

УДК 621.391; 621.1.039

д-р техн. наук, професор Міночкін А. І. ORCID: 0000-0001-5723-5052 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
Бригадир С. П. ORCID: 0000-0003-1977-552X (ВІТІ ім. Героїв Крут)

## АНАЛІЗ РОЗВИТКУ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

Стаття присвячена комплексному аналізу ключових аспектів розвитку мереж зв'язку п'ятого покоління (5G) в Україні. Досліджено актуальні проблеми та перспективи впровадження 5G, враховуючи технологічні, економічні та регуляторні аспекти. Запропоновано математичні моделі та алгоритми для оптимізації розподілу радіочастотного спектра, розміщення базових станцій, впровадження віртуалізації мережевих функцій Network Function Virtualization (NFV) та програмно-конфігурованих мереж Software-Defined Networking (SDN), а також забезпечення якості обслуговування (QoS) для різних класів трафіку.

Розроблені рішення дозволяють підвищити ефективність розгортання та експлуатації 5G мереж в умовах обмежених ресурсів. Розроблено математичну модель оптимізації розподілу спектра з використанням лінійного програмування, яка враховує ефективність використання спектра різними операторами. Для оптимізації розміщення базових станцій запропоновано підхід на основі теорії ігор, що враховує обмеження на пропускну здатність та витрати на розміщення при забезпеченні необхідного покриття. Представлено математичну модель для оптимізації розміщення віртуалізованих мережевих функцій на серверах з обмеженими ресурсами з метою мінімізації витрат та забезпечення необхідної продуктивності. Запропоновано алгоритм на основі градієнтного спуску для динамічного управління ресурсами та забезпечення QoS.

На основі порівняльного аналізу методів оптимізації розроблено інтегрований підхід до вирішення ключових задач впровадження 5G. Запропоновано математичну модель оптимізації розподілу радіочастотного спектра на основі лінійного програмування, яка забезпечує підвищення спектральної ефективності на 23–27 % порівняно з базовими методами. Представлено теоретико-ігровий підхід до оптимізації розміщення базових станцій, що дозволяє знизити кількість перевантажених секторів на 45 % та підвищити енергоефективність на 13,3 %. Розроблено генетичний алгоритм оптимізації розміщення віртуалізованих мережевих функцій (VNF), який забезпечує на 21,4 % вищу утилізацію ресурсів. Експериментальні дослідження підтвердили, що запропоновані рішення дозволяють досягти загального підвищення ефективності мережі на 20–25 % при зниженні експлуатаційних витрат на 15–20 %. Результати створюють методологічну основу для ефективного планування та розгортання мереж 5G в Україні.

**Ключові слова:** 5G, оптимізація мереж, радіочастотний спектр, базові станції, віртуалізація мережевих функцій, теорія ігор, лінійне програмування, генетичні алгоритми, енергоефективність, якість обслуговування.

### **A. Minochkin, S. Brigadier Analysis of development of fifth generation communication networks**

The article is devoted to a comprehensive analysis of key aspects of the development of fifth-generation (5G) networks in Ukraine. Current problems and prospects for the implementation of 5G are studied, taking into account technological, economic and regulatory aspects. Mathematical models and algorithms are proposed for optimizing the allocation of radio frequency spectrum, placement of base stations, implementation of virtualization of network functions Network Function Virtualization (NFV) and software-configured networks Software-Defined Networking (SDN), as well as ensuring quality of service (QoS) for different classes of traffic.

The developed solutions allow to increase the efficiency of deployment and operation of 5G networks in conditions of limited resources. A mathematical model of spectrum allocation optimization using linear programming has been developed, which takes into account the efficiency of spectrum use by different operators. To optimize the placement of base stations, an approach based on game theory is proposed, which takes into account bandwidth limitations and placement costs while ensuring the necessary coverage. A mathematical model is presented for optimizing the placement of virtualized network functions on servers with limited resources in order to minimize costs and ensure the required performance. An algorithm based on gradient descent for dynamic resource management and QoS is proposed.

Based on a comparative analysis of optimization methods, an integrated approach to solving key problems of 5G implementation is developed. A mathematical model for optimizing the allocation of radio frequency spectrum based on linear programming is proposed, which provides an increase in spectral efficiency by 23–27 % compared to basic methods. A game-theoretic approach to optimizing the placement of base stations is presented, which allows reducing the number of overloaded sectors by 45 % and increasing energy efficiency by 13.3 %. A genetic algorithm for optimizing the placement of virtualized network functions (VNF) is developed, which provides a 21.4 % higher resource utilization. Experimental studies have confirmed that the proposed solutions allow achieving an overall increase in network efficiency by 20–25 % while reducing operating costs by 15–20 %. The results create a methodological basis for effective planning and deployment of 5G networks in Ukraine.

*Keywords: 5G, network optimization, radio frequency spectrum, base stations, network function virtualization, game theory, linear programming, genetic algorithms, energy efficiency, quality of service.*

**Постановка наукової задачі.** Мережі зв'язку п'ятого покоління (5G) являють собою новий етап еволюції мобільного зв'язку, що забезпечує значне підвищення швидкості передачі даних, зменшення затримки, збільшення пропускнуої спроможності та кількості абонентів в мережі. Технологія 5G відкриває широкі можливості для розвитку Інтернету речей (IoT), автономного транспорту, розумних міст, промислової автоматизації та багатьох інших інновацій.

Впровадження мереж 5G є складним технологічним викликом, що вимагає вирішення цілого комплексу наукових та інженерних задач. Це включає розробку нових методів модуляції та кодування сигналів, ефективних алгоритмів управління радіоресурсами, архітектурних рішень для програмно-конфігурованих мереж та віртуалізації мережевих функцій, а також забезпечення інформаційної безпеки та електромагнітної сумісності.

Особливу актуальність дослідження та розвиток технологій 5G мають для України, де існує нагальна потреба в модернізації телекомунікаційної інфраструктури та створенні умов для цифрової трансформації економіки. Впровадження мереж нового покоління дозволить підвищити конкурентоспроможність країни на світовому ринку, стимулювати інновації та створити нові робочі місця в сфері високих технологій.

Таким чином стаття присвячена комплексному аналізу ключових аспектів розвитку мереж зв'язку п'ятого покоління, включаючи технологічні, економічні та регуляторні питання. Особлива увага приділяється дослідженню специфіки та перспектив впровадження 5G в Україні з урахуванням існуючих обмежень.

**Наукова задача дослідження** полягає у розробці теоретичних основ та практичних рекомендацій щодо ефективного впровадження та розвитку мереж зв'язку п'ятого покоління в Україні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд наступних часткових задач:

1. Провести системний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку технологій 5G у світі та Україні;
2. Розробити математичні моделі алгоритмів оптимізації радіопокриття та управління ресурсами мереж 5G в умовах щільної міської забудови;
3. Розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо впровадження технологій мереж зв'язку п'ятого покоління.

Вирішення поставленої наукової задачі дозволить створити теоретичне підґрунтя та практичний інструментарій для ефективного впровадження мереж зв'язку п'ятого покоління в Україні.

**Аналіз останніх публікацій.** Дослідженню різних аспектів розвитку мереж п'ятого покоління присвячена значна кількість наукових праць.

Так фундаментальні принципи архітектури 5G та ключові технології детально розглянуто в роботах М. Shafi [1], Е. Dahlman [2], А. Osseiran [3]. Зокрема, в [1] представлено комплексний огляд архітектури 5G, включаючи нові концепції радіоінтерфейсу, віртуалізації мережевих функцій та програмно-конфігурованих мереж. Однак у вищезазначених наукових роботах недостатньо уваги приділено питанням сумісності з існуючими мережами минулих поколінь. Автори у [2] детально аналізують технології радіодоступу 5G New Radio, але обмежуються переважно теоретичними абстрактними аспектами без достатнього детального опису математичних моделей. В роботі [3] основна увага приділяється сценаріям використання 5G, однак в математичній моделі не враховано кількісних оцінок якості обслуговування для різних додатків.

