

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-41>

УДК 621.391

Городецька Оксана Степанівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-6929-1123>

Будаш Михайло Володимирович, аспірант

Павліченко Юрій Юрійович, магістр

Прикмета Андрій Володимирович, аспірант

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФРАСТРУКТУРИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ 6G

Городецька О. С., Будаш М. В., Павліченко Ю. Ю., Прикмета А. В. Оптимізація інфраструктури мобільних мереж 6G. У статті представлено розгорнутий аналіз комплексного підходу до забезпечення енергоефективності апаратного забезпечення мереж шостого покоління (6G) як одного з визначальних чинників сталого розвитку телекомунікаційної інфраструктури в умовах зростання попиту на високошвидкісні, надійні та екологічно збалансовані послуги зв'язку. Розглянуто концепції та практичні рішення, спрямовані на зменшення енергоспоживання при одночасному збереженні або підвищенні продуктивності мережевих компонентів, включно з базовими станціями, терміналами користувачів, системами передавання й обробки даних. Обґрунтовано необхідність використання алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для динамічного управління режимами роботи обладнання, прогнозування навантажень і адаптивного регулювання енергоспоживання у реальному часі. Наведено перспективи інтеграції відновлюваних джерел енергії, технологій енергозбирання (energy harvesting) та бездротової передачі енергії (WPT), що підвищують автономність вузлів і сприяють зниженню залежності від традиційних енергетичних ресурсів. Показано роль 6G у забезпеченні високоточного моніторингу параметрів довкілля, екологічного картографування та підтримки громадського екологічного контролю за допомогою масових сенсорних мереж і голографічних комунікацій. Проведено огляд сучасних методів моделювання каналів і поширення сигналу в терагерцовому діапазоні з урахуванням ефектів багатопроменевого середовища, використання massive MIMO, інтелектуального формування променя, гібридних антенних решіток та адаптивних схем модуляції і кодування. Окреслено стратегії оптимізації показників ефективності та якості обслуговування (QoS), включно з інтеграцією AI/ML-рішень, периферійних (edge/fog) обчислень, когнітивного управління спектром, мережевої сегментації (network slicing) і сервісно-орієнтованих архітектур. Проаналізовано технічні, регуляторні та екологічні виклики впровадження 6G, зокрема стандартизацію, забезпечення кіберстійкості, гармонізацію частотних ресурсів, зниження вуглецевого сліду та підвищення енергоефективності життєвого циклу обладнання. Визначено напрями міждисциплінарних досліджень, орієнтованих на розроблення адаптивних, стійких до збоїв, масштабованих та енергоощадних телекомунікаційних систем наступного покоління, здатних задовольнити зростаючі потреби цифрової економіки та суспільства. Отримані результати можуть бути використані у формуванні концепцій «зеленого» зв'язку, проєктуванні енергоефективних архітектур мереж, розробленні стратегій керування енергоспоживанням та впровадженні технологій, що поєднують високу пропускну здатність, низьку затримку, гнучке керування ресурсами та екологічну відповідальність.

Ключові слова: енергоефективність, апаратне забезпечення, бездротова передача енергії, штучний інтелект, моделювання каналу, терагерцовий діапазон, сталий розвиток, оптичні комунікації.

Horodetska O., Budash M., Pavlichenko Yu., Prykmeta A. 6G mobile network infrastructure optimization. The article presents an in-depth analysis of a comprehensive approach to ensuring the energy efficiency of hardware for sixth-generation (6G) networks as one of the key factors in the sustainable development of telecommunications infrastructure under the growing demand for high-speed, reliable, and environmentally balanced communication services. The study examines concepts and practical solutions aimed at reducing energy consumption while maintaining or improving the performance of network components, including base stations, user terminals, and data transmission and processing systems. The necessity of employing artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) algorithms for dynamic equipment operation management, load forecasting, and adaptive real-time power consumption regulation is substantiated. Prospects for integrating renewable energy sources, energy harvesting technologies, and wireless power transfer (WPT) systems are outlined, enhancing node autonomy and reducing dependence on conventional energy resources. The role of 6G in enabling high-precision environmental parameter monitoring, ecological mapping, and public environmental oversight through large-scale sensor networks and holographic communications is highlighted. A review of state-of-the-art channel modeling methods and signal propagation characteristics in the terahertz band is provided, taking into account multipath effects, massive MIMO utilization, intelligent beamforming, hybrid antenna arrays, and adaptive modulation and coding schemes. Strategies for optimizing performance and quality of service (QoS) indicators are defined, including the integration of AI/ML solutions, edge/fog computing, cognitive spectrum management, network slicing, and service-oriented architectures. The paper analyzes technical, regulatory, and environmental challenges of 6G deployment, such as standardization, cybersecurity resilience, frequency resource harmonization, carbon footprint reduction, and life-cycle energy efficiency of equipment. Directions for interdisciplinary research are identified, focusing on the development of adaptive, fault-tolerant, scalable, and energy-efficient next-generation telecommunication systems capable of meeting the growing needs of the digital economy and society. The obtained results can be applied in the formation of green communication concepts, the design of energy-efficient network architectures, the development of power consumption management strategies, and the implementation of technologies that combine high throughput, low latency, flexible resource management, and environmental responsibility.

