

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-39>

УДК 621.391

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

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

**Грабчак Назарій Віталійович**, аспірант

**Бриль Дмитро Романович**, аспірант

**Олійник Андрій Олегович**, аспірант

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

## ТЕХНОЛОГІЇ ФІЗИЧНОГО РІВНЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ 6G

**Васильківський М. В., Грабчак Н. В., Бриль Д. Р., Олійник А. О.** Технології фізичного рівня в телекомунікаційних мережах 6G. У статті розглядаються концептуальні засади та технічні рішення, спрямовані на проектування інтерфейсів радіодоступу нового покоління (Next-Generation Air Interfaces, NGAI), які здатні забезпечити досягнення цільових характеристик мереж шостого покоління (6G) у контексті підвищеної спектральної ефективності, наднизьких затримок, масштабованості, енергоефективності, кібербезпеки, стійкості до динамічних змін середовища передачі та інтеграції інтелектуальних функцій керування. Проаналізовано еволюцію технологій доступу до 5G із визначенням ключових архітектурних, функціональних та протокольних обмежень, що унеможливають повну реалізацію вимог 6G. Узагальнено напрями розвитку NGAI, зокрема впровадження когнітивного радіо з підтримкою інтелектуального спектрального аналізу, технологій неортогонального множинного доступу (NOMA) та поділового доступу за допомогою розділення повідомлень (RSMA), концепції massive MIMO з формуванням вузьких променів, застосування терагерцового діапазону, використання реконфігурованих інтелектуальних поверхонь (RIS) для адаптивного керування каналами, а також алгоритмів машинного навчання (ML) та глибинного навчання (DL). Окрему увагу приділено впливу AI/ML на функції динамічного керування ресурсами радіодоступу, включаючи адаптацію до спектрального середовища, передбачення навантаження, самооптимізацію та когнітивне прийняття рішень у реальному часі. Розглянуто інноваційні схеми модуляції й кодування, зокрема геометричні QAM, LDPC-коди, Polar-коди, технологію compressive sensing та мультиплексування на основі орбітального моменту імпульсу (OAM). Запропоновано архітектурну модель інтегрованого інтерфейсу радіодоступу з підтримкою обчислювальних інфраструктур Fog/Edge/Mist/Cloud, сервісів XR, Інтернету всього (IoE), автономних систем і мобільних агентів. Досліджено перспективи застосування Cell-Free Massive MIMO та компонентів несупровідних наземних (NTN) систем у межах архітектури 6G-SAGIN. Обґрунтовано системні підходи до реалізації енергоощадного, адаптивного, безпечного та інтелектуального NGAI як ключового елементу інфокомунікаційної екосистеми 6G, здатного забезпечити злиття фізичного, цифрового і кібернетичного просторів у єдину функціональну платформу майбутнього.

**Ключові слова:** інтерфейс радіодоступу нового покоління NGAI, спектральна ефективність, терагерцовий зв'язок, реконфігурована інтелектуальна поверхня (RIS), когнітивне радіо, штучний інтелект (AI), машинне навчання (ML), модуляція, кодування, інтеграція обчислювальних інфраструктур, мережа SAGIN, IoE, XR, Cell-Free MIMO.

**Vasykivskiy M., Hrabchak N., Bryl D., Oliinyk A.** 6G physical layer technologies in telecommunication networks.

The article explores the conceptual foundations and technical solutions aimed at designing Next-Generation Air Interfaces (NGAI) capable of meeting the target performance indicators of sixth-generation (6G) networks. These targets include enhanced spectral efficiency, ultra-low latency, scalability, energy efficiency, cybersecurity, resilience to dynamic transmission environments, and the integration of intelligent control functions. The evolution of access technologies up to 5G is analyzed, identifying key architectural, functional, and protocol-level limitations that hinder the full realization of 6G requirements. The study summarizes the main development directions for NGAI, including the implementation of cognitive radio with intelligent spectrum analysis, non-orthogonal multiple access (NOMA), rate-splitting multiple access (RSMA), massive MIMO with narrow-beamforming, terahertz-band communication, and the use of reconfigurable intelligent surfaces (RIS) for adaptive channel control. The role of machine learning (ML) and deep learning (DL) algorithms in these areas is emphasized. Special attention is given to the influence of AI/ML on dynamic radio resource management functions such as spectral environment adaptation, traffic load prediction, self-optimization, and real-time cognitive decision-making. The article examines innovative modulation and coding schemes, including geometric QAM, LDPC codes, Polar codes, compressive sensing, and orbital angular momentum (OAM)-based multiplexing. An architectural model of an integrated air interface is proposed, supporting Fog/Edge/Mist/Cloud computing infrastructures, XR services, the Internet of Everything (IoE), autonomous systems, and mobile agents. The potential of Cell-Free Massive MIMO and non-terrestrial network (NTN) components is explored within the 6G-SAGIN (Space–Air–Ground Integrated Network) architecture. Systemic approaches to implementing energy-efficient, adaptive, secure, and intelligent NGAI are substantiated, positioning it as a key enabler of the 6G infocommunication ecosystem, capable of merging physical, digital, and cyber spaces into a unified functional platform of the future.