Задачі планування та оптимізації радіопокриття мереж 5G досліджуються в роботах S. Parkvall et al. [4], Н. Holma [5], М. Agiwal [6]. Зокрема, в [4] запропоновано нові математичні

моделі поширення радіохвиль для міліметрового діапазону. У роботі [5] розглянуто особливості планування мереж 5G в умовах щільної міської забудови, проте не враховано специфіку сільських та приміських територій і складність рельєфу місцевості. В [6] представлено алгоритми адаптивної діаграми направлення формування променів антен, однак їх обчислювальна складність може обмежувати практичне застосування.

Економічні аспекти впровадження 5G комплексно проаналізовано в дослідженнях J. G. Andrews [7], S. Forge. [8]. Проте, більшість економічних моделей базуються на припущеннях, які потребують уточнення в міру розгортання реальних мереж. Зокрема, в [7] недостатньо враховано ризики, пов'язані з невизначеністю попиту на нові послуги. Автори [8] аналізують вплив регуляторної політики, але не розглядають сценарії потенційних змін у регулюванні.

Сучасний стан інформаційної безпеки мереж 5G розглядається в працях Y. Wu [9], I. Ahmad [10], M. Liyanage [11]. Зокрема, в [9] аналізуються нові виклики безпеки, пов'язані з архітектурними особливостями 5G. Автори [10] пропонують методи захисту від атак на інфраструктуру віртуалізованих мережевих функцій. В роботі [11] досліджуються питання конфіденційності та захисту персональних даних користувачів 5G.

В науковій роботі [12] пропонується інноваційний підхід до динамічного розподілу спектра, використовуючи методи машинного навчання. Автори демонструють значне підвищення спектральної ефективності на 20–30 % порівняно з традиційними статичними методами. Однак, дослідження не враховує потенційні проблеми масштабованості запропонованого алгоритму із врахуванням високої гетерогенності.

Проблема розподілу спектра частоти в контексті гетерогенних мереж 5G, застосовуючи теоретико-ігровий підхід, що розглянуто в роботі [13]. Запропонована модель враховує взаємодію між різними операторами та типами мережевих вузлів, що є суттєвим кроком вперед у розумінні динаміки розподілу спектра. Проте, автори не надають достатньо емпіричних даних для валідації своєї моделі при застосуванні в реальних умовах експлуатації.

Вчені у [14] фокусуються на проблемі енергоефективного розміщення базових станцій, пропонують алгоритм мінімізації енергоспоживання при збереженні якості обслуговування. Однак, у дослідженні не враховано потенційний вплив на продуктивність мережі в умовах пікових навантажень. Так у [15] наведено загальний огляд застосування NFV та SDN в мережах 5G та їх потенціал для підвищення гнучкості та ефективності мережевої інфраструктури. Проте, автори не приділяють достатньої уваги потенційним викликам безпеки, які виникають при впровадженні цих технологій.

У статті [16] представлено ґрунтовний огляд методів забезпечення QoS в мережах 5G, аналізуючи різні підходи до класифікації трафіку та управління ресурсами. Однак у дослідженні не наведено конкретних рекомендацій щодо вибору оптимальних методів для різних сценаріїв розгортання мереж 5G. Науковці в [17] пропонують інноваційну модель динамічного управління QoS на основі глибокого навчання, демонструючи її здатність адаптуватися до змін у мережевому трафіку. Однак, автори не надають достатньо інформації щодо обчислювальної складності запропонованого підходу та його практичної реалізації в умовах обмежених ресурсів мережевого обладнання.

Особливої уваги заслуговують дослідження українських науковців щодо специфіки впровадження технологій 5G в умовах України. Так, у роботі [18] проведено комплексний аналіз готовності телекомунікаційної інфраструктури України до розгортання мережі 5G. Автори наголошують на критичній важливості модернізації опорних мереж та транспортної інфраструктури для забезпечення необхідної пропускну здатності. Дослідження також висвітлює особливу актуальність впровадження 5G для відновлення телекомунікаційної інфраструктури на деокупованих територіях.

У дослідженні [19] розглядаються технічні аспекти забезпечення електромагнітної сумісності системи 5G з існуючими радіоелектронними засобами в умовах щільної міської забудови українських міст. Автор пропонує адаптовані методики частотного планування, що враховують специфіку використання радіочастотного ресурсу в Україні.

Важливий внесок у розуміння економічних аспектів впровадження 5G в Україні зроблено в роботі та співавторів [20]. Дослідники представили економічну модель розгортання мережі 5G з розрахунком поточного стану телекомунікаційної України та результатів інвестиційних ризиків в умовах воєнного стану ринку. Особливу увагу приділено механізмам державно-приватного партнерства для прискорення впровадження 5G.

У роботі [21] представлено результати моделювання покриття мережі 5G для різних типів місцевості України з урахуванням особливостей рельєфу та забудови. Дослідження демонструє необхідність адаптації стандартних моделей планування радіопокриття до конкретних умов України.

Таким чином аналіз наукової літератури показує, що незважаючи на значний обсяг досліджень у сфері 5G, залишається ряд невирішених проблем, особливо щодо специфіки впровадження цих технологій. Зокрема, недостатньо вивчені питання оптимізації розгортання мереж 5G з урахуванням існуючої телекомунікаційної інфраструктури, особливостей рельєфу та забудови українських міст. Також актуальним залишається задача розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо необхідних змін у регуляторній політиці для стимулювання розвитку 5G в Україні.

**Мета статті:** є розробка та обґрунтування науково-методологічного апарата та практико-орієнтованих рекомендацій щодо імплементації та масштабування мереж п'ятого покоління (5G) в Україні на основі комплексного аналізу технологічних, економічних та регуляторних аспектів їх функціонування.

**Виклад основного матеріалу.** На сьогодні актуальність проблеми масштабування мереж зв'язку п'ятого покоління в Україні зумовлює необхідність систематизації та формалізації ключових задач у вигляді математичних моделей, що дозволить розробити ефективні методи їх вирішення. У контексті дослідження в статті пропонується розглянути наступні фундаментальні аспекти розгортання мереж 5G:

1. Оптимізація розподілу радіочастотного спектра;
2. Оптиміальне розміщення базових станцій;
3. Впровадження технологій віртуалізації мережевих функцій (NFV) та програмно-конфігурованих мереж (SDN);
4. Забезпечення диференційованої якості обслуговування (QoS) для гетерогенних класів трафіку.

Кожен з вищезазначених аспектів потребує розробки відповідної математичної моделі, що повинна враховувати специфіку вітчизняного телекомунікаційного ринку та існуючі технологічні обмеження. Запропоновані моделі та алгоритми їх вирішення дозволять сформулювати комплексний підхід до оптимізації процесів розгортання та експлуатації мереж 5G в Україні.

У подальшому викладі матеріалу в статті буде представлено детальний аналіз кожної з вищезазначених задач, включаючи математичну формалізацію, обґрунтування вибору методів оптимізації в контексті специфіки українського ринку телекомунікацій.

**1. Оптимізація використання радіочастотного спектра.** Ефективне використання наявного радіочастотного ресурсу є критично важливим для розгортання мереж 5G. На сьогодні існує проблема обмеженості доступного спектра [22], особливо в низькочастотних діапазонах, які забезпечують широке покриття. В цьому випадку виникає необхідність розробки методів динамічного розподілу спектра між різними технологіями (2G/3G/4G/5G) та операторами.

Математично задачу оптимізації використання спектрального ресурсу можна сформулювати як задачу лінійного програмування. Нижче наведено цільову функцію математичної моделі, суть якої полягає у максимізації загальної ефективності використання ширини спектра усіх операторів у доступних діапазонах:

$$\max_{x_{ij}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} x_{ij}.$$

Обмеження: сумарна кількість спектра виділена кожному оператору, не перевищує встановлений та забезпечує відносно справедливий розподіл спектральних ресурсів:

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \leq b_i, \quad i = 1, \dots, N.$$

Формально, для кожного  $i$ -го оператора повинні виконуватися наступні умови:

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M.$$

де  $x_{ij}$  – кількість спектра в МГц, виділена  $i$ -му оператору в  $j$ -му діапазоні частот,  $c_{ij}$  – коефіцієнт ефективності використання спектра,  $b_i$  – максимальна кількість спектра для  $i$ -го оператора,  $d_j$  – доступна ширина  $j$ -го діапазону,  $N$  – кількість операторів,  $M$  – кількість частотних діапазонів.

Необхідно зазначити, що коефіцієнти ефективності  $c_{ij}$  можуть враховувати технологічні особливості різних поколінь мобільного зв'язку, характеристики частотних діапазонів та специфіку їх використання конкретними операторами. Також коефіцієнти ефективності можуть бути визначені на основі експериментальних даних або теоретичних розрахунків із урахуванням таких факторів як спектральна ефективність технологій, особливості поширення радіохвиль у різних діапазонах, інфраструктура операторів тощо.

**2. Оптимізація розміщення базових станцій.** Також необхідно врахувати в процесі планування мережі 5G особливості міської забудови, рельєфу місцевості та оптимального розміщення базових станцій. Тому з'являється необхідність математичної формалізації вищезазначеної задачі оптимізації, суть якої полягає у мінімізації кількості базових станцій при забезпеченні заданого рівня покриття та пропускної спроможності мережі.

Задачу оптимізації розміщення базових станцій математично представлено нижче в рівнянні:

$$\min_{y_i} \sum_{i=1}^K y_i$$

за умов

$$\sum_{i=1}^K a_{ij} y_i \geq 1, \quad j = 1, \dots, M,$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, K,$$

де  $y_i$  – бінарна змінна, що визначає розміщення  $i$ -ї базової станції,  $a_{ij}$  – покриття  $j$ -ї точки  $i$ -ю базовою станцією,  $M$  – кількість точок покриття.

Для врахування пропускної спроможності мережі необхідно додати обмеження, які повинні забезпечити умови розподілу навантаження на кожен базову станцію, не перевищуючи її максимальної пропускної здатності.

Рішення вищенаведеної задачі може бути представлено як задача на основі теорії [13] з наступними обмеженнями:

кожний  $j$ -ий абонент має покриття не менше ніж від однієї базової станції

$$\sum_{i=1}^K x_{ij} \geq 1, \quad \forall j = 1, \dots, M;$$

допущення, що для  $j$ -го абонента може бути призначена базова станція, яка розміщена в зоні покриття ( $a_{ij} = 1$ )

$$x_{ij} \leq a_{ij}y_i, \forall i = 1, \dots, K; \forall j = 1, \dots, M;$$

сумарне навантаження на будь-яку  $i$ -ту базову станцію не перевищує її максимальну пропускну здатність  $C_i$

$$\sum_{j=1}^M d_j x_{ij} \leq C_i y_i, \quad \forall i = 1, \dots, K;$$

бінарні параметри:  $y_i \in \{0,1\}, \forall i = 1, \dots, K; x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i = 1, \dots, K; \forall j = 1, \dots, M,$

де  $d_j$  – вимога пропускну здатності для  $j$ -го абонента,  $C_i$  – максимальна пропускну здатність  $i$ -ї базової станції,  $x_{ij}$  – бінарна змінна, яка визначає, чи точка  $j$  обслуговується базовою станцією  $i$ .

Використовуючи концепції теорії ігор, можливо моделювати процес розміщення БС як гру з кооперативними чи некооперативними гравцями. Один із підходів — застосування теорії ігор покриття (Covering Games), де гравці прагнуть мінімізувати свої витрати при забезпеченні загального покриття мережі.

**Основні кроки підходу:**

**Модель гравців:** потенційна БС є самостійним гравцем, що приймає рішення про своє розміщення.

**Стратегії:** гравці вибирають стратегію розміщення або відмови від розміщення.

**Функція виграшу:** визначається як баланс між витратами на розміщення та прибутком від обслуговування абонентів.

**Досягнення рівноваги:** використання концепції рівноваги Неша для визначення стану розміщення БС, де жодний гравець немає мотивації змінювати свою стратегію одноособово.

**3. Впровадження віртуалізації мережевих функцій (NFV) та програмно-конфігурованих мереж (SDN).** З огляду на зростаючі вимоги в пропускну здатності, що пред'являються до мереж 5-го покоління, актуальним є питання забезпечення їх масштабованості із одночасним зниженням капітальних та операційних витрат. У цьому контексті, перспективним напрямком розвитку є впровадження технологій віртуалізації мережевих функцій (NFV) та програмно-конфігурованих мереж (SDN).

Технологія NFV дозволяє абстрагувати мережеві функції, такі як маршрутизація, брандмауер та балансування навантаження від апаратного забезпечення та реалізувати їх у вигляді віртуальних машин на стандартних серверах. Це дає змогу операторам мобільного зв'язку динамічно розгортати та масштабувати мережеві функції відповідно до поточних потреб, оптимізуючи використання ресурсів та зменшуючи витрати на апаратне забезпечення.

Технологія SDN, в свою чергу, забезпечує централізоване управління мережею шляхом відділення контрольної площини від площини передачі даних. Це дозволяє автоматизувати налаштування мережі та оптимізувати її роботу в режимі реального часу, адаптуючись до змін трафіку та потреб користувачів.

Впровадження NFV та SDN у мережах 5G відкриває нові можливості для рішення наступних підзадач:

динамічного розподілу ресурсів та забезпечення оптимального використання ресурсів мережі, залежно від потреб користувачів;

мінімізація ресурсних витрат на основні компоненти апаратного забезпечення та автоматизації процесів управління;

підвищення гнучкості та масштабованості забезпечуючи швидке розгортання нових послуг та адаптацію до змін відносно потреб користувачів;

спрощення управління мережею завдяки централізованому контролю та автоматизації.

Таким чином, NFV та SDN є ключовими технологіями для забезпечення ефективної та масштабованої роботи мереж 5G, що дозволяє операторам зв'язку задовольнити зростаючі потреби користувачів.

Математично модель можна представити наступним чином.

Нехай множина мережевих функцій:  $\mathcal{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ , де кожна функція  $f_i$  відповідає за певну мережеву операцію. Абстрагуючи ці функції від апаратного забезпечення, можливо динамічно, відносно потреб користувачів, розміщувати їх на віртуальних машинах (VMs), що забезпечує адаптивність до змін у процесі розподілу навантаження.

Нехай множина віртуальних машин:  $\mathcal{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ , де кожна  $VM(v_j)$  має обмежені ресурси, такі як процесор (CPU), оперативна пам'ять (RAM) та пропускна здатність (Bandwidth, BW). Ресурси  $VM(v_j)$  визначаються функцією  $R_j = \{CPU_j, RAM_j, BW_j\}$ . Також необхідно зазначити важливість забезпечення задачі розподілу мережевих функцій між VM, для оптимізації використання ресурсів та продуктивності мережі.

Тоді мережа 5G обслуговує множину запитів відносно послуг:  $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ , де кожен запит ( $s_l$ ) вимагає виконання певної послідовності мережевих функцій  $\{f_{i_1}, f_{i_2}, \dots, f_{i_p}\}$ , що відповідають специфічним вимогам послуг. Вимоги можуть включати параметри якості обслуговування (QoS), пропускну здатність, затримку тощо.

Програмно-конфігуровані мережі (SDN) використовують центральний контролер  $C$ , який відповідає за управління мережею. Контролер відділяє контрольну площину від площини передачі даних, що дозволяє централізовано керувати маршрутизацією, розподілом ресурсів та конфігурацією мережі в режимі реального часу. Це забезпечує автоматизацію налаштування мережі та її оптимізацію, відповідно до поточних потреб трафіку та користувачів.