Keywords: energy efficiency, hardware, wireless power transfer, artificial intelligence, channel modeling, terahertz band, sustainable development, optical communications.

Постановка наукової проблеми. Розвиток бездротових комунікацій характеризується послідовною зміною поколінь, кожне з яких забезпечувало зростання швидкості передавання даних, зменшення затримок та розширення функціональних можливостей [1, 2]. З наближенням ери мереж шостого покоління (6G) фокус досліджень зміщується від виключно продуктивнісних показників до комплексного врахування енергоефективності та сталого розвитку. Мережі 6G, які інтегрують терагерцовий зв'язок, масивні системи MIMO та інтелектуальні мережеві протоколи, покликані забезпечити ультрависокі швидкості передавання, ультранизькі затримки та безперервне підключення для широкого спектра пристроїв і застосувань, включно з AR/VR, автономним транспортом та Інтернетом речей (IoT) [1].

Разом із цими перспективами постають суттєві виклики [2]:

- масове підключення пристроїв та інтенсивне зростання обсягів переданих даних спричиняють різке збільшення енергоспоживання телекомунікаційної інфраструктури;
- розширення мережевих ресурсів у поєднанні з використанням традиційних джерел енергії збільшує вуглецевий слід та посилює негативний вплив на клімат;
- забезпечення енергоефективності потребує розробки нових технічних рішень: оптимізації апаратного забезпечення, впровадження інтелектуальних алгоритмів керування мережею, використання відновлюваних джерел енергії;
- зниження енергоспоживання сприяє зменшенню операційних витрат, підвищує рентабельність та конкурентоспроможність операторів, а також забезпечує інклюзивний доступ до цифрових сервісів у регіонах з обмеженими ресурсами;
- досягнення цілей сталого розвитку у 6G вимагає міжсекторальної взаємодії, міжнародної стандартизації та впровадження найкращих практик «зелених» технологій [3, 4].

У контексті складної архітектури 6G ключовим завданням є створення формалізованих підходів до оцінювання продуктивності та оптимізації мереж із урахуванням їхньої масштабованості, різноманітності сервісів і високої інтенсивності трафіку. Особливого значення набуває застосування штучного інтелекту (AI), машинного навчання (ML) та сегментування мережі (network slicing) для динамічного розподілу ресурсів, адаптивного керування трафіком та підтримки необхідного рівня якості обслуговування [5].

Таким чином, наукова проблема полягає у визначенні, моделюванні та впровадженні сучасних методів оцінювання та оптимізації продуктивності мереж шостого покоління з урахуванням вимог енергоефективності, екологічної стійкості, надійності та адаптивності. Її вирішення має практичну значущість для інженерів, дослідників і розробників політик, залучених до проектування та розгортання інфраструктури наступного покоління, а також забезпечить формування технологічно досконалого й екологічно відповідального цифрового середовища.

Метою дослідження є сформулювати та обґрунтувати комплексний підхід до проектування, оцінювання та впровадження енергоефективних апаратних рішень для мереж шостого покоління (6G), що забезпечують високу продуктивність зв'язку при мінімальному екологічному впливі та сумісні з відновлюваними джерелами енергії.

Основні цілі дослідження:

- визначити техніко-економічні вимоги до енергоефективного апаратного забезпечення 6G;
- розглянути AI/ML-алгоритми для динамічного енергоменеджменту та прогнозування навантаження в реальному часі;
- дослідити методологію ОВД і LCA для оцінки екологічного впливу 6G-інфраструктури;
- визначити технічні, регуляторні та соціально-економічні бар'єри впровадження «зелених» апаратних технологій і запропонувати напрями стандартизації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях, присвячених розвитку мереж шостого покоління (6G), основний акцент зроблено на забезпеченні енергоефективності, екологічної сталості та інтеграції інноваційних технологій. Архітектура 6G розглядається як платформа, здатна залучати користувацькі пристрої в якості активних вузлів передачі даних, що зумовлює необхідність розробки нових стратегій енергоменеджменту та впровадження відновлюваних джерел енергії [5]. Одним із ключових інструментів оцінки «зелених» компромісів у 6G є інтегрований показник відносної енергоефективності (IREE), що враховує ємність мережі та характеристики трафіку. Його застосування дозволяє виявляти невідповідності між пропускну здатністю та навантаженням і визначати напрями масштабування мережевої інфраструктури [6].

Зменшення енергоспоживання в бездротових мережах досягається шляхом вибору оптимальної

підмножини точок доступу, зокрема за методикою MIPA-MCAS, яка підвищує спектральну ефективність і знижує інтерференцію [7]. Водночас оптимізація роботи радіопідсистеми за допомогою лагранжевої декомпозиції та алгоритму Куна–Манкереса забезпечує ефективний розподіл ресурсів між радіоблоками, підканалами та користувачами, підвищуючи енергоефективність IoT-пристроїв [8]. Перспективним напрямом підвищення сталості мереж є впровадження технологій реконфігурованих інтелектуальних поверхонь (RIS), які дозволяють програмно змінювати середовище радіопоширення, реалізуючи концепцію «бездротове середовище як сервіс» [9].

Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML) розглядаються як ключові інструменти для зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності телекомунікаційних систем [10]. Зокрема, гібридні алгоритми, що враховують багатопляхове підсилення та рівень шуму, демонструють переваги над традиційними підходами в енергозаспокоєнні [11].

Серед інших технічних рішень варто відзначити:

- поєднання неортогональної передачі з багатопоточним кешуванням відео для підвищення якості обслуговування користувачів [6];
- гібридну модель на основі федеративного навчання та фрагментованого блокчейну для забезпечення безпеки та пропускної здатності 6G-мереж [7];
- систему Dynamic Reconfigurable Large-scale Surfaces (DRLS) з глибоким підкріплювальним навчанням для зниження затримок та витрат при оффлоудингу задач [8];
- застосування квантового алгоритму QAOA для оптимізації маршрутів у безпроводних mesh-мережах [10];
- методи інтелектуального аналізу даних для підвищення точності прогнозування та адаптивності IoT-рішень у межах 6G [9];
- моделювання евакуаційних систем із використанням тривимірних графових моделей для підвищення надійності інфраструктури [11]. Таким чином, наукові роботи узгоджено демонструють, що подальший розвиток 6G орієнтований на інтеграцію енергоефективних технологій, інтелектуальних систем керування ресурсами та адаптивних алгоритмів обробки даних, що забезпечить високу продуктивність, сталий розвиток та безпеку мереж наступного покоління.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. У контексті розбудови мереж шостого покоління (6G) забезпечення енергоефективності на рівні апаратного забезпечення розглядається як один із пріоритетних напрямів науково-технічного розвитку. Основні підходи до проєктування та впровадження енергоефективних апаратних рішень включають такі складові.

1. Сучасні тенденції розвитку напівпровідникової промисловості спрямовані на створення мікросхем із високою обчислювальною продуктивністю за мінімального енергоспоживання. Особливе місце займають спеціалізовані процесори для обробки сигналів і алгоритмів машинного навчання, оптимізовані під специфічні завдання інфраструктури 6G. Такий підхід дає змогу зменшити тепловиділення та підвищити загальну ефективність систем.

2. Передавачі, підсилювачі та антени проєктуються з урахуванням принципів енергозбереження, що дозволяє зменшити споживану потужність без зниження технічних характеристик [12]. Зокрема, застосування високоефективних радіочастотних (RF) підсилювачів та передавачів, оптимізованих для вимог 6G, сприяє зниженню енергетичних витрат при передаванні даних.

3. Зростання щільності розміщення апаратних модулів та їх обчислювальної потужності актуалізує потребу в оптимізації охолодження. Інноваційні рішення, зокрема рідинне та високопродуктивне повітряне охолодження, забезпечують ефективне відведення тепла при мінімальних енергозатратах, що є особливо важливим для центрів обробки даних і центральних вузлів мереж 6G.

4. Оптичні канали передавання, що використовують фотонні компоненти та волоконно-оптичні лінії, дозволяють передавати великі обсяги даних на значні відстані з мінімальними втратами та низьким рівнем енергоспоживання. Їх інтеграція в архітектуру 6G забезпечує підвищення пропускної здатності та зменшення енергетичних витрат у магістральних та доступових сегментах мережі.

5. Використання алгоритмів штучного інтелекту (AI) дає змогу реалізувати динамічне керування енергоспоживанням у реальному часі [3–6]. AI-системи здатні адаптивно змінювати

параметри мережі залежно від трафіку, стану каналів та навколишніх умов, зберігаючи оптимальний баланс між продуктивністю й енергоефективністю. Зокрема, базові станції 6G можуть автоматично регулювати рівень передавальної потужності та розподіл ресурсів між користувачами.

6. Перспективним напрямом є інтеграція систем збору енергії з відновлюваних джерел — сонячної, вітрової або механічних вібрацій. Це дає змогу зменшити залежність від централізованих енергомереж, підвищити автономність функціонування вузлів та сприяти екологічній сталості телекомунікаційної інфраструктури.

Сукупне застосування наведених підходів забезпечує формування енергоефективної апаратної основи 6G-мереж, що відповідає вимогам високошвидкісного зв'язку, мінімального екологічного впливу та стійкості до зростаючих навантажень. Запропонована систематизація рішень слугує технічною базою для подальшої оптимізації архітектури мереж наступного покоління (рис. 1).

