

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-21>

УДК 621.391

**Васильківський Микола Володимирович**, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>

**Грабчак Назарій Віталійович**, аспірант,

**Топольський Олександр Сергійович**, аспірант,

**Павліченко Юрій Юрійович**, аспірант.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

### Інтелектуальні технології оптимізації мереж наступного покоління

**Васильківський М.В., Грабчак Н.В., Топольський О.С., Павліченко Ю.Ю. Інтелектуальні технології оптимізації мереж наступного покоління.** У статті досліджено перспективні архітектурні підходи до побудови мереж шостого покоління (6G), зокрема гекса- та наностільникові мережі, інтегровані з хмарними, туманними та периферійними обчисленнями, а також із супутниковими системами зв'язку. Проаналізовано переваги гексагональної геометрії стільників, зокрема її здатність забезпечувати рівномірний розподіл базових станцій, зменшувати взаємні завади та підвищувати спектральну ефективність і пропускну здатність. Наностільникові мережі охарактеризовано як інфраструктуру з ультращільним розгортанням малопотужних вузлів, здатних до динамічної оптимізації ресурсів, підвищення смості та покращення якості обслуговування за умов інтенсивного трафіку. Розглянуто роль хмарних, туманних і периферійних обчислень у зменшенні затримки, підвищенні продуктивності та підтримці сервісів реального часу, зокрема доповненої та віртуальної реальності (AR/VR), Інтернету речей (IoT), голографічних комунікацій і тактильного Інтернету. Обговорено перспективи інтеграції супутникових каналів для забезпечення глобального покриття та стабільного доступу в сегменті низькоорбітальних супутників (LEO). Особливу увагу приділено мережевому сегментуванню (network slicing), багатоканальним можливостям і гетерогенним архітектурам (HetNets), що забезпечують персоналізоване надання послуг та підвищують гнучкість управління ресурсами. Показано, що алгоритми штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) сприятимуть прогнозуванню трафіку, динамічній оркестрації ресурсів, автоматизованому управлінню та підвищенню надійності інфраструктури. Розглянуто виклики впровадження 6G, зокрема необхідність глобальної стандартизації, вирішення питань кібербезпеки, зниження енергоспоживання, підготовку кадрів і розроблення інноваційних протоколів. Сформульовано напрями подальших досліджень: використання терагерцового спектра, саморганізовані мережі (SON), енергоефективні протоколи, методи квантово-стійкого шифрування, інтеграція гетерогенних сегментів та створення масштабованих високопродуктивних архітектур. Зроблено висновок, що поєднання гекса- та наностільникових структур, розподілених обчислень і керування на основі штучного інтелекту формує підґрунтя для високошвидкісної, надійної та безпечної цифрової екосистеми 6G, здатної підтримувати нові бізнес-моделі та критично важливі глобальні сервіси.

**Ключові слова:** гекса-стільникова мережа; нано-стільникова мережа; хмарне обчислення; туманне обчислення; супутниковий зв'язок; сегментація мережі; AI; ML; HetNet; QoS; терагерцовий спектр; самоорганізація; кібербезпека.

**Vasykivskiy M., Hrabchak N., Topolskiy O., Pavlichenko Yu. Intelligent technologies for optimization of next-generation networks.** The article explores promising architectural approaches to building sixth-generation (6G) networks, including hexa- and nano-cellular networks integrated with cloud, fog, and edge computing, as well as with satellite communication systems. The advantages of hexagonal cell geometry are analyzed, highlighting its ability to ensure uniform distribution of base stations, reduce mutual interference, and improve spectral efficiency and throughput. Nano-cellular networks are characterized as an infrastructure with ultra-dense deployment of low-power nodes, capable of dynamically optimizing resources, enhancing capacity, and improving quality of service under heavy traffic conditions. The role of cloud, fog, and edge computing in reducing latency, increasing performance, and supporting real-time services—including AR/VR, IoT, holographic communications, and the tactile Internet—is examined. The prospects of integrating satellite channels for global coverage and ensuring stable access in the LEO segment are discussed. Special attention is given to network slicing, multi-channel capabilities, and heterogeneous architectures (HetNets), which enable personalized service delivery and improve flexibility in resource management. It is demonstrated that artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) algorithms will contribute to traffic prediction, dynamic resource orchestration, automated management, and enhanced infrastructure reliability. The challenges of implementing 6G are considered, including the need for global standardization, addressing cybersecurity issues, reducing energy consumption, workforce training, and developing innovative protocols. Directions for future research are formulated: terahertz spectrum, self-organizing networks (SON), energy-efficient protocols, quantum-resistant encryption methods, integration of heterogeneous segments, and the creation of scalable, high-performance architectures. It is concluded that the combination of hexa- and nano-cellular structures, distributed computing, and AI-driven management forms the foundation for a high-speed, reliable, and secure 6G digital ecosystem capable of supporting new business models and mission-critical global services.

**Keywords:** hexa-cellular network; nano-cellular network; cloud computing; fog computing; satellite communication; network slicing; AI; ML; HetNet; QoS; terahertz spectrum; self-organization; cybersecurity.