Нижче наведено математично задачу оптимального розміщення віртуалізованих мережевих функцій

Метою моделі є мінімізація загальних капітальних та операційних витрат, пов'язаних з розміщенням мережевих функцій та управлінням ресурсами. Цільова функція формулюється наступним чином:

$$\min \sum_{j=1}^m \left( C_j * \sum_{i=1}^n x_{i,j} + O_j * y_{i,j} \right),$$

де  $C_j$  – капітальні витрати на  $VM(v_j)$ , включаючи вартість придбання та встановлення апаратного забезпечення,  $O_j$  – операційні витрати за виділені ресурси на  $VM(v_j)$ , включаючи електроенергію, охолодження та інші експлуатаційні витрати ( $x_{i,j}$ ) та ( $y_{i,j}$ ) – розміщення та розподіл ресурсів, відповідно.

Для забезпечення процесами розміщення функціональних вузлів та управління ресурсами модель включає низку обмежень та допущень:

кожна функція буде виконуватися хоча б на одній віртуальній машині, забезпечуючи необхідну функціональність мережі, що наведено нижче

$$\sum_{j=1}^m x_{i,j} \geq 1, \forall f_i \in \mathcal{F}$$

сумарне використання ресурсів на будь-якій VM не повинно перевищувати доступні ресурси, що описується наступними рівняннями

$$\sum_{i=1}^n y_{i,j} \leq R_j, \forall v_j \in \mathcal{R},$$

де  $R_j$  – вектор доступних ресурсів на кожній  $VM(v_j)$ , що, забезпечує розподіл ресурсів для розміщених функціональних вузлів не призведе до перевантаження віртуальної машини.

Нижче наведена математична формалізація умови розміщення функцій відносно розподілу ресурсів.

Нехай  $\mathcal{F}$  – множина функцій, а  $\mathcal{R}$  – множина віртуальних машин (VM). Введемо бінарну змінну  $x_{i,j}$ , яка визначає розміщення функції  $f_i \in \mathcal{F}$  на віртуальній машині  $v_j \in \mathcal{R}$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{якщо функція } f_i \text{ розміщена на VM } v_j \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}.$$

Тоді умову виділення ресурсів можна представити наступним чином

$$y_{i,j} \leq M \cdot x_{i,j}, \forall f_i \in \mathcal{F}, \forall v_j \in \mathcal{R},$$

де  $y_{i,j}$  – кількість ресурсів, розподілених для функції  $f_i$  на віртуальній машині  $v_j$ , а  $M$  – константа.

Вищенаведена нерівність забезпечує логічний зв'язок між розміщенням функції та розподілу ресурсів тобто ресурси, що можуть бути розподілені для  $f_i$  на віртуальній машині  $v_j$  якщо  $y_{i,j} > 0$  у випадку якщо сама функція розміщена на VM тобто  $x_{i,j} = 1$ . Сталу  $M$  необхідно вибирати достатньо великою, щоб не обмежувати кількість виділених ресурсів у випадку, коли функція дійсно розміщена на даній VM. Водночас, якщо  $x_{i,j} = 0$ , тоді  $y_{i,j}$  буде примусово встановлено на нуль, що відповідає відсутності розподілених ресурсів для функції, які не розміщені на даній VM.

Обмеження враховує поточні запити на послуги та забезпечує достатнє виділення ресурсів для їх виконання

$$\sum_{s \in \mathcal{R}} d_s * f_i \leq \sum_{j=1}^m y_{i,j}, \forall f_i \in \mathcal{F},$$

де  $d_s$  – вимоги до ресурсів для послуги  $s$ .

Необхідно зазначити, що математична задача розміщення VNF на серверах з обмеженими ресурсами є варіацією задачі призначення (Assignment Problem). З урахуванням цілочислових змінних та обмежень, задача Assignment Problem класифікується як NP-нетривіальна. Це означає, що для значної кількості параметрів та змінних задача знаходження оптимального рішення методом повного перебору є непрактичною. Тому одним із варіантів вирішення математичної задачі є генетичний алгоритм.

**4. Забезпечення якості обслуговування (QoS) для різних класів трафіку.** Мережі 5G повинні підтримувати широкий спектр послуг із різними вимогами до QoS. Необхідно розробити алгоритми динамічного управління ресурсами для забезпечення заданої якості відповідно QoS.

Задачу оптимізації розподілу ресурсів з урахуванням QoS можна представити як

$$\max_{x_i} \sum_{i=1}^N U_i(x_i)$$

за умов

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq C, x_i \geq x_i^{\min}, \quad i = 1, \dots, N,$$

де  $U_i(x_i)$  – функція корисності для  $i$ -го класу трафіку,  $x_i$  – розподіленні ресурси,  $C$  – загальна кількість ресурсів,  $x_i^{\min}$  – мінімальні вимоги до ресурсів.

Мережі 5G характеризуються високою динамікою змін навантаження та різноманітністю сервісів, що вимагають гнучкого управління ресурсами.

**Експериментальний аналіз дослідження ефективності задач оптимізації мереж 5G.** Впровадження мереж п'ятого покоління вимагає комплексного підходу до верифікації та валідації запропонованих методів оптимізації. В рамках даного дослідження розроблено методологію експериментальної перевірки ефективності запропонованих рішень, що включає імітаційне моделювання та порівняльний аналіз з існуючими підходами.

Модель розміщення базових станцій формалізується як:

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}, b_i \in A,$$



де  $A$  представляє множину допустимих точок розміщення з урахуванням топології місцевості. Кожна базова станція  $b_i$  характеризується вектором параметрів: географічні координати, висота встановлення антен, потужність передавачів, параметри антенної системи, зона обслуговування.

При цьому також враховуються такі фактори як – особливості рельєфу місцевості, наявність високих будівель, щільність населення, існуюча телекомунікаційна інфраструктура.

Модель віртуалізації мережевих функцій описується як

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}, v_i \in R,$$

де  $R$  – множина доступних обчислювальних ресурсів. Кожна віртуальна функція  $v_i$  характеризується вимогами до обчислювальних ресурсів, затримкою обробки, надійністю, масштабованістю.

**Математична модель імітаційного середовища.** Для забезпечення комплексної оптимізації всіх аспектів функціонування мережі 5G, розроблено інтегральну цільову функцію

$$\max_{x,y,z} (\alpha \cdot E_s(x) + \beta \cdot E_b(y) + \gamma \cdot E_v(z)),$$

де  $E_s(x)$  – функція ефективності розподілу спектра, що враховує спектральну ефективність, рівень інтерференції, якість обслуговування;  $E_b(y)$  – функція ефективності розміщення БС, що включає покриття території, ємність мережі, енергоефективність;  $E_v(z)$  – функція ефективності віртуалізації, що оцінює утилізацію ресурсів, затримку обробки пакетів даних, надійність системи.

Вагові коефіцієнти  $\alpha, \beta, \gamma$  визначають пріоритетність різних аспектів оптимізації та можуть коригуватися залежно від конкретних вимог до мережі.

При цьому система обмежень забезпечує врахування фізичних та технічних обмежень:  $C_s$  – доступний частотний ресурс,  $C_b$  – обмеження на кількість та розміщення БС,  $C_v$  – доступні обчислювальні ресурси, що наведені нижче:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i \leq C_s \\ \sum_{j=1}^m y_j \leq C_b \\ \sum_{k=1}^p z_k \leq C_v \end{cases} .$$

Для проведення комплексного аналізу ефективності запропонованих рішень розроблено багаторівневе імітаційне середовище на основі мови програмування python 3.10, що дозволяє моделювати функціонування мережі 5G з урахуванням різних факторів впливу. Математично модель імітаційного середовища можна представити як систему взаємопов'язаних компонентів

$$\mathcal{M} = \{\mathcal{N}, \mathcal{R}, \mathcal{T}, \mathcal{U}\}.$$

де  $\mathcal{N}$  – модель мережевої інфраструктури,  $\mathcal{R}$  – модель радіоресурсів,  $\mathcal{T}$  – модель трафіку,  $\mathcal{U}$  – модель користувачів.

Модель мережевої інфраструктури  $\mathcal{N}$  включає множину базових станцій та їх характеристики

$$\mathcal{N} = \{BS_i(x_i, y_i, P_i, G_i)\}, i = 1, \dots, N,$$

де  $(x_i, y_i)$  – координати розміщення  $i$ -ї базової станції,  $P_i$  – потужність передавача,  $G_i$  – параметри антенної системи.

Також в моделі враховано специфіку міської забудови та особливості поширення радіохвиль у різних умовах. Для цього використано модифіковану модель Окумура-Хата [23], що враховує додаткові втрати в умовах щільної забудови

$$L = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_B + [44.9 - 6.55 \log h_B] \log d + C_M,$$

де  $L$  – втрати на трасі в дБ,  $f_c$  – частота в МГц,  $h_B$  – висота базової станції,  $d$  – відстань,  $C_M$  – поправочний коефіцієнт для міського середовища.

Для моделювання трафіку використано багатовимірний пуассонівський процес зі змінною інтенсивністю, що дозволяє врахувати добову динаміку навантаження

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot f(t) \cdot g(x, y),$$

де  $\lambda_0$  – базова інтенсивність трафіку,  $f(t)$  – функція добової зміни навантаження,  $g(x, y)$  – функція просторового розподілу трафіку.

Особливістю розробленої імітаційної моделі є можливість одночасного врахування різних класів трафіку з різними вимогами до якості обслуговування (QoS). Для кожного класу  $k$  визначено вектор вимог

$$QoS_k = (R_k, D_k, J_k, L_k),$$

де  $R_k$  – необхідна швидкість передачі,  $D_k$  – допустима затримка,  $J_k$  – джитер,  $L_k$  – допустимі втрати пакетів.

В процесі моделювання для кожного абонента розраховується фактична якість обслуговування на основі поточного розподілу ресурсів та умов поширення сигналу

$$QoS_{actual} = f(SINR, BW, Load),$$

де  $SINR$  – відношення сигнал/шум+завади,  $BW$  – виділена смуга частот,  $Load$  – поточне навантаження на сектор.

**Формалізація умов моделювання.** Для забезпечення повноти та достовірності результатів моделювання, розроблено систему взаємопов'язаних моделей, кожна з яких відповідає за певний аспект функціонування мережі 5G. Математично це можна представити у вигляді трьох ключових компонентів:

1. Модель розподілу радіочастотного спектра представлена як множина доступних частотних ресурсів

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, s_i \in F,$$

де  $F$  – множина доступних частотних діапазонів, визначених згідно зі специфікацією 3GPP для 5G NR. Кожен елемент  $s_i$  характеризується своїми параметрами – центральна частота, ширина смуги, допустима потужність випромінювання, обмеження на використання.

Важливо зазначити, що для кожного частотного діапазону враховуються особливості поширення радіохвиль та можливі інтерференційні обмеження. Це особливо актуально для міліметрового діапазону, де значний вплив мають атмосферні явища та перешкоди.

Для формалізації аналізу стійкості розроблено математичну модель, що базується на оцінці чутливості системи до збурень. Основним інструментом аналізу є функція чутливості:

$$S(x, \Delta) = \frac{|f(x+\Delta) - f(x)|}{|\Delta|},$$

де  $f(x)$  – цільова функція, що характеризує якість роботи системи,  $\Delta$  – вектор збурень, що включає показники навантаження, відмови обладнання, флуктуації радіоумов, зміни топології мережі,  $\|\cdot\|$  – норму вектора, що визначає масштаб змін.

**Для забезпечення об'єктивності оцінки ефективності** запропонованих алгоритмів розроблено комплексний підхід до верифікації, що базується на статистичному аналізі відхилень прогнозованих значень від реальних показників. Математично цей процес представлено на основі мінімізації цільової функції відхилення:

$$J = \sum_{i=1}^N \left( \frac{|y_i^{pred} - y_i^{real}|}{y_i^{real}} \right)^2 \rightarrow \min,$$

де  $y_i^{pred}$  – значення, прогнозовані моделлю,  $y_i^{real}$  – фактичні значення, отримані з реальних мереж,  $N$  – кількість точок верифікації.

Верифікація моделі здійснюється за кількома ключовими групами параметрів мережі. До першої групи відносяться показники радіопокриття, що включають оцінку рівня сигналу в зоні обслуговування, аналіз відношення сигнал/шум та дослідження пропускну здатності каналів зв'язку.

Друга група параметрів охоплює характеристики мережевого трафіку, зокрема його інтенсивність та розподіл за різними видами послуг, а також поведінку мережі при пікових навантаженнях.

Третя група зосереджена на параметрах якості обслуговування абонентів, що включає оцінку часових затримок при передачі даних, варіації цих затримок (джитер) та аналіз втрат пакетів під час передачі інформації через мережу.

Такий комплексний підхід до верифікації дозволяє всебічно оцінити відповідність розробленої моделі реальним умовам функціонування мережі та визначити напрямки її можливого вдосконалення.

### Оцінка точності моделей

Для комплексної оцінки точності розроблених моделей використовується система метрик, що дозволяє оцінити різні аспекти їх адекватності. Основними показниками є:

#### 1. Середньоквадратична похибка (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^{pred} - y_i^{real})^2},$$

Цей показник дозволяє оцінити абсолютну точність прогнозування та має особливе значення при аналізі критичних параметрів мережі, таких як – затримка для сервісів реального часу, пропускна здатність для широкосмугових послуг, ємність мережі в пікові години навантаження.

#### 2. Коефіцієнт детермінації ( $R^2$ )

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{pred} - y_i^{real})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i^{real} - \bar{y})^2}.$$

Даний показник характеризує якість апроксимації реальних даних моделлю та дозволяє оцінити варіативність досліджуваних параметрів і враховуються такі аспекти: стаціонарність процесів, сезонні коливання, довгострокові тренди.

Для обґрунтування ефективності запропонованих методів проведено їх порівняльний аналіз з існуючими підходами до оптимізації мереж 5G на основі комплексної системи критеріїв оцінки, що математично описується багатовимірним вектором

$$K = (k_1, k_2, k_3, k_4, k_5),$$

де  $k_1$  – компонента вектора, що характеризує ефективність використання мережевих ресурсів і включає оцінку спектральної ефективності системи, показники енергоефективності обладнання та ступінь утилізації наявних обчислювальних потужностей,  $k_2$  – відображає часові характеристики збіжності алгоритмів управління, враховуючи швидкість знаходження оптимальних рішень, стабільність процесу збіжності та здатність системи функціонувати в режимі реального часу,  $k_3$  визначає масштабованість запропонованих рішень через оцінку можливостей розширення мережевої інфраструктури, її спроможність адаптуватися до зростаючого навантаження та гнучкість конфігурації системи, параметр  $k_4$  характеризує стійкість системи до зовнішніх збурень, що проявляється у робастності при зміні умов функціонування, здатності адаптуватися до відмов обладнання та забезпеченні стабільної роботи мережі,  $k_5$  відображає обчислювальну складність реалізації, враховуючи вимоги до технічних ресурсів, можливості розпаралелювання обчислень та загальну ефективність програмної реалізації алгоритмів.

В процесі моделювання досліджено роботу мережі при різних сценаріях навантаження та конфігураціях обладнання. Особливу увагу приділено аналізу поведінки системи в критичних режимах, таких як:

1. Пікові навантаження в годину найбільшого навантаження (ГНН);
2. Відмови окремих елементів мережевої інфраструктури;
3. Різкі зміни характеру трафіку;

## 4. Виникнення локальних перевантажень.

Для кожного сценарію проведено серію з 1000 незалежних випробувань з різними початковими умовами для забезпечення статистичної достовірності результатів. Результати моделювання показали, що запропоновані алгоритми оптимізації забезпечують:

а) аналіз обчислювальної складності.

Важливим аспектом практичного впровадження запропонованих рішень є оцінка їх обчислювальної складності та вимог до обчислювальних ресурсів.

б) асимптотичний аналіз.

Для кожного розробленого алгоритму проведено детальний аналіз обчислювальної складності.

## 1. Часова складність

$$T(n) = O(g(n)),$$

де  $g(n)$  – асимптотична оцінка, що враховує кількість операцій, складність обчислень, залежність від розміру вхідних даних, особливості реалізації.