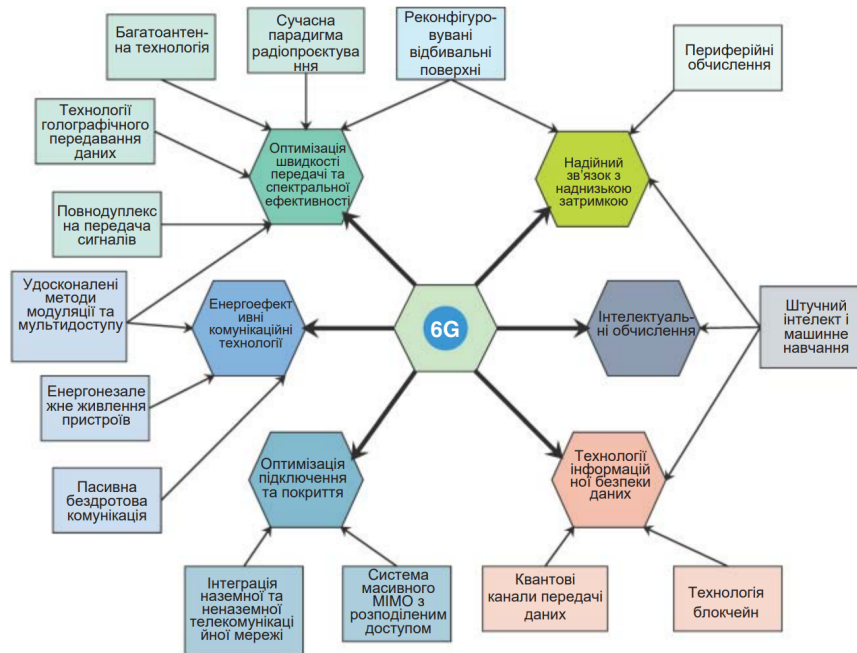


Рис. 1. Систематизація технологічних рішень в мережах 6G

Оцінювання впливу на довкілля (ОВД) є ключовим інструментом визначення потенційних екологічних наслідків запланованих проєктів чи заходів [7, 8]. У контексті впровадження мереж 6G слід урахувати як можливі негативні, так і позитивні ефекти для довкілля. До перспективних напрямів застосування 6G-технологій у процесах ОВД належать:

1. Мережі 6G забезпечують високошвидкісне передавання даних з екологічних сенсорів та пристроїв моніторингу з мінімальною затримкою, що дозволяє здійснювати масштабне та оперативне вимірювання параметрів довкілля (якість повітря і води, рівень шуму, біорізноманіття, кліматичні характеристики).

2. Використання супутникової зйомки, безпілотних літальних апаратів і дронів у поєднанні з можливостями 6G забезпечує детальне екологічне картографування, моніторинг змін землекористування та виявлення екологічних ризиків на великих територіях.

3. Інтеграція даних реального часу з сенсорних мереж та дистанційного моніторингу дозволяє створювати високоточні прогностичні моделі, що відображають наслідки інфраструктурних чи промислових проєктів [9–12].

4. Мережі 6G забезпечують масову конективність, що сприяє залученню громадськості до екологічного моніторингу через мобільні застосунки, IoT-пристрої та онлайн-платформи, підвищуючи прозорість і підзвітність екологічних рішень.

Таким чином, використання 6G-технологій у процесах ОВД підвищує точність оцінок, ефективність збору та обробки даних, а також рівень громадської участі, що сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень і поліпшенню екологічних результатів.

Інтеграція енергоефективних та екологічно орієнтованих рішень у мережі шостого покоління

є важливою складовою стратегії сталого розвитку та мінімізації негативного впливу телекомунікаційної інфраструктури на довкілля (рис. 2). Основні напрями включають:

- використання базових станцій, антен і процесорів із низьким енергоспоживанням завдяки оптимізованим архітектурам та передовим технологіям проектування мікросхем;
- застосування сонячної, вітрової та гідроенергії для живлення об'єктів інфраструктури, зокрема базових станцій та центрів обробки даних, з використанням накопичувальних систем для балансування енергопостачання;
- реалізація методів адаптивної модуляції та кодування, динамічного управління спектром та мінімізації інтерференцій для зниження витрат енергії під час передавання даних;
- динамічний доступ до частотних діапазонів з оптимізацією параметрів передавання для підвищення спектральної ефективності та зменшення енергоспоживання;
- ефективний розподіл і спільне використання обчислювальних, мережевих та енергетичних ресурсів за допомогою віртуалізації функцій мережі;
- використання енергоефективних серверів, систем охолодження та архітектурних рішень для мінімізації споживання енергії та зниження вуглецевого сліду;
- проектування пристроїв з можливістю повторного використання та переробки компонентів, що зменшує кількість електронних відходів і подовжує термін служби інфраструктури.

Запровадження вказаних технологій у 6G-мережах сприяє зменшенню екологічного сліду телекомунікаційної інфраструктури та підтримує глобальні ініціативи зі збереження кліматичної стабільності [13].



Рис. 2. Архітектура енергоефективних базових станцій 6G

Технології збирання енергії (energy harvesting) та бездротової передачі енергії (Wireless Power Transfer, WPT) становлять перспективний напрям розвитку енергетичного забезпечення телекомунікаційних систем нового покоління. Їхнє впровадження в архітектуру мереж 6G здатне суттєво підвищити енергоефективність, зменшити залежність від традиційних джерел живлення та забезпечити стале функціонування інфраструктури [14].

Energy harvesting передбачає перетворення енергії навколишнього середовища на електричну без використання дротових або батарейних джерел. У контексті масового розгортання пристроїв IoT у 6G, такі технології дозволяють забезпечувати живлення сенсорних мереж і комунікаційних модулів за рахунок: сонячної енергії — інтегровані фотопанелі на базових станціях та IoT-пристроях; кінетичної енергії — вібраційні та механічні перетворювачі, вбудовані в інфраструктуру та носимі пристрої; радіочастотної енергії (RF harvesting) — акумуляція енергії з навколишніх сигналів Wi-Fi, стільникового зв'язку та інших джерел [2].

WPT забезпечує передавання електроенергії на відстані без фізичного контакту. У мережах 6G застосовуються такі методи: електромагнітна індукція — живлення IoT-пристроїв через індуктивні котушки; магнітний резонанс — передача енергії на більші відстані, зокрема для заряджання електромобілів та дронів; RF beamforming — спрямоване формування вузьких променів для ефективного енергозабезпечення віддалених об'єктів [3].

Для забезпечення енергоефективності 6G-мереж реалізуються такі стратегії: динамічне управління живленням компонентів мережі; інтелектуальний розподіл ресурсів на основі

алгоритмів ШІ; балансування навантаження та адаптивна передача трафіку; впровадження енергоефективних протоколів зв'язку; прогнозування енергоспоживання з використанням моделей машинного навчання; інтеграція відновлюваних джерел енергії; застосування периферійних обчислень (edge computing) для локальної обробки даних [4].

Впровадження енергоефективних технологій у 6G супроводжується низкою проблем:

- підвищене енергоспоживання високопродуктивних технологій (massive MIMO, терагерцовий діапазон), складність гетерогенних архітектур, управління інтерференцією, інтеграція технологій збору енергії, стандартизація та сумісність;
- регуляторні вимоги, фінансування, екологічна свідомість користувачів, сталий ланцюг постачання, підготовка кадрів, міжнародне співробітництво.

Синергія технологій збирання енергії, бездротової передачі та інтелектуального управління ресурсами у мережах 6G формує передумови для створення адаптивної, енергоефективної та екологічно стійкої телекомунікаційної інфраструктури. Отримані результати дослідження свідчать, що реалізація таких рішень здатна змінити парадигму генерації, розподілу й споживання енергії у майбутніх мережах зв'язку.

У процесі наближення до впровадження мереж шостого покоління (6G) дедалі очевиднішою стає необхідність глибокого розуміння складної динаміки моделювання каналу та характеристик поширення сигналу. Ефективність функціонування комунікаційних систем 6G істотно залежить від глибокого усвідомлення того, як електромагнітні хвилі поширюються в різних середовищах, взаємодіють з перешкодами та зазнають трансформацій внаслідок впровадження новітніх технологій у мережеву архітектуру [5]. Вимоги до каналів зв'язку для мереж 6G представлено на рисунку 3.

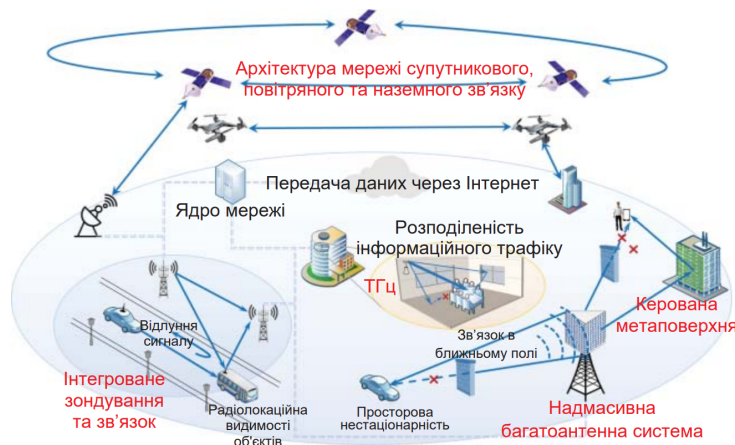


Рис. 3. Технологічні характеристики каналів передавання даних в мережах 6G

Моделювання каналу зв'язку є фундаментальною складовою процесу проєктування, оптимізації та оцінювання продуктивності телекомунікаційних систем. У контексті мереж шостого покоління (6G), які повинні забезпечувати надвисокі швидкості передавання даних, наднизькі затримки та масову з'єднаність, точні моделі каналу є критично необхідними для прогнозування поведінки сигналу та розроблення ефективних рішень щодо подолання нових викликів.

Характеристики поширення сигналу в мережах 6G охоплюють широкий спектр фізичних явищ — від прямої видимості (LOS) та багатопроменевого поширення (NLOS) до використання передових технологій, таких як:

- терагерцова комунікація — надширокосмугові канали з високим потенціалом пропускної здатності, але зі значними втратами на великі відстані;
- масиви з багатьма антенами (massive MIMO) — просторове мультиплексування для підвищення спектральної ефективності;
- інтелектуальне формування променя (beamforming) — динамічне спрямування енергії сигналу для підвищення покриття та зменшення інтерференції.

Урахування впливу цих чинників є ключовим для забезпечення оптимальних параметрів покриття, пропускної здатності та надійності мережі у різних середовищах: від щільної міської забудови та закритих приміщень до відкритих та складних зовнішніх сценаріїв.

Дослідження охоплює аналіз сучасних підходів до моделювання каналів для мереж 6G, зокрема: статистичних моделей, що описують розподіл затримок, амплітуд і фаз сигналу; геометрично-оптичних моделей, які враховують відбиття, дифракцію та розсіяння; гібридних моделей, що поєднують дані вимірювань із теоретичними розрахунками.

Кожна модель має свої переваги та обмеження, а вибір залежить від частотного діапазону, сценарію використання та вимог до точності прогнозу.

Моделювання каналів та характеристик поширення сигналу безпосередньо впливає на такі показники ефективності мереж 6G, як: рівень сигналу та співвідношення сигнал/шум (SNR); рівень інтерференції між користувацькими та інфраструктурними елементами; досяжні швидкості передавання даних та затримки; ефективність використання спектра та енергетичних ресурсів.

Результати аналізу дозволяють формувати нові стратегії для компенсації спотворень у каналі, оптимізації розподілу ресурсів, підвищення стійкості зв'язку та покращення якості обслуговування (QoS).

Схема потокової моделі терагерцового каналу, яка базується на поєднанні емпіричних даних і математичних моделей, наведена на рисунку 4. Вона відображає основні етапи моделювання, включно з аналізом середовища, параметризацією каналу, прогнозуванням характеристик поширення та інтеграцією в мережеві симуляційні платформи.

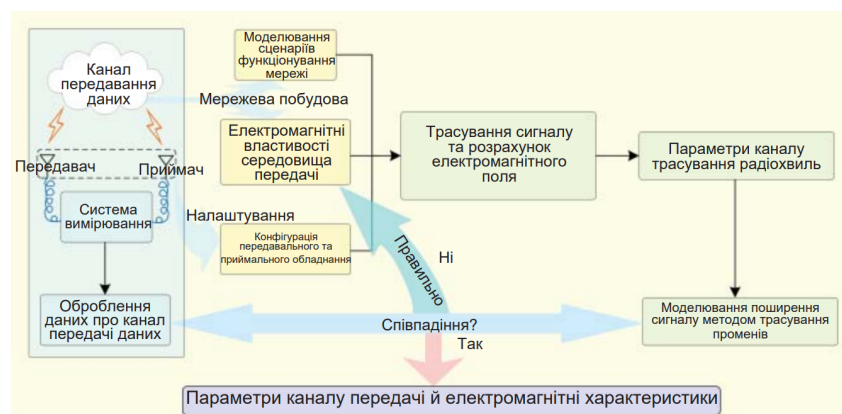


Рис. 4. Блок-схема комбінованого моделювання даних і моделей ТГц-каналу передачі

Таким чином, результати дослідження формують комплексне уявлення про моделювання каналу та характеристики поширення в мережах шостого покоління, що є підґрунтям для створення вискоєфективних і надійних систем зв'язку нового покоління, здатних реалізувати весь потенціал безпроводних технологій майбутнього [6].

У контексті розвитку мереж шостого покоління (6G), які характеризуються надвисокими швидкостями передавання даних, наднизькою затримкою та повсюдною підключеністю, ключового значення набувають показники ефективності та якості обслуговування (Quality of Service, QoS) [7]. Технологія 6G орієнтована на підтримку широкого спектра інноваційних застосувань — від доповненої реальності та автономного транспорту до масштабних розгортань IoT — що зумовлює необхідність дотримання суворих стандартів продуктивності для задоволення вимог різних категорій користувачів та сервісів.

Показники ефективності 6G включають пропускну здатність, затримку, надійність, енергоефективність, спектральну ефективність і зону покриття. Вони слугують базою для оцінювання результативності функціонування мереж і визначення рівня користувацького досвіду. Забезпечення високих значень цих параметрів вимагає комплексного аналізу та оптимізації. Якість обслуговування (QoS) у мережах 6G визначається здатністю інфраструктури гарантувати заданий рівень продуктивності відповідно до угод про рівень обслуговування (SLA) або очікувань користувачів. QoS охоплює гарантії пропускну здатності, обмеження затримок, допустимі рівні втрат пакетів і показники доступності. Її підтримка передбачає застосування алгоритмів просунутого планування ресурсів, стратегій управління трафіком, механізмів динамічного розподілу ресурсів та мережевої сегментації (network slicing) [7].

Зростання складності мереж 6G потребує впровадження алгоритмів оптимізації, спрямованих

на: розподіл і керування спектром (динамічне використання, когнітивний доступ, агрегація частотних діапазонів); розподіл і керування ресурсами (оптимізація асоціації користувачів, контроль потужності, балансування навантаження); підвищення енергоефективності (енергоощадне планування сну, енергетично-орієнтована маршрутизація, оптимізація потужності передавання); оптимізацію QoS (динамічне надання сервісної якості, пріоритизація потоків, контроль прийому трафіку). Важливим є інтегрування алгоритмів оптимізації з новітніми технологіями — штучним інтелектом (AI), машинним навчанням (ML) і периферійними обчисленнями (edge computing), що дозволяє підвищити гнучкість та адаптивність мереж у реальному часі [8].

Реалізація 6G супроводжується низкою бар'єрів:

- обмеженість спектра та інтерференція — потреба в інноваційних механізмах спільного та динамічного доступу;
- складність архітектури — інтеграція терагерцового зв'язку, масивних MIMO, інтелектуальних протоколів;
- моделювання каналів — необхідність точного прогнозування поширення сигналів у міліметровому й терагерцовому діапазонах;
- регуляторні аспекти — гармонізація політик управління спектром і захисту даних;
- конфіденційність і безпека — впровадження стійких до атак криптографічних механізмів;
- соціальні та етичні питання — забезпечення цифрової інклюзії та подолання цифрового розриву;
- екологічна сталість — скорочення енергоспоживання, утилізація обладнання.

Подальший розвиток 6G потребує міждисциплінарних досліджень, зокрема у сферах [9]: проектування енергоефективного апаратного забезпечення; інтеграції відновлюваних джерел енергії; інтелектуального керування живленням; міжрівневої (cross-layer) оптимізації; створення «зелених» центрів обробки даних; оцінки життєвого циклу мережевих технологій; дослідження поведінки користувачів; політичного та регуляторного забезпечення сталого розвитку.

Додатковими пріоритетами залишаються: використання AI/ML для динамічного управління ресурсами та предиктивної оптимізації; розроблення інноваційних моделей мережевої сегментації; дослідження терагерцового діапазону та квантових комунікацій; створення тестових стендів і проведення польових випробувань [10]. Системний підхід до аналізу та оптимізації показників ефективності й QoS у 6G, інтегрований з інноваційними технологіями та врахуванням технічних і соціально-економічних викликів, є визначальним для побудови стійкої, високопродуктивної та екологічно збалансованої телекомунікаційної інфраструктури майбутнього.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Досягнення енергоефективності та екологічної сталості в мережах шостого покоління (6G) є стратегічним завданням, що має ключове значення як для телекомунікаційної галузі, так і для суспільства в цілому. Розгортання 6G відкриває широкі можливості для впровадження інноваційних рішень, спрямованих на зниження енергоспоживання, використання відновлюваних джерел енергії та створення екологічно збалансованої інфраструктури зв'язку. Застосування енергоефективних апаратних рішень, інтелектуальних алгоритмів розподілу ресурсів, інтеграція відновлюваної енергії та розвиток «зелених» дата-центрів формують основу екологічно орієнтованого розвитку галузі.

Успішна реалізація цих підходів потребує узгодженої співпраці між промисловими підприємствами, науково-дослідними установами, регуляторними органами та громадянським суспільством. Необхідною передумовою є формування міжнародних стандартів і регуляторних рамок, що стимулюватимуть використання екологічно сталих технологій та забезпечуватимуть глобальну гармонізацію у досягненні екологічних цілей.

Оптимізація та оцінювання ефективності мереж 6G мають багатовимірний характер, охоплюючи технічні, регуляторні, соціальні та етичні аспекти. Ключові напрями розвитку — управління спектром, розподіл ресурсів, підвищення енергоефективності та забезпечення безпеки — вимагають проведення інтенсивних науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт із застосуванням сучасних технологій, таких як машинне навчання, штучний інтелект, периферійні обчислення та квантовий зв'язок.

Особливу увагу необхідно приділити розробленню нових метрик і методологій оцінювання продуктивності мереж, які враховуватимуть різноманітні сценарії використання та вимоги користувачів. Паралельно слід інтегрувати соціальні та етичні аспекти розвитку 6G, включаючи забезпечення цифрової інклюзії, захист персональних даних, підвищення рівня кібербезпеки та

підтримку екологічної сталості. Подальші дослідження доцільно зосередити на комплексному вирішенні завдань оптимізації та оцінювання ефективності 6G, забезпечуючи їх збалансований розвиток у технічному, екологічному та соціальному вимірах. Такий підхід сприятиме створенню високопродуктивної, безпечної, інклюзивної та екологічно відповідальної інфраструктури зв'язку нового покоління.

Список бібліографічного опису

1. Tyagi, A.K., Kumari, S., Chidambaram, N., and Sharma, A. (2024). Engineering applications of Blockchain in this smart era. In: Enhancing Medical Imaging with Emerging Technologies. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5261-8.ch011>.
2. Ajanthaa, L., Seranmadevi, R., Sree, P.H., and Tyagi, A.K. (2024). Engineering applications of artificial intelligence. In: Enhancing Medical Imaging with Emerging Technologies. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5261-8.ch010>.
3. Tyagi, A.K., Kukreja, S., Richa, and Sivakumar, P. (February 2024). Role of Blockchain Technology in Smart era: a review on possible smart applications. Journal of Information & Knowledge Management. <https://doi.org/10.1142/S0219649224500321>.
4. Васильківський М. В. Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G [Текст] / М. Васильківський, Г. Варгатюк, О. Болдирева // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2022. – № 4. – С. 62–70.
5. Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G [Текст] / М. В. Васильківський, А. Коломієць, М. Будах // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2022. – № 6. – С. 53–60.
6. Васильківський М. Дослідження функціональних параметрів інфокомунікаційних мереж 6G [Текст] / М. Васильківський, А. Коломієць, Н. Грабчак // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2022. – № 6. – С. 46–52.
7. Оптимізація адаптивних радіосистем із використанням алгоритмів ШІ та МН [Текст] / М. Васильківський, Д. Нікітович, Н. Грабчак, і Н. Якубівська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – № 2. – С. 112–124.
8. Оптиміальні сигнально-кодові конструкції для підвищення ефективності інфокомунікаційних радіосистем мобільного зв'язку 5G та 6G [Текст] / М. В. Васильківський, О. С. Болдирева, Г. Варгатюк, М. В. Будах // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2023. – № 2. (319). – С. 48–55.
9. Tyagi, A.K. and Tiwari, S. (2024). The future of artificial intelligence in Blockchain applications. In: Machine Learning Algorithms Using Scikit and TensorFlow Environments. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8531-6.ch018>.
10. Kumari, S., Thompson, A., and Tiwari, S. (2024). 6G-enabled internet of things-artificial intelligence-based digital twins: cybersecurity and resilience. In: Emerging Technologies and Security in Cloud Computing. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-2081-5.ch016>.
11. Підвищення ефективності інтелектуальних мереж МІМО на основі 6G [Текст] / М. В. Васильківський, О. С. Городецька, О. В. Стальченко, Б. С. Климчук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2023. – № 1. – С. 92–101.
12. Tiwari, S., Chidambaram, N., and Tyagi, A.K. (2024). Need of 21st century: a sustainable environment together with a smart environment. In: Operational Research for Renewable Energy and Sustainable Environments. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-9130-0.ch009>.
13. Singh, R., Tyagi, A.K., and Arumugam, S.K. (2024). Imagining the sustainable future with industry 6.0: a smarter pathway for modern society and manufacturing industries. In: Machine Learning Algorithms Using Scikit and TensorFlow Environments. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8531-6.ch016>.
14. Sharma, S., Popli, R., Singh, S. et al. (2024). The role of 6G technologies in advancing smart city applications: opportunities and challenges. Sustainability. 16 (16): 7039.

References

1. Tyagi, A.K., Kumari, S., Chidambaram, N., and Sharma, A. (2024). Engineering applications of blockchain in this smart era. In: Enhancing Medical Imaging with Emerging Technologies. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5261-8.ch011>.
2. Ajanthaa, L., Seranmadevi, R., Sree, P.H., and Tyagi, A.K. (2024). Engineering applications of artificial intelligence. In: Enhancing Medical Imaging with Emerging Technologies. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5261-8.ch010>.
3. Tyagi, A.K., Kukreja, S., Richa, and Sivakumar, P. (February 2024). Role of Blockchain Technology in Smart era: a review on possible smart applications. Journal of Information & Knowledge Management. <https://doi.org/10.1142/S0219649224500321>.
4. Vasylykivskiy M. V. Doslidzhennia arkhitektury shchuchnoho intelektu dlia infokomunikatsiinykh merezh 6G [Text] / M. Vasylykivskiy, H. Vargatiuk, O. Boldyreva // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2022. – № 4. – S. 62–70 [in Ukrainian].
5. Otsiniuvannia parametriv radiotraktiv infokomunikatsiinykh system 5G/6G [Text] / M. V. Vasylykivskiy, A. Kolomiets, M. Budash // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky». – 2022. – № 6. – S. 53–60 [in Ukrainian].
6. Vasylykivskiy M. Doslidzhennia funktsionalnykh parametriv infokomunikatsiinykh merezh 6G [Text] / M. Vasylykivskiy, A. Kolomiets, N. Hrabchak // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky». – 2022. – № 6. – S. 46–52 [in Ukrainian].
7. Optymizatsiia adaptivnykh radiosystem iz vykorystanniam alhorytmiv ShI ta MN [Text] / M. Vasylykivskiy, D. Nikitovych, N. Hrabchak, i N. Yakubivska // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh.

– 2023. – № 2. – S. 112–124 [in Ukrainian].

8. Optymalni syhnalno-kodovi konstruktsii dlia pidvyshchennia efektyvnosti infokomunikatsiinykh radiosystem mobilnoho zviazku 5G ta 6G [Text] / M. V. Vasylykivskyi, O. S. Boldyreva, H. Vargatiuk, M. V. Budash // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky». – 2023. – № 2 (319). – S. 48–55 [in Ukrainian].

9. Tyagi, A.K. and Tiwari, S. (2024). The future of artificial intelligence in Blockchain applications. In: Machine Learning Algorithms Using Scikit and TensorFlow Environments. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8531-6.ch018>.

10. Kumari, S., Thompson, A., and Tiwari, S. (2024). 6G-enabled internet of things-artificial intelligence-based digital twins: cybersecurity and resilience. In: Emerging Technologies and Security in Cloud Computing. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-2081-5.ch016>.

11. Pidvyshchennia efektyvnosti intelektualnykh mrezh MIMO na osnovi 6G [Text] / M. V. Vasylykivskyi, O. S. Horodetska, O. V. Stalchenko, B. S. Klymchuk // Informatsiini tekhnolohii ta komp'iuterna inzheneriia. – 2023. – № 1. – S. 92–101 [in Ukrainian].

12. Tiwari, S., Chidambaram, N., and Tyagi, A.K. (2024). Need of 21st century: a sustainable environment together with a smart environment. In: Operational Research for Renewable Energy and Sustainable Environments. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-9130-0.ch009>.

13. Singh, R., Tyagi, A.K., and Arumugam, S.K. (2024). Imagining the sustainable future with industry 6.0: a smarter pathway for modern society and manufacturing industries. In: Machine Learning Algorithms Using Scikit and TensorFlow Environments. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8531-6.ch016>.

14. Sharma, S., Popli, R., Singh, S. et al. (2024). The role of 6G technologies in advancing smart city applications: opportunities and challenges. Sustainability. 16 (16): 7039.