**Постановка наукової проблеми.** У сучасних умовах постійного зростання вимог до швидкості, надійності та масштабованості бездротових систем зв'язку розвиток мереж шостого покоління (6G) є закономірним етапом технологічної еволюції телекомунікаційних систем. Спираючись на досягнення попередніх поколінь, технологія 6G має на меті суттєве розширення можливостей у сфері глобальної конективності, забезпечуючи безпрецедентні швидкості передавання даних, наднизькі затримки, підвищену пропускну здатність і гнучкість мережевої

архітектури [1]. Ключовою передумовою прогресу є принципово нова мережева архітектура, що інтегрує наземні та супутникові сегменти та використовує терагерцовий діапазон для досягнення надвисоких швидкостей передавання інформації. Такий підхід створює технологічне підґрунтя для реалізації інноваційних сценаріїв, зокрема доповненої реальності (AR), голографічного зв'язку та масштабних розгортань Інтернету речей (IoT) [1].

Важливим компонентом архітектури 6G є використання передових методів штучного інтелекту (AI) для інтелектуального керування мережею. Алгоритми AI забезпечують динамічне управління трафіком, адаптивне маршрутизування та розподіл ресурсів у реальному часі, що дає змогу мережам гнучко реагувати на зміну користувацьких потреб і зовнішніх умов, підтримуючи високу якість обслуговування та надійність [2]. У контексті наближення ери квантових обчислень особливої актуальності набуває питання інформаційної безпеки, що зумовлює необхідність впровадження криптографічних протоколів, стійких до квантових атак, а також децентралізованих механізмів керування ідентичністю та автентифікації на основі блокчейн-технологій [2].

Окремий напрям розвитку архітектури 6G пов'язаний із забезпеченням сталого розвитку телекомунікаційної інфраструктури. Особлива увага приділяється енергоефективності, використанню обладнання з низьким рівнем споживання енергії та впровадженню інфраструктури, що працює на основі відновлюваних джерел живлення. Такий підхід спрямований на мінімізацію екологічного впливу та створення умов для довготривалої експлуатації мереж [3]. Таким чином, мережі шостого покоління виступають не лише новим етапом розвитку технологій зв'язку, а й інструментом глобальної цифрової трансформації, орієнтованим на забезпечення безперервної конективності, високої безпеки, енергоефективності та підтримки інноваційних цифрових сервісів [3].

Метою статті є дослідження перспективних архітектурних підходів та технологічних рішень для мереж шостого покоління (6G), зокрема гекса-стільникових та нано-стільникових мереж, а також інтегрованих обчислювальних технологій, що забезпечують підвищення ефективності, надійності та гнучкості телекомунікаційної інфраструктури.

Для деталізації можна подати конкретизовані цілі:

1. Проаналізувати особливості архітектури гекса-стільникових та нано-стільникових мереж і визначити їхні переваги для систем 6G (збільшення пропускної здатності, зниження затримок, оптимізація використання спектра).
2. Розкрити роль хмарних, туманних та крайових обчислень у забезпеченні низької затримки, масштабованості та підтримки інтелектуальних сервісів.
3. Оцінити потенціал інтеграції супутникового зв'язку та гетерогенних мереж для досягнення глобального покриття та стабільності.
4. Визначити значення сегментації мережі та механізмів QoS для індивідуалізованого розподілу ресурсів і реалізації різних сценаріїв застосування.
5. Окреслити перспективні напрями досліджень у галузі протоколів, управління ресурсами, AI/ML, безпеки та енергоефективності в контексті 6G.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Попри те, що технологія шостого покоління (6G) перебуває переважно на концептуальному етапі, інтенсивні наукові дослідження та дослідно-конструкторські розробки вже визначають потенційну архітектуру, протоколи та функціональні характеристики майбутніх мереж [4]. Виходячи з поточної траєкторії розвитку мобільних технологій, можна виокремити низку ключових тенденцій. Очікується, що 6G працюватиме на терагерцових частотах, забезпечуючи швидкість передавання даних у діапазоні терабіт за секунду (Tbps), що створить передумови для потокової трансляції відео надвисокої чіткості, застосувань доповненої реальності (AR) та масового впровадження IoT. Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML) виступатимуть основними технологіями для оптимального розподілу ресурсів, інтелектуального керування трафіком і динамічного маршрутизування, забезпечуючи адаптивність мереж до змінних умов експлуатації та користувацьких запитів [5].

Інноваційним напрямом розвитку є впровадження голографічних комунікацій, що забезпечать ефект телеприсутності та інтерактивну взаємодію з тривимірними об'єктами в реальному часі. Передбачається розширена інтеграція супутникового зв'язку, зокрема використання сузір'їв низькоорбітальних супутників (LEO) для глобального покриття з мінімальними затримками. З огляду на загрози з боку квантових обчислень планується застосування квантово-стійких криптографічних схем, зокрема розподілу квантових ключів (QKD) і

постквантових алгоритмів шифрування. Зростаючий попит на спектральні ресурси зумовлює необхідність упровадження технологій когнітивного радіо та динамічного доступу до спектра. Додатково підвищення енергоефективності та зменшення екологічного впливу визначають використання енергоощадного обладнання, базових станцій на відновлюваних джерелах енергії та алгоритмів інтелектуального керування енергоспоживанням. Питання безпеки та конфіденційності передбачають розроблення протоколів автентифікації, моделей «нульової довіри», блокчейн-рішень і децентралізованого керування ідентичністю [6]. Зазначені характеристики є проєктними припущеннями, а остаточною архітектура 6G залежатиме від результатів стандартизації, експериментальних досліджень і ринкових вимог [7].