**Keywords:** next-Generation access interface (NGAI), spectral efficiency, terahertz communication, reconfigurable intelligent surface (RIS), cognitive radio, artificial intelligence (AI), machine learning (ML), modulation, coding, integration of computing infrastructures, space–air–ground integrated network (SAGIN), internet of everything (IoE), extended reality (XR), cell-free MIMO.

**Постановка наукової проблеми.** Перехід до шостого покоління мобільного зв'язку (6G) супроводжується стрімким зростанням вимог до пропускної здатності, затримок, масштабованості, адаптивності та енергоефективності телекомунікаційних систем, зумовленим розвитком таких технологій, як Інтернет усього (IoE), XR-середовища, автономні системи, голографічна комунікація

та масове підключення мільярдів пристроїв. У цьому контексті критично важливою складовою є інтерфейси радіодоступу нового покоління (Next-Generation Air Interfaces, NGAI), які повинні забезпечити функціональну відповідність трансформаційним вимогам 6G-мереж [1].

Незважаючи на досягнення попередніх поколінь бездротового зв'язку (1G–5G), традиційні підходи до побудови радіоінтерфейсів виявляються недостатніми для підтримки цільових показників шостого покоління, таких як наднизькі затримки ( $<0,1$  мс), надвисока швидкість передавання (до Тбіт/с), динамічне керування спектром у THz-діапазоні, когнітивна адаптація до радіоумов, енергоощадне масове підключення та вбудований захист від кіберзагроз. Проблема ускладнюється необхідністю інтеграції інтелектуальних технологій (AI/ML), новітніх схем модуляції, багатокористувацьких технологій доступу (NOMA, RSMA, Cell-Free Massive MIMO), реконфігурованих інтелектуальних поверхонь (RIS), та розподіленої хмарної інфраструктури (Edge/Fog/Mist/Cloud). Таким чином, наукова проблема полягає в розробленні концептуальних засад і технічних рішень для проектування ефективних, масштабованих і інтелектуально керованих інтерфейсів радіодоступу нового покоління, які здатні забезпечити комплексну підтримку функціональних, технічних та сервісних вимог майбутніх 6G-мереж [2].

Метою дослідження є обґрунтування концептуальних підходів і розроблення технічних рішень щодо побудови інтерфейсів радіодоступу нового покоління (NGAI), які забезпечують досягнення цільових характеристик мереж шостого покоління (6G) у контексті спектральної ефективності, наднизьких затримок, масштабованості, енергоефективності, безпеки та інтеграції інтелектуальних функцій керування.

Основні цілі дослідження:

- проаналізувати еволюцію інтерфейсів радіодоступу від 1G до 5G та виявити обмеження традиційних технологій у контексті вимог 6G;
- систематизувати ключові технологічні напрями розвитку NGAI для 6G, зокрема: когнітивний доступ до спектра, NOMA/RSMA, Massive MIMO, динамічне формування променя, технології THz/mmWave, реконфігуровані поверхні (RIS) та інтелектуальні механізми керування;
- дослідити вплив технологій штучного інтелекту та машинного навчання на побудову інтелектуальних функцій керування ресурсами радіодоступу, включаючи спектральну адаптацію, прогнозне керування трафіком і самооптимізацію мереж;
- оцінити можливості використання нових схем модуляції та кодування (наприклад, геометричні QAM, compressive sensing, LDPC, Polar-коди) для підвищення завадостійкості, енергоефективності та пропускну здатності радіоканалів у високочастотних діапазонах;
- розробити узагальнену архітектурну модель інтерфейсу радіодоступу нового покоління, що враховує інтеграцію з обчислювальними інфраструктурами (Edge/Fog/Mist/Cloud), підтримку IoT, XR, автономних систем і хмарних сервісів;
- обґрунтувати принципи побудови універсального, адаптивного та безпечного NGAI як критичного елемента функціональної екосистеми мереж 6G, здатного забезпечити глибоку інтеграцію фізичного, цифрового та кіберпростору.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасного наукового доробку в галузі мереж шостого покоління (6G) засвідчує стрімкий розвиток інноваційних технологій, що формують основу їхньої архітектури, функціональності та інфраструктури. Основними напрямками досліджень є впