Розроблено систему децентралізованого моніторингу просторових характеристик мережі мобільного зв'язку, що дає змогу передавати будь-яку мережну інформацію як від абонентів, так і від операторів із заданою періодичністю на основі асинхронних протоколів Інтернету речей.

*У третьому* розділі запропоновано алгоритм моделювання мобільності абонентів, який використовує генеративно-змагальні нейронні мережі, що забезпечує адаптацію до довільного середовища та індивідуальних атрибутів абонентів. Для моделювання просторово-часових статистичних характеристик трафіку використовується геоінформаційна система OpenStreetMaps, яка дає змогу врахувати особливості цільової зони покриття території з точки зору маршрутів переміщення абонентів та типу району. Удосконалено метод проектування покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена, шляхом використання метрики співвідношення сигнал/шум та фіксованих ваг окремих нейронів, що дало змогу забезпечити децентралізований синтез цілісної топологічної структури різними операторами, враховуючи при цьому просторові характеристики радіоканалів з багатоприменовим поширенням хвиль у віртуалізованій моделі з тривимірною забудовою місцевості.

*Четвертий* розділ розглядає техніко-економічні аспекти спільного використання ліцензійного та неліцензійного радіочастотного ресурсу в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку. Зокрема запропоновано модель торгівлі токенизованими активами радіочастотного ресурсу між операторами на основі теорії ігор, яка дає змогу досягти еволюційно-стабільної рівноваги між ціновими політиками операторів. Запропоновано модель спільного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мобільного зв'язку, яка досягає рівноваги Неша за незначну кількість ітерацій, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл доступу до неліцензійного частотного діапазону незалежно від кількості конкуруючих операторів. 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, що дає змогу операторам попередньо резервувати необхідні обсяги радіочастотного ресурсу для обслуговування прогнозованих запитів абонентів.

*У п'ятому* розділі удосконалено метод інтелектуального управління інформаційними потоками в транспортній мережній інфраструктурі для наскрізного забезпечення якості надання сервісів. Зокрема, 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 переміщенні абонентів між ними. 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.

У шостому розділі представлено практичні та методологічні рекомендації для побудови децентралізованих мереж мобільного зв'язку. Зокрема, 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.

У висновках дисертаційної роботи систематизовано основні результати дисертаційної роботи, які дали змогу вирішити 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.

Додатки до роботи містять параметри та коди розроблених програмних засобів, акти впровадження та список праць автора.

### **Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи**

1. При аналізі існуючих архітектур та методів інтелектуального управління мережною інфраструктурою у першому розділі роботи було б доцільно більше уваги приділити існуючим технологіям побудови оптичних транспортних систем, управління якими розглядається у п'ятому розділі роботи.

2. Для кращого розуміння мультиплощинної структурно-функціональної моделі децентралізованої мережі мобільного зв'язку в дисертаційній роботі бажано було навести приклади конкретних телекомунікаційних систем чи стандартів.

3. Запропонований метод адаптивного вибору оператора передбачає розрахунок інтегральної функції корисності, яка є сумою часткових функцій корисності різних параметрів якості сервісу. Проте, не зовсім зрозуміло, яким чином при сумуванні визначаються вагові коефіцієнти для кожного параметру якості сервісу.

4. З тексту другого розділу не зрозуміло, чи підтримує запропонована модель токенизації одночасне використання одних і тих самих елементів мережної інфраструктури кількома операторами.

5. У третьому розділі, автор розглядає процес децентралізованого синтезу топологічної структури операторами, який передбачає моделювання переміщення абонентів для навчання інтелектуального алгоритму SOM. Проте, з отриманих результатів незрозуміло, яким чином здійснювався розподіл абонентів між операторами в процесі імітаційного моделювання.

6. При моделюванні показників техніко-економічної ефективності



процесу спільного використання радіочастотного ресурсу операторами автор наводить лише залежності пропускної здатності, у той час як інші показники якості сервісу для абонента не розглядаються.

7. У дисертаційній роботі не проведено аналіз надійності запропонованих смарт-контрактів та їх захисту від несанкціонованих модифікацій.

8. Розроблений метод управління радіочастотним ресурсом передбачає прогнозування трафіку з використанням рекурентних нейронних мереж на основі архітектури LSTM. Проте, автором не зазначається, чому обрана саме ця архітектура, і яким чином використання інших альтернативних архітектур нейронних мереж вплине на ефективність управління радіочастотним ресурсом.

9. У роботі не проведено оцінювання складності навчання розроблених методів та моделей на основі штучного інтелекту та технології блокчейн, а також не уточнено з якою частотою оператори повинні оновлювати дані моделі.

### **Загальний висновок**

1. Дисертаційна робота Максимюка Тараса Андрійовича є завершеною науковою працею, що виконана здобувачем особисто на високому науковому рівні та вирішує 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.

2. Дисертаційна робота за основними науковими та практичними результатами відповідає вимогам Паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі за напрямками:

- Розроблення наукових основ побудови телекомунікаційних систем і мереж зв'язку.
- Розроблення методів аналізу, синтезу, оптимізації та проектування телекомунікаційних систем і мереж зв'язку з метою підвищення їх технічної й економічної ефективності.
- Розроблення ефективних методів розподілу інформації в телекомунікаційних системах і мережах зв'язку.
- Оптимізація якості функціонування телекомунікаційних систем і мереж зв'язку.
- Дослідження принципів керування телекомунікаційними системами та мережами зв'язку, шляхів створення техніки керування та розроблення методів її проектування.

3. У 86 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації. Матеріали дисертації достатньо апробовані, доповідались на міжнародних і всеукраїнських конференціях.

4. Структура дисертації є обґрунтованою. Автореферат об'єктивно і з

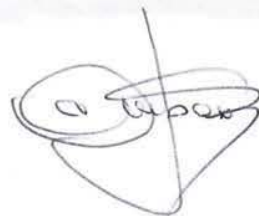
необхідною повнотою відображає зміст і основні положення дисертації.

5. Наведені зауваження не змінюють загальну позитивну оцінку наукової значимості та практичної цінності дисертаційної роботи.

6. За актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною значимістю одержаних результатів дисертаційна робота Максимюка Т. А. «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, відповідає вимогам для докторських дисертацій п.п. 9, 10, 12 чинного «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., з урахуванням змін та доповнень, 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 автоматизації  
проекування енергетичних процесів та систем  
Національного технічного  
університету України «Київський  
політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»  
доктор технічних наук, професор



Сергій ОТРОХ

Підпис д.т.н., професора Отроха С.І. засвідчую:

Вчений секретар Національного технічного  
університету України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»



Валерія ХОЛЯВКО