Результати останніх наукових праць дозволяють виділити низку концептуальних підходів до побудови мереж 6G:

- у [7] запропоновано довірену протокольну модель на основі блокчейн-технології, де протокол WPUB-ВТР реалізує замкнений зворотний зв'язок за репутаційним принципом, підвищуючи захищеність і керованість мережі;

- у [8] досліджено інтеграцію хмарних обчислень, віртуалізації, програмної інженерії та AI для формування програмно-керованих сегментів мережі, що знижує витрати та спрощує автоматизацію керування сервісами;

- у [9] розглянуто архітектуру SET (Self-Evolving and Transformative), здатну до самоадаптації й масштабування під різні сценарії використання;

- у [10] представлено децентралізовану модель 6G, що поєднує фізичний рівень із когнітивним рівнем ухвалення рішень, сприяючи автономії сервісів і динамічній адаптації інфраструктури;

- у [11] описано шестишарову архітектуру з цифровими двійниками та повсюдним AI, яка забезпечує високу гнучкість, але потребує вирішення проблем інтеграції та стандартизації;

- у [12] запропоновано AI-архітектуру персоналізованих сервісів з використанням зон вимог до сервісів (SRZ) та коефіцієнта задоволеності користувача (USR), що порушує проблему підтримки гетерогенних потреб без втрати якості;

- у [13] представлено архітектуру «Bee Hive» для розумних міст, де акцент зроблено на складнощах покриття терагерцовими сигналами та забезпеченні безперервності зв'язку в урбанізованих середовищах;

- у [14] проаналізовано архітектуру з гетерогенним хмарним середовищем (het-cloud), мікросервісами та відкритим оркеструванням, що стикається з викликами автоматизації, надійності й безпеки;

- у [15] наголошено на перспективності децентралізованих рішень і необхідності ширшого використання розподіленого AI та периферійних обчислень через обмеження централізованих моделей.

Таким чином, сучасні наукові дослідження формують багатовекторне бачення архітектури 6G, акцентуючи увагу на децентралізації, інтелектуалізації, безпеці та енергоефективності, але залишають відкритими питання інтеграції, стандартизації й практичної реалізації ключових технологій.

#### **Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.**

Гекса-стільникові та нано-стільникові мережі розглядаються як перспективні архітектурні рішення для організації бездротового зв'язку, здатні визначити подальший розвиток технологій шостого покоління (6G) [5, 6, 16]. Архітектура гекса-стільникових мереж базується на використанні шестикутних комірок замість традиційних квадратних або прямокутних структур. Такий підхід спрямований на: зменшення взаємних перешкод; підвищення спектральної ефективності; покращення покриття та зростання пропускну здатності.

Шестикутна геометрія забезпечує рівномірний розподіл базових станцій, мінімізує перекриття сигналів та підвищує загальну продуктивність мережі. Завдяки високій просторовій ефективності гекса-стільникові мережі придатні для щільних міських розгортань, забезпечуючи безперервну підключеність і стабільні параметри функціонування.

Крім того, такі мережі підтримують: динамічний розподіл спектра; ефективне керування ресурсами; оптимізацію використання спектральних смуг. Завдяки гнучкості архітектури вони здатні задовольняти зростаючі потреби у високоякісних сервісах 6G, включаючи потокову відеотрансляцію з надвисокою роздільністю, застосування розширеної реальності (AR) та інтернет речей (IoT).

Нано-стільникові мережі базуються на використанні комунікаційних вузлів нанорівня — нанокомірок або нано-базових станцій, що є компактними малопотужними пристроями для локального покриття у високощільних зонах чи у внутрішніх середовищах. Їх ключові особливості: надзвичайно високий рівень просторового повторного використання частот; підвищення загальної ємності мережі; покращення якості обслуговування в умовах високої концентрації трафіку; розвантаження макростільників і зниження перевантаження мережі.

Завдяки застосуванню розподіленого інтелекту та кооперативної взаємодії між нанокомірками такі мережі здатні до динамічної оптимізації, самоорганізації та ефективного керування перешкодами. Це забезпечує адаптацію до змінних умов експлуатації та стабільну роботу системи. І гекса-стільникові, і нано-стільникові мережі є перспективними архітектурними парадигмами для технологій 6G, що забезпечують: розширене покриття; підвищену пропускну здатність; високу ефективність використання ресурсів. Їх застосування відкриває можливості для радикального удосконалення процесів розгортання та оптимізації мереж, формуючи новий етап розвитку мобільного зв'язку. Ключовим чинником розвитку архітектури мереж 6G є використання хмарних, туманних та крайових обчислень [8–10]. Ці технології забезпечують підтримку інноваційних застосувань, зниження затримки та підвищення загальної ефективності мережі. На рисунку 1 наведено архітектуру мережі радіодоступу (RAN), побудовану з використанням хмарних технологій для систем мобільного зв'язку шостого покоління (6G).

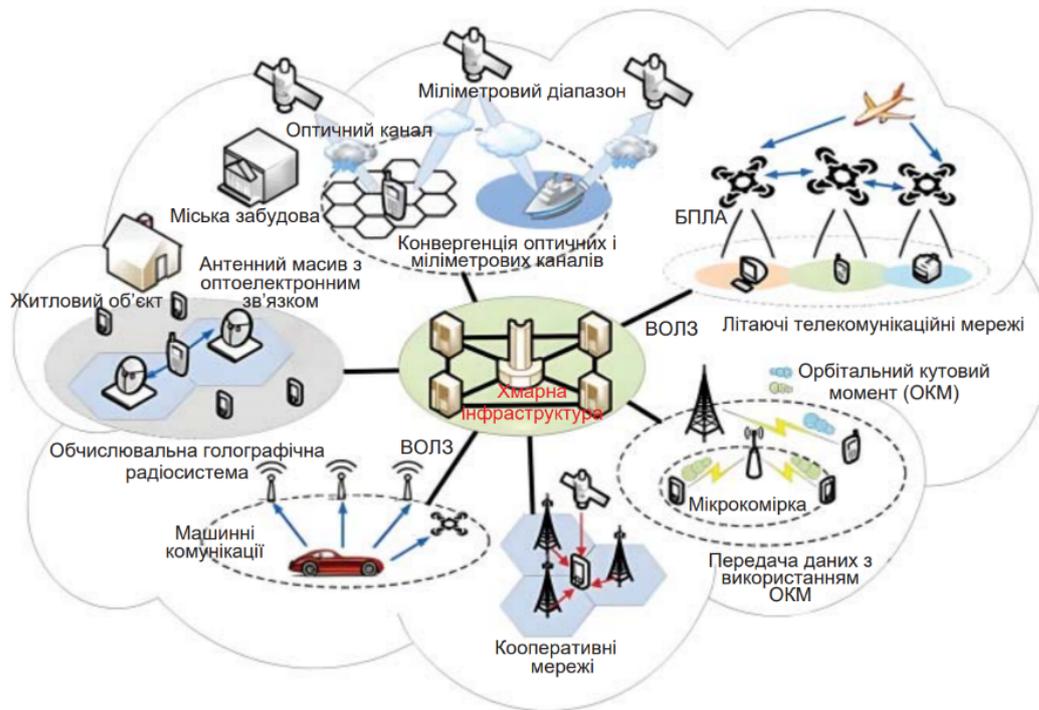


Рис. 1. Архітектура мережі радіодоступу на основі хмарних технологій для систем мобільного зв'язку шостого покоління (6G)

Хмарні обчислення залишаються фундаментальною основою сучасної мережевої інфраструктури, забезпечуючи масштабовані ресурси зберігання, обчислювальної потужності та обробки даних для широкого спектра сервісів і застосувань. У контексті мереж шостого покоління (6G) ці технології еволюціонують у напрямі підтримки ресурсоємних та чутливих до затримки застосувань, зокрема доповненої (AR) і віртуальної реальності (VR), а також аналітики в реальному часі [1, 2].

Одним із ключових напрямів розвитку стане інтеграція алгоритмів штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) безпосередньо в хмарну інфраструктуру. Використання AI-аналітики та прогнозного моделювання підвищить ефективність розподілу ресурсів, автоматизує управління мережею та забезпечить зростання її надійності й продуктивності.

Поширення cloud-native архітектур та контейнеризованих застосувань у 6G сприятиме підвищенню гнучкості, масштабованості та швидкодії процесів розгортання й експлуатації сервісів.

Архітектури на основі мікросервісів дозволяють реалізувати безперервну інтеграцію компонентів мережі та прискорити створення нових функціональних можливостей.

Туманні обчислення розширюють потенціал хмарних технологій завдяки розміщенню обчислювальних ресурсів у безпосередній близькості до кінцевих користувачів і пристроїв. У 6G вони знижуватимуть затримки, підвищуватимуть надійність і забезпечуватимуть обробку даних у реальному часі. Ієрархічний розподіл ресурсів дозволить зменшити навантаження на централізовані сервери, скоротивши час відгуку для критично важливих застосувань, таких як автономний транспорт, промислова автоматизація та дистанційна медицина. Крім того, локалізована обробка даних підвищить рівень конфіденційності та безпеки, мінімізуючи ризики витоку інформації.

Крайові обчислення (edge computing) розміщують ресурси обробки безпосередньо на периферії мережі — в базових станціях, точках доступу та IoT-шлюзах. Це дає змогу забезпечити застосування з наднизькою затримкою, підтримати сервіси з високими вимогами до пропускної здатності та обробки даних у режимі реального часу. Локалізоване зберігання й обробка інформації знижує потребу в передаванні даних до хмарних центрів, підвищує масштабованість і швидкодію систем.

Хмарні, туманні та крайові обчислення формуватимуть єдину симбіотичну екосистему в 6G, поєднуючи централізовані ресурси з розподіленими можливостями обчислень на периферії. Така архітектура забезпечить підтримку сервісів з наднизькою затримкою, високою пропускною здатністю та занурювальним користувацьким досвідом.

Інтеграція супутникового зв'язку стане невід'ємною складовою 6G, забезпечуючи глобальне покриття, низьку затримку та розширену підключеність для широкого спектра застосувань і сервісів [3, 4]. Основні переваги такої інтеграції включають:

1. Орбітальні сузір'я супутників низької навколоземної орбіти (LEO), зокрема Starlink (SpaceX) та Project Kuiper (Amazon), забезпечать доступ до високошвидкісного інтернету у віддалених і важкодоступних регіонах, зменшуючи цифровий розрив.

2. LEO-супутники, розташовані ближче до поверхні Землі порівняно з геостационарними, скорочують час поширення сигналу, що критично важливо для застосувань у режимі реального часу, таких як автономний транспорт, телемедицина та онлайн-ігри.

3. Супутникові канали забезпечать високошвидкісні магістралі між наземними компонентами мережі, підвищуючи масштабованість і стійкість у випадку збоїв наземної інфраструктури.