## 2. Просторова складність

$$M(n) = O(h(n)),$$

де  $h(n)$  характеризує вимоги до пам'яті з урахуванням структур даних, проміжних обчислень, системних вимог, масштабованості рішення.

## Оцінка масштабованості

Особливу увагу приділено аналізу ефективності паралельного виконання алгоритмів, що критично важливо для обробки даних у реальному часі. Ефективність паралелізації оцінюється через

$$E(p) = \frac{T(1)}{p \cdot T(p)},$$

де:  $p$  – кількість паралельних процесів,  $T(1)$  – час послідовного виконання,  $T(p)$  – час паралельного виконання.

Нижче наведено параметризація моделі в таблицях 1–3.3.

У розробленій системі моделювання мережі 5G використовується комплексний набір вхідних та вихідних параметрів, що забезпечують всебічний аналіз функціонування мережі. В якості основних вхідних параметрів конфігурації розглядаються: кількість базових станцій (1–1000 шт.), кількість користувачів (1–10000 шт.), тривалість симуляції (1–168 годин) та розмір зони покриття (100–10000 метрів). Радіочастотні характеристики системи визначаються робочою частотою в діапазоні 0,7–100 ГГц, шириною смуги пропускання 1–400 МГц та потужністю передавача 20–46 дБм. Важливими параметрами є також висота антен базових станцій (10–100 м) та користувацьких пристроїв (1–2 м).

Для моделювання впливу навколишнього середовища враховуються параметри рельєфу місцевості з роздільною здатністю 50–500 точок та кількістю топографічних піків 10–200, а також стандартне відхилення завмирань 4–12 дБ. Система також враховує коефіцієнт шуму приймача 5–12 дБ та мінімальне допустиме відношення сигнал/шум+інтерференція від –20 дБ до 0 дБ.

В процесі моделювання системи застосовується набір вихідних метрик, що характеризують ефективність мережі. Ключовими показниками є спектральна ефективність (0,1–10 біт/с/Гц), мережева пропускна здатність (1–1000 Гбіт/с) та користувацька пропускна здатність (0,1–1 Гбіт/с). Якість обслуговування оцінюється через параметри затримки (1–100 мс), надійності (0,9–0,9999) та рівня інтерференції (1e12–1e6 мВт). Додатково аналізується енергоефективність системи (1–1000 біт/мВт) та навантаження на базові станції (0–1).

Оптимізація мережі здійснюється за трьома основними напрямками – розподіл спектра між операторами, розміщення базових станцій та розподіл віртуальних мережевих функцій.

Для кожного напрямку визначаються відповідні метрики ефективності, такі як матриця розподілу спектра, карта покриття території та показники утилізації серверної інфраструктури. При цьому враховуються фізичні обмеження на максимальну потужність передавачів, ресурсні обмеження доступного спектра та серверних потужностей, а також вимоги до якості обслуговування.

Таблиця 1

**Вхідні параметри конфігурації**

Параметр	Тип даних	Опис	Одиниці виміру	Діапазон значень
num bs	int	Кількість базових станцій	шт.	1–1000
num users	int	Кількість користувачів	шт.	1–10000
simulation time	int	Тривалість симуляції	години	1–168
area size	float	Розмір зони покриття	метри	100–10000
frequency	float	Робоча частота	ГГц	0.7–100
bandwidth	float	Ширина смуги пропускання	МГц	1–400
tx power	float	Потужність передавача	дБм	20–46
noise figure	float	Коефіцієнт шуму приймача	дБ	5–12
antenna height	float	Висота антени БС	метри	10–100
user antenna height	float	Висота антени користувача	метри	1–2
min sinr	float	Мінімальне SINR	дБ	-20–0
terrain resolution	int	Роздільна здатність рельєфу	точки	50–500
num peaks	int	Кількість піків рельєфу	шт.	10–200
peak bs ratio	float	Частка БС на піках	-	0–1
user density influence	float	Вплив щільності користувачів	-	1–100
slope influence	float	Вплив нахилу рельєфу	-	0–10
shadow fading std	float	СКВ завмирань	дБ	4–12
min distance	float	Мінімальна відстань	метри	1–100
latency factor	float	Коефіцієнт затримки	-	0.1–10
energy consumption per bs	float	Енергоспоживання БС	Вт	50–500
server capacity	int	Ємність серверів	VNF	10–1000
operational cost reduction	float	Зниження операційних витрат	-	0–1

Таблиця 2

**Вихідні метрики**

Метрика	Тип даних	Опис	Одиниці виміру	Типовий діапазон
spectral efficiency	numpy.ndarray	Спектральна ефективність	біт/с/Гц	0.1–10
network capacity	numpy.ndarray	Пропускна здатність мережі	біт/с	1e6–1e12
user throughput	numpy.ndarray	Пропускна здатність користувачів	біт/с	1e5–1e9
sinr values	numpy.ndarray	Значення SINR	дБ	-10–30
energy efficiency	numpy.ndarray	Енергоефективність	біт/мВт	1–1000
latency	numpy.ndarray	Затримка	мс	1–100
reliability	numpy.ndarray	Надійність	-	0.1–0.999
interference levels	numpy.ndarray	Рівні інтерференції	мВт	1e12–1e6
bs load	numpy.ndarray	Навантаження на БС	-	0–1

Таблиця 3

**Метрики оцінки рішень**

Категорія	Метрика	Тип даних	Одиниці виміру	Характеристика
Продуктивність	Час виконання	float64	секунди	Час до отримання рішення
Ефективність	Спектральна ефективність	float64	біт/с/Гц	Ефективність використання спектра

Ефективність	Покриття території	float64	%	Відсоток покритої території
Утилізація серверів	Утилізація серверів	float64	%	Коефіцієнт використання ресурсів
Збіжність	Кількість ітерацій	int	-	Швидкість збіжності
Стабільність	Стабільність	float64	-	Варіація результатів
Масштабованість	Часова складність	string	$O(n)$ нотація	-
Масштабованість	Просторова складність	string	$O(n)$ нотація	-

Таблиця 4

#### Параметри спектральної оптимізації

Параметр	Тип даних	Опис	Формат
allocation_matrix	numpy.ndarray	Матриця розподілу спектра	$N \times M$ матриця
total_efficiency	float	Загальна ефективність	Скаляр
convergence_time	float	Час збіжності	Секунди

Таблиця 4.1

#### Параметри розміщення базових станцій

Параметр	Тип даних	Опис	Формат
bs_coordinates	numpy.ndarray	Координати БС	$N \times 2$ матриця
coverage_map	numpy.ndarray	Карта покриття	$M \times M$ матриця
optimization_metric	float	Метрика оптимізації	Скаляр

Таблиця 4.2

#### Параметри розміщення VNF

Параметр	Тип даних	Опис	Формат
vnf_placement	dict	Розміщення VNF	{vnf id: server id}
server_utilization	numpy.ndarray	Утилізація серверів	Вектор
total_cost	float	Загальна вартість	Скаляр

Результати моделювання представлено в таблицях 5–7. Аргументація вибору алгоритмів для порівняльного аналізу ефективності оптимізації мереж п'ятого покоління базувався на комплексному аналізі сучасного стану досліджень та практичних потреб галузі.

Так для задачі оптимізації розподілу радіочастотного спектра було обрано метод лінійного програмування як базовий підхід через його математичну строгість та доведену ефективність у вирішенні задач розподілу ресурсів. Жадібний алгоритм включено до порівняльного аналізу як представник простих та обчислювально ефективних методів, що часто використовуються в реальних системах через свою швидкість. Метод динамічного програмування обрано через його здатність знаходити оптимальні рішення для підзадач та ефективно комбінувати їх, що особливо важливо при роботі з багатовимірними просторами рішень. Генетичний алгоритм включено як представник еволюційних методів оптимізації, здатних ефективно знаходити близькі до оптимальних рішень, у випадках нелінійних цільових функцій.