4. Супутниковий зв'язок сприятиме глобальному впровадженню IoT-рішень у транспорті, сільському господарстві та моніторингу довкілля, забезпечуючи підключення у віддалених районах і морських акваторіях [5–8].

5. Супутниковий інтернет забезпечить високошвидкісні сервіси для літаків, суден та інших мобільних платформ, підвищуючи безпеку, точність навігації та ефективність експлуатації.

Використання супутникових сузір'їв у 6G забезпечить глобальну підключеність, підтримку критично важливих сервісів і розвиток нових сценаріїв взаємодії та комунікації.

Сегментація мережі є ключовим механізмом, що забезпечує ефективний та індивідуалізований розподіл ресурсів для різноманітних сценаріїв використання. Сегментація мережі в 6G трансформує принципи використання ресурсів, забезпечуючи індивідуалізоване надання послуг, оптимізацію продуктивності та створення нових бізнес-моделей. На рисунку 2 наведено узагальнену структуру телекомунікаційної мережі 6G підвищеної ефективності.

У мережах п'ятого покоління сегментація забезпечує поділ інфраструктури на віртуальні зрізи, кожен із яких оптимізується для специфічних сценаріїв, галузей або застосувань. Для таких сегментів виділяються спеціалізовані ресурси (пропускна здатність, затримка, пропускний трафік), що відповідають вимогам різних категорій сервісів. Наприклад, сегмент для автономного транспорту орієнтовано на мінімальні затримки та високу надійність, тоді як сегмент для AR-ігор — на високу пропускну здатність і низький джиттер [9].

Диференціація послуг у 5G полягає у наданні різних рівнів сервісу залежно від тарифних планів, що дозволяє операторам пріоритетувати трафік і гнучко розподіляти ресурси. У мережах шостого покоління сегментація набуде ще більшої деталізації та динамічності: можливим стане створення зрізів, налаштованих не лише під конкретні галузі чи групи користувачів, а й під окремі пристрої або застосунки. Оркестрація ресурсів у 6G здійснюватиметься за допомогою алгоритмів штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML), що забезпечуватиме прогнозування потреб користувачів і динамічну адаптацію параметрів сервісу у режимі реального часу. Диференціація сервісів у 6G трансформується в ультраіндивідуалізоване надання послуг, орієнтованих на контекст,

поведінку та вподобання користувачів.

У 5G ці механізми вже реалізовані для широкого спектра сценаріїв — від розширеного мобільного широкосмугового доступу до критично важливих застосувань і масових IoT-розгортань. У 6G функціональність буде розширена для підтримки складніших сервісів: голографічних комунікацій, тактильного інтернету, цифрових двійників, занурювальних VR-рішень тощо. Мережеві зрізи зможуть оптимізуватися для ультрависокоякісного потокового відео, інтерактивних ігрових застосунків, промислової автоматизації, дистанційної хірургії або реалізації концепції «розумних міст» [10].

Багатоканальність (multi-connectivity) у 6G передбачає одночасне використання кількох технологій доступу (6G, Wi-Fi, супутникові й стільникові мережі) для стабільного з'єднання та підвищеної продуктивності. Це дозволяє мінімізувати зони відсутності покриття, підвищувати пропускну здатність і надійність з'єднання [11].

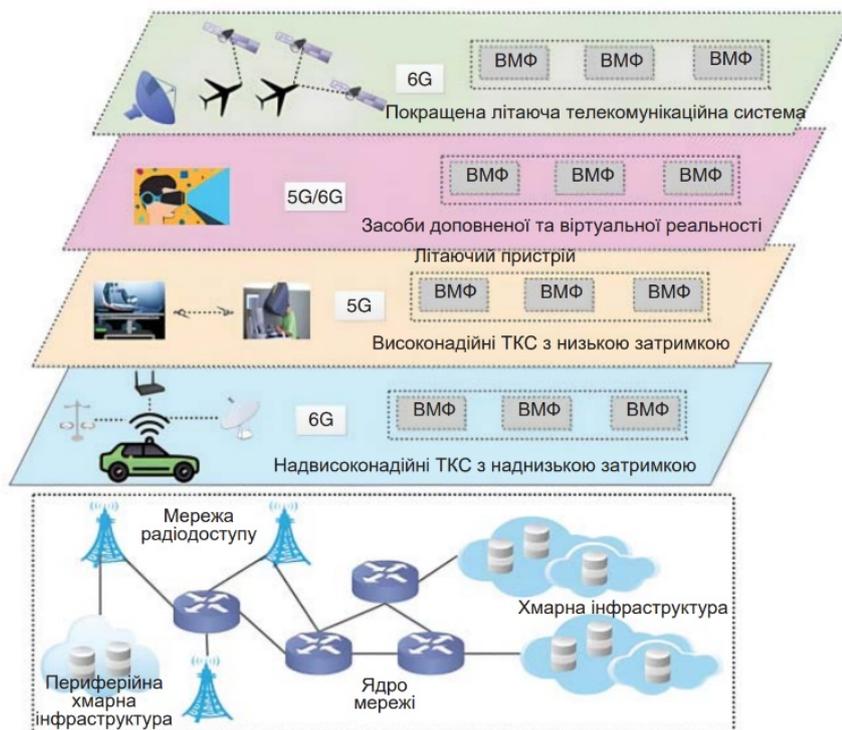


Рис. 2. Структура телекомунікаційної мережі 6G підвищеної ефективності

Гетерогенні мережі (HetNets) інтегруватимуть макросоти, мікросоти, Wi-Fi, супутникові канали, безпілотні літальні апарати (UAV), платформи великої висоти (HAPs) і підводні системи зв'язку в єдину інфраструктуру. Це сприятиме оптимізації покриття, пропускну здатності й якості обслуговування (QoS) шляхом координованого використання взаємодоповнюючих технологій доступу.

Ключовими умовами реалізації багатоканальності та HetNets є стандартизація, забезпечення інтероперабельності, динамічний розподіл ресурсів і використання інтелектуальних алгоритмів маршрутизації та балансування навантаження. Це дозволить підтримувати широкий спектр сервісів — від URLLC і mMTC до AR/VR-додатків — з гарантованою стабільністю з'єднання та продуктивності [12].

Мережі шостого покоління реалізовуватимуть механізми динамічного надання QoS із пріоритезацією трафіку відповідно до затримки, пропускну здатності, надійності, джиттера й втрати пакетів. Сегментація мережі забезпечуватиме створення зрізів із гарантованими ресурсами та індивідуальними профілями QoS. Динамічне коригування розподілу ресурсів між зрізами дозволить оптимізувати інфраструктуру та стабілізувати якість обслуговування навіть за умов змінних навантажень.

AI- та ML-алгоритми здійснюватимуть прогнозування трафіку, оптимізацію розподілу ресурсів і проактивне управління мережею, забезпечуючи високу продуктивність, надійність і

стійкість. Граничні обчислення та кешування зменшуватимуть затримки й розвантажуватимуть ядро мережі, розміщуючи обчислювальні завдання та контент ближче до кінцевих користувачів.

Інтероперабельність і стандартизація є необхідними для безперервного QoS у гетерогенних середовищах. Уніфіковані протоколи та відкриті інтерфейси сприятимуть розвитку вендорно-незалежних рішень, підвищуючи гнучкість і масштабованість архітектури 6G. На рисунку 3 наведено приклади загроз і викликів у сфері безпеки для мереж 6G [13].

Еволюція регуляторних підходів є необхідною умовою для розв'язання проблем, пов'язаних із розподілом спектра, ліцензуванням, захистом приватності та впровадженням стандартів кібербезпеки. Вирішальне значення має ефективна взаємодія урядових структур, регуляторних органів і представників індустрії для усунення правових та політичних бар'єрів, що стримують розвиток мереж шостого покоління [14].

Ключовим завданням є створення глобальних стандартів для технологій, протоколів та інтерфейсів 6G, які забезпечать сумісність, безперервну інтеграцію й гармонійну взаємодію різномірних компонентів мережі. Для цього необхідна активна участь промислових консорціумів, міжнародних організацій зі стандартизації та академічних установ.



Рис. 3. Технології інформаційної безпеки телекомунікаційної мережі 6G

Розгортання інфраструктури 6G — базових станцій, антенних систем, магістральних каналів зв'язку та вузлів граничних обчислень — потребує значних капіталовкладень і координації між операторами, виробниками обладнання та державними інституціями. Критичними залишаються питання вартості розгортання, територіальних обмежень та доступу до земельних ресурсів.

Формування фахових кадрів для проєктування, розбудови та експлуатації мереж 6G потребує цілеспрямованих інвестицій у програми освіти, підготовки та наукових досліджень. Особлива увага має бути зосереджена на розвитку знань у галузях штучного інтелекту, машинного навчання, архітектури мереж і кібербезпеки.

Впровадження технологій 6G матиме відчутний вплив на зайнятість, освіту, охорону здоров'я та цифрову інклюзію. Забезпечення рівного доступу до мереж шостого покоління й подолання цифрової нерівності є ключовими умовами соціальної інтеграції та сталого економічного розвитку [15].

Подолання технічних та організаційних викликів можливе лише за умов комплексної співпраці індустрії, урядових структур, наукових кіл та міжнародних організацій. Такий підхід є критично важливим для реалізації концепції мереж 6G і повного розкриття їхнього трансформаційного потенціалу для суспільства, економіки та технологічного прогресу [16].

Майбутні дослідження охоплюють широкий спектр технічних і міждисциплінарних завдань, зокрема: дослідження нових діапазонів спектра (терагерцового та субтерагерцового) та їхніх характеристик поширення; розроблення технологій динамічного спільного використання спектра

для оптимізації ресурсів і підтримки різноманітних сценаріїв застосування; створення вдосконалених протоколів передавання даних, архітектур мереж та рішень на основі граничних обчислень для досягнення наднизької затримки; розроблення методів прогнозування затримки, адаптивного планування трафіку та механізмів розподілу ресурсів у реальному часі; створення масштабованих високоєфективних протоколів і архітектур для підтримки масових комунікацій mMTC та IoT; дослідження енергоощадних протоколів, технологій прямої взаємодії між пристроями (D2D) та методів сегментації мереж (network slicing); інтеграція методів AI/ML для інтелектуального управління та автоматизації мереж; розроблення алгоритмів розподілу ресурсів на основі AI, предиктивної аналітики та самоорганізованих мереж (SON); створення криптографічних методів, стійких до атак квантових обчислень, та протоколів квантового розподілу ключів (QKD); розроблення протоколів, натхненних квантовими технологіями, для підвищення надійності та безпеки; дослідження архітектур граничних обчислень, кешування та розподілених платформ для сервісів із чутливістю до затримок; інтеграція ресурсів гетерогенних мереж (наземних, супутникових, аерокосмічних, підводних) для оптимізації покриття та ємності; створення енергоефективних архітектур і рішень з управління енергоспоживанням для зниження екологічного впливу; дослідження базових станцій на основі відновлюваних джерел енергії та технологій збору енергії; розроблення персоналізованих сервісів, адаптивних інтерфейсів користувача та занурювальних мультимедійних рішень; дослідження нових парадигм зв'язку, зокрема голографічного зв'язку, тактильного інтернету та нейро-комп'ютерних інтерфейсів; створення передових методів кіберзахисту, безпечної автентифікації та технологій збереження конфіденційності даних; розроблення систем управління довірою, блокчейн-рішень та децентралізованих платформ для підвищення безпеки комунікацій [10]. На рисунку 4 подано узагальнене бачення перспектив розвитку технологій і впровадження мереж 6G.

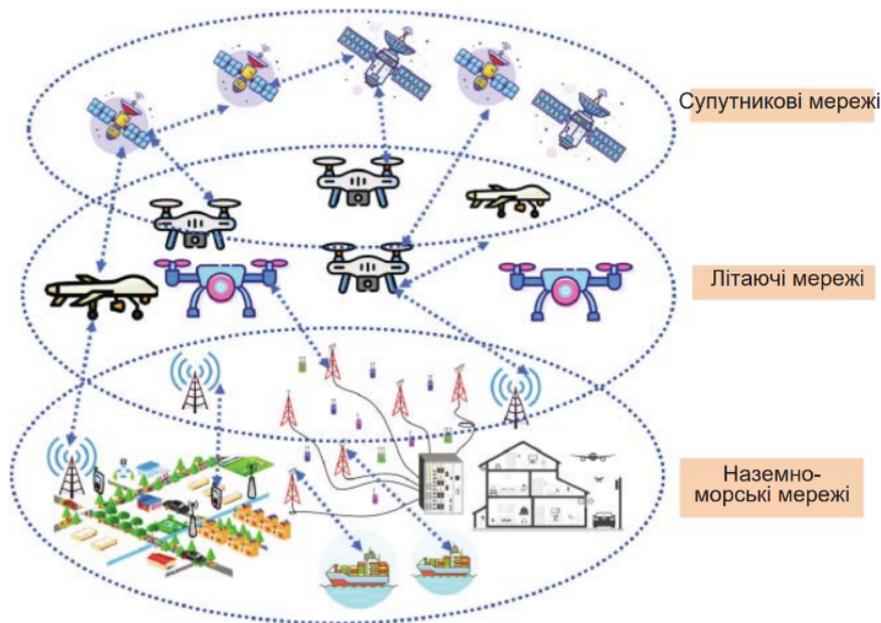


Рис. 4. Перспективи технологій і впровадження мереж 6G

Наведені напрями досліджень окреслюють лише частину потенційних можливостей для розвитку та впровадження протоколів і мереж шостого покоління. Повна реалізація трансформаційного потенціалу технологій 6G потребує комплексних міждисциплінарних досліджень, розроблення інноваційних рішень та консолідації зусиль наукової спільноти, промислових партнерів і державних інституцій. Такий підхід забезпечить ефективне подолання як технічних, так і організаційно-правових викликів, створивши передумови для гармонійного розвитку глобальної цифрової інфраструктури.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Розвиток архітектури мереж і протоколів шостого покоління (6G) відображає стрімкий поступ бездротових технологій, що

створює передумови для революційної трансформації підключеності, впровадження новітніх сервісів та стимулювання цифрових інновацій. Орієнтація на передові досягнення у сфері використання спектра, штучного інтелекту, обчислень на периферії та кіберзахисту забезпечує мережам 6G унікальні рівні продуктивності, надійності та енергоефективності, формуючи нову епоху глобальної цифрової взаємодії.

Архітектура 6G характеризуватиметься: використанням терагерцового та субтерагерцового діапазонів для досягнення надвисоких швидкостей передавання даних; впровадженням голографічних технологій зв'язку та занурювальних цифрових сервісів; інтеграцією супутникових систем зв'язку для забезпечення глобального покриття; застосуванням технологій динамічного розподілу спектра для раціонального використання ресурсів.

Протоколи 6G орієнтуватимуться на: інтелектуалізоване управління мережею з використанням методів штучного інтелекту й машинного навчання; квантово-захищене шифрування та стійкі до квантових атак методи захисту даних; динамічний розподіл ресурсів у реальному часі для забезпечення стабільної якості сервісу; розвиток технологій «зелених» комунікацій для зниження енергоспоживання та сталого розвитку.

У перспективі розвитку 6G особливого значення набуває консолідація зусиль промисловості, наукової спільноти та регуляторних органів. Співпраця в цих напрямках сприятиме: подоланню технічних бар'єрів і прискоренню розроблення рішень для інфраструктури; формуванню глобальних стандартів і забезпеченню інтероперабельності протоколів; створенню ефективних регуляторних механізмів для гармонійного впровадження технологій.

Реалізація науково-дослідного потенціалу, впровадження інновацій та міждисциплінарна інтеграція дозволять розкрити повний спектр можливостей технологій шостого покоління. Це сприятиме трансформації ключових галузей економіки, розширенню суспільних можливостей та визначенню стратегічного напрямку розвитку бездротових комунікацій у цифрову епоху.