При виборі методів оптимізації розміщення базових станцій теоретико-ігровий підхід було обрано через його здатність моделювати складні взаємодії між різними компонентами мережі та враховувати конкуруючі цілі операторів. Також в порівняльному аналізі застосовуються метод *K-means* кластеризація, який характеризується високою ефективністю у вирішенні задач сегментації та локалізації об'єктів у багатовимірному просторі ознак через ітеративне уточнення центроїдів кластерів та перерозподіл елементів між ними. Алгоритм мурашиної колонії обрано як представник методів ройового інтелекту, здатних ефективно вирішувати комбінаторні задачі оптимізації та адаптуватися до змін у середовищі.

У контексті оптимізації розміщення віртуалізованих мережевих функцій (VNF) імплементовано метаевристичний підхід на основі генетичного алгоритму, що демонструє високу ефективність при вирішенні NP-складних задач комбінаторної оптимізації з множинними обмеженнями. Градієнтний метод застосовано як класичний підхід до оптимізації, що забезпечує швидку збіжність у випадках гладких цільових функцій. Алгоритм найближчого сусіда представляє прості евристичні методи, які, як правило, застосовуються в практичних реалізаціях у зв'язку із його обчислювальною ефективністю. Метод гілок та границь обрано як представник точних методів оптимізації, здатних знаходити глобально оптимальні рішення.

Важливим критерієм при виборі алгоритмів була їх практична реалізованість та можливість масштабування для роботи з мережами різного розміру. Також враховувались адаптивні властивості алгоритмів до специфічних умов функціонування мереж 5G, включаючи динамічну природу трафіку, гетерогенність мережевої інфраструктури та необхідність забезпечення якості обслуговування для різних класів послуг.

Додатковим фактором при виборі алгоритмів, стала їх здатність працювати в умовах неповної або неточної інформації, що характерно для реальних мережевих середовищ. Обрані алгоритми представляють різні підходи до вирішення оптимізаційних задач, від простих евристик до складних адаптивних методів, що дозволяє провести всебічний аналіз їх ефективності в різних умовах функціонування мережі.

Таблиця 4

**Результати порівняння алгоритмів для задачі розподілу спектра**

Кількість операторів (n)	Кількість діапазонів (m)	Алгоритм	Спектральна ефективність (біт/с/Гц)	Час виконання (секунди)
50	20	Лінійне програмування	7.8	12.5
50	20	Жадібний алгоритм	6.5	3.2
50	20	Динамічне програмування	7.2	8.7
50	20	Генетичний алгоритм	7.5	15.3
100	40	Лінійне програмування	8.5	25.1
100	40	Жадібний алгоритм	7.0	6.5
100	40	Динамічне програмування	7.9	18.4
100	40	Генетичний алгоритм	8.2	30.7
200	80	Лінійне програмування	9.1	50.3
200	80	Жадібний алгоритм	7.5	13.0
200	80	Динамічне програмування	8.4	35.6
200	80	Генетичний алгоритм	8.8	60.2

Таблиця 6

**Результати порівняння алгоритмів для задачі розміщення БС**

Кількість базових станцій (num_bs)	Алгоритм	Покриття території (%)	Час виконання (секунди)	Енергоефективність (біт/мВт)
100	Теоретико-ігровий підхід	95	20.5	850
100	K-means кластеризація	90	15.3	750
100	Алгоритм мурашиної колонії	92	18.7	800
200	Теоретико-ігровий підхід	96	40.2	900
200	K-means кластеризація	91	30.1	780
200	Алгоритм мурашиної колонії	93	35.4	830
500	Теоретико-ігровий підхід	97	100.5	950
500	K-means кластеризація	92	75.3	800
500	Алгоритм мурашиної колонії	94	85.6	850

Таблиця 7

## Результати порівняння алгоритмів для задачі розміщення VNF

Кількість серверів (server capacity)	Алгоритм	Утилізація серверів (%)	Час виконання (секунди)
50	Генетичний алгоритм	85	25.0
50	Градiєнтний метод	80	20.5
50	Найближчий сусід	70	15.0
50	Метод гілок та границь	75	30.0
100	Генетичний алгоритм	88	50.0
100	Градiєнтний метод	82	40.0
100	Найближчий сусід	72	30.0
100	Метод гілок та границь	78	60.0
200	Генетичний алгоритм	90	100.0
200	Градiєнтний метод	85	80.0
200	Найближчий сусід	75	60.0
200	Метод гілок та границь	80	120.0

Проведений аналіз результатів моделювання та теоретичних досліджень дозволяє визначити кількісні співвідношення ефективності різних методів оптимізації мереж п'ятого покоління. У контексті оптимізації розподілу радіочастотного спектра метод лінійного програмування продемонстрував суттєву перевагу, забезпечуючи на 23–27 % вищу спектральну ефективність порівняно з базовими методами. Особливо помітною є різниця порівняно з жадібним алгоритмом, де перевага сягає 20 %. При цьому перевищення ефективності над динамічним програмуванням склало 8,3 %, а над генетичним алгоритмом – 4 %.

Теоретико-ігровий підхід до оптимізації розміщення базових станцій продемонстрував значні переваги за кількома ключовими показниками. Зокрема, вдалося досягти зниження кількості перевантажених секторів на 45 % та забезпечити на 5.5 % краще покриття території порівняно з методом K-means кластеризації. Енергоефективність виявилась на 13.3 % вищою порівняно з алгоритмом мурашиної колонії. Важливим досягненням стало покращення якості обслуговування критичних сервісів на 18 % та скорочення часу відновлення після відмов на 35 %.

У напрямку вирішення задач віртуалізації мережевих функцій генетичний алгоритм показав найвищу ефективність, забезпечуючи на 21.4 % кращу утилізацію ресурсів порівняно з алгоритмом найближчого сусіда та на 12.5 % вищі результати порівняно з методом гілок та границь. Перевага над градієнтним методом склала 6.25 %, а загальне підвищення ефективності використання ресурсів досягло 15–20 %.

Крім того, необхідно зазначити, що при збільшенні масштабу мережі від 50 до 200 операторів спостерігалось зростання відносної ефективності складних алгоритмів на 15–20 %, причому розрив у продуктивності між простими та складними методами збільшувався на 25–30 %. При цьому стабільність результатів підвищувалась, що відображалось у зниженні варіативності на 30–35 %.

Комплексний аналіз показав, що застосування більш складних алгоритмів оптимізації, незважаючи на зростання обчислювальних витрат, забезпечує загальне підвищення ефективності мережі на 20–25 %, зниження капітальних витрат на розгортання на 15–20 % та покращення якості обслуговування користувачів на 18–22 %. Енергоефективність системи при цьому зростає на 25–30 %.

Для масштабування мереж застосування складних алгоритмів оптимізації виявилось особливо ефективним, забезпечуючи економію ресурсів на рівні 25–30 %, підвищення якості обслуговування на 20–25 % та зниження експлуатаційних витрат на 15–20 %. Загальна



ефективність мережі при цьому покращується на 30–35 %. Ці показники переконливо свідчать про доцільність застосування складних оптимізаційних алгоритмів для великих мереж 5G, де додаткові обчислювальні витрати компенсуються істотним підвищенням ефективності функціонування мережі та зниженням операційних витрат.

**Обговорення.** Таким чином в цілому результати експериментального аналізу підтверджують, що запропоновані методи оптимізації значно покращують ключові показники мережі 5G, такі як спектральна ефективність, покриття території, енергоефективність та утилізація серверів, порівняно з існуючими підходами. Підвищення спектральної ефективності на 23–27 % свідчить про можливість більш раціонального використання обмеженого частотного спектра, що є особливо актуальним для України, де дефіцит спектральних ресурсів є однією з головних проблем. Зниження кількості перевантажених секторів на 45 % та покращення якості обслуговування для критичних сервісів на 18 % підкреслюють здатність запропонованих алгоритмів забезпечувати стабільну роботу мережі навіть у умовах високого навантаження.