#### Список бібліографічного опису

1. Zhang, Y. and Wang, L. (2023). Network architecture and protocols for 6G: a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 25 (8): 5874–5900. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3159001>.
2. Li, X. and Wang, Y. (2023). Advanced network architecture and protocols for 6G: state-of-the-art and future perspectives. *IEEE Transactions on Communications* 71 (1): 564–579. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3159003>.
3. Sun, Q. and Rappaport, T.S. (2023). Future network architecture and protocols for 6G: overview and research directions. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 22 (2): 1321–1335. <https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3159005>.
4. Xiaoyuan, C., Jie, G., Wen, W. et al. (2023). Holistic network virtualization and pervasive network intelligence for 6G. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. <https://doi.org/10.1109/comst.2021.3135829>.
5. Zhou, Z. and Wu, W. (2023). Intelligent network architecture and protocols for 6G: state-of-the-art and challenges. *IEEE Communications Magazine* 61 (5): 72–78. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2023.3159007>.
6. Zheng, H. and Zhang, L. (2023). Quantum computing-enabled network architecture and protocols for 6G: state-of-the-art and future directions. *IEEE Transactions on Quantum Engineering* 1 (3): 100–115. <https://doi.org/10.1109/TQE.2023.3159011>.
7. Wu, Q. and Chen, Y. (2023). Federated learning-based network architecture and protocols for 6G: state-of-the-art and future directions. *IEEE Transactions on Signal Processing* 71: 3481–3495. <https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3159013>.
8. Nair, M.M. and Tyagi, A.K. (2023). Chapter 11 – AI, IoT, blockchain, and cloud computing: the necessity of the future. In: *Distributed Computing to Blockchain* (ed. R. Pandey, S. Goundar, and S. Fatima), 189–206. Academic Press, ISBN 9780323961462. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96146-2.00001-2>.
9. Nair, M.M. and Tyagi, A.K. (2023). Blockchain technology for next-generation society: current trends and future opportunities for smart era. In: *Blockchain Technology for Secure Social Media Computing*. [https://doi.org/10.1049/PBSE019E\\_ch11](https://doi.org/10.1049/PBSE019E_ch11).
10. 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>.
11. 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>.
12. 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>.
13. 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>.
14. 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>.
15. Nair, M.M. and Tyagi, A.K. (2023). 6G: technology, advancement, barriers, and the future. In: *6G-Enabled IoT and*

AI for Smart Healthcare. CRC Press.

16. Li, Z. and Wang, X. (2023). Edge computing-enabled network architecture and protocols for 6G: opportunities and challenges. *IEEE Transactions on Cloud Computing* 11 (2): 240–254. <https://doi.org/10.1109/TCC.2023.3159009>.

#### References

1. Zhang, Y. and Wang, L. (2023). Network architecture and protocols for 6G: a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 25 (8): 5874–5900. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3159001>.
2. Li, X. and Wang, Y. (2023). Advanced network architecture and protocols for 6G: state-of-the-art and future perspectives. *IEEE Transactions on Communications* 71 (1): 564–579. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3159003>.
3. Sun, Q. and Rappaport, T.S. (2023). Future network architecture and protocols for 6G: overview and research directions. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 22 (2): 1321–1335. <https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3159005>.
4. Xiaoyuan, C., Jie, G., Wen, W. et al. (2023). Holistic network virtualization and pervasive network intelligence for 6G. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. <https://doi.org/10.1109/comst.2021.3135829>.
5. Zhou, Z. and Wu, W. (2023). Intelligent network architecture and protocols for 6G: state-of-the-art and challenges. *IEEE Communications Magazine* 61 (5): 72–78. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2023.3159007>.
6. Zheng, H. and Zhang, L. (2023). Quantum computing-enabled network architecture and protocols for 6G: state-of-the-art and future directions. *IEEE Transactions on Quantum Engineering* 1 (3): 100–115. <https://doi.org/10.1109/TQE.2023.3159011>.
7. Wu, Q. and Chen, Y. (2023). Federated learning-based network architecture and protocols for 6G: state-of-the-art and future directions. *IEEE Transactions on Signal Processing* 71: 3481–3495. <https://doi.org/10.1109/TPSP.2023.3159013>.
8. Nair, M.M. and Tyagi, A.K. (2023). Chapter 11 – AI, IoT, blockchain, and cloud computing: the necessity of the future. In: *Distributed Computing to Blockchain* (ed. R. Pandey, S. Goundar, and S. Fatima), 189–206. Academic Press, ISBN 9780323961462. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96146-2.00001-2>.
9. Nair, M.M. and Tyagi, A.K. (2023). Blockchain technology for next-generation society: current trends and future opportunities for smart era. In: *Blockchain Technology for Secure Social Media Computing*. [https://doi.org/10.1049/PBSE019E\\_ch11](https://doi.org/10.1049/PBSE019E_ch11).
10. 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>.
11. 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>.
12. 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>.
13. 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>.
14. 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>.
15. Nair, M.M. and Tyagi, A.K. (2023). 6G: technology, advancement, barriers, and the future. In: *6G-Enabled IoT and AI for Smart Healthcare*. CRC Press.
16. Li, Z. and Wang, X. (2023). Edge computing-enabled network architecture and protocols for 6G: opportunities and challenges. *IEEE Transactions on Cloud Computing* 11 (2): 240–254. <https://doi.org/10.1109/TCC.2023.3159009>.

Історія статті:

Отримано: 15.02.2026 Доопрацьовано: 03.03.2026 Прийнято до друку: 23.03.2026 Опубліковано: 29.03.2026