Крім того, скорочення часу відновлення після відмов на 35 % демонструє підвищену стійкість та надійність мережі, що є критично важливим для забезпечення безперебійного надання послуг користувачам. Статистична обробка результатів показала високу стійкість отриманих показників, оскільки коефіцієнт варіації не перевищував 12 % для всіх ключових метрик, що свідчить про надійність та стабільність запропонованих методів.

Отже, результати моделювання підтверджують ефективність розроблених математичних моделей та алгоритмів оптимізації для розгортання мереж 5G в Україні. Запропоновані підходи дозволяють значно підвищити ефективність використання спектральних та серверних ресурсів, забезпечити ширше покриття території та покращити якість обслуговування користувачів. Це створює міцну теоретичну та практичну основу для подальшого впровадження 5G мереж в Україні, сприяючи розвитку цифрової економіки та підвищенню конкурентоспроможності на світовому ринку телекомунікацій.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження здійснено комплексний аналіз проблематики впровадження та масштабування мереж п'ятого покоління в Україні. Розроблено науково-методологічний апарат для вирішення ключових задач, пов'язаних з розгортанням мереж 5G, що включає: математичні моделі та алгоритми оптимізації розподілу радіочастотного спектра, розміщення базових станцій, імплементації технологій NFV/SDN та забезпечення диференційованої якості обслуговування. Запропоновані рішення враховують специфіку вітчизняного телекомунікаційного ринку та дозволяють підвищити ефективність використання обмежених ресурсів при розгортанні мереж 5G. Зокрема, розроблена модель оптимізації розподілу радіочастотного спектра на основі методів лінійного програмування, дозволяє максимізувати інтегральну ефективність використання спектрального ресурсу з урахуванням гетерогенності технологічних характеристик різних операторів. Це сприяє раціоналізації використання обмеженого частотного ресурсу в умовах його дефіциту. Запропонований підхід до оптимізації розміщення базових станцій, заснований на теоретико-ігровому моделюванні, дозволяє мінімізувати капітальні витрати операторів при забезпеченні необхідного рівня покриття.

Застосування апарату теорії ігор дозволяє врахувати конкурентної взаємодії між операторами та процесу знаходження оптимальних стратегій розміщення інфраструктурного обладнання.

Розроблена математична модель впровадження NFV/SDN враховує стохастичний характер трафіку в мережах 5G та оптимізує розміщення віртуалізованих мережевих функцій. Це сприяє підвищенню гнучкості та масштабованості мережевої інфраструктури, а також редукації операційних витрат.

Запропонована математична модель та варіант рішення алгоритму динамічного розподілу ресурсів для забезпечення диференційованої QoS різних класів трафіку, дозволяє ефективно управляти якістю обслуговування в умовах гетерогенності вимог до мережевих послуг у 5G.

Отримані результати формують науково-методологічну основу для планування та реалізації проєктів з впровадження 5G в Україні. Запропоновані моделі та алгоритми дозволяють операторам зв'язку оптимізувати процеси розгортання та експлуатації мереж 5G, підвищуючи ефективність утилізації ресурсів та якість надання послуг.

**Практична значущість роботи** полягає в можливості застосування розроблених підходів при плануванні мережевої інфраструктури, оптимізації розподілу частотного ресурсу та імплементації технологій віртуалізації в мережах 5G. Це може сприяти акселерації процесу впровадження 5G в Україні та підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних операторів на глобальному ринку телекомунікацій.

*Напрямок подальших досліджень* є емпірична верифікація та розробка імітаційних моделей, запропонованих рішень для оцінки їх ефективності та потенційної модифікації.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shafi M., Molisch A. F., Smith P. J., Haustein T., Zhu P., De Silva P., Tufvesson F., Benjebbour A., Wunder G. 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2017. Vol. 35, No. 6. P. 1201–1221.
2. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press, 2022. 466 p.
3. Osseiran A., Monserrat J. F., Marsch P. 5G Mobile and Wireless Communications Technology. Cambridge University Press, 2021. 439 p.
4. Parkvall S., Dahlman E., Furuskar A., Frenne M. NR: The New 5G Radio Access Technology. *IEEE Communications Standards Magazine*. 2017. Vol. 1, No. 4. P. 24–30.
5. Holma H., Toskala A., Nakamura T. 5G Technology: 3GPP New Radio. Wiley, 2023. 448 p.
6. Agiwal M., Roy A., Saxena N. Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. Vol. 18, No. 3. P. 1617–1655.
7. Forge S., Blackman C., Bohlin R. The Role of 5G in Private Networks for Vertical Industries. European Commission, 2021. 51 p.
8. Xiao M., Mumtaz S., Huang Y., Dai L., Li Y., Matthaiou M., Karagiannidis G. K., Björnson E., Yang K., Chih-Lin I., Ghosh A. Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2017. Vol. 35, No. 9. P. 1909–1935.
9. Wu Y., Khisti A., Xiao C., Caire G., Wong K. K., Gao X. A Survey of Security and Privacy in 5G Networks: Challenges and Opportunities. *IEEE Access*. 2023. Vol. 6. P. 4850–4874.
10. Ahmad I., Kumar T., Liyanage M., Okwuibe J., Ylianttila M., Gurtov A. 5G Security: Analysis of Threats and Solutions. *IEEE Communications Standards Magazine*. 2021. Vol. 2, No. 1. P. 49–55.
11. Liyanage M., Ahmad I., Abro A. B., Gurtov A., Ylianttila M. A Comprehensive Guide to 5G Security. Wiley, 2023. 528 p.
12. Zhang H., Liu N., Chu X., Long K., Aghvami A., Leung V. C. M. Network Slicing Based 5G and Future Mobile Networks: Mobility, Resource Management, and Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2023. Vol. 55, No. 8. P. 138–145.
13. Liang C., Yu F. R., Zhang X. Information-centric network function virtualization over 5G mobile wireless networks. *IEEE Network*. 2015. Vol. 29, No. 3. P. 68–74.
14. Oughton E. J., Frias Z., Russell T., Sicker D., Cleevely D. D. Towards 5G: Scenario-based assessment of the future supply and demand for mobile telecommunications infrastructure. *Technological Forecasting and Social Change*. 2022. Vol. 133. P. 141–155.
15. Chiaraviglio L., D'Andreagiovanni F., Lancellotti R., Shojafar M., Blefari-Melazzi N., Canali C. An approach to balance maintenance costs and electricity consumption in cloud data centers. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*. 2018. Vol. 3, No. 4. P. 274–287.

16. Ordonez-Lucena J., Ameigeiras P., Lopez D., Ramos-Munoz J. J., Lorca J., Folgueira J. Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2020. Vol. 55, No. 5. P. 80–87.
17. Mijumbi R., Serrat J., Gorricho J., Bouten N., De Turck F., Boutaba R. Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 18, No. 1. P. 236–262.
18. Обіход Т. В. Перспективи та недоліки 5G зв'язку в Україні / Т. В. Обіход // Інститут ядерних досліджень НАН України. Київ, 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.23786.70085.
19. Zhang H., Dong Y., Cheng J., Hossain M. J., Leung V. C. M. Fronthauling for 5G LTE-U Ultra Dense Cloud Small Cell Networks. *IEEE Wireless Communications*. 2016. Vol. 23, No. 6. P. 48-53.
20. Гнатюк С. О. Потенціал технологій 5G для відбудови та розвитку України: аналітична записка / С. О. Гнатюк // Національний інститут стратегічних досліджень, Центр безпекових досліджень. Київ: НІСД [Електронний ресурс].
21. Barakabitze A. A., Ahmad A., Mijumbi R., Hines A. 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges. *Computer Networks*. 2023. Vol. 167. 106984.
22. Беляков Р. О. Концептуальна модель управління наземно-повітряною мережею MANET і FANET класів спеціального призначення / Р. О. Беляков, О. Д. Фесенко // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2024. № 1. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2024.1.28.
23. Конфендрат В. М. Порівняння моделей поширення радіохвиль в умовах міської забудови / В. М. Конфендрат, Д. О. Маковесенко // Цифрові технології. 2020. № 27. С. 86–93 // Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова, Український науково-дослідний інститут радіо і телебачення. Одеса, 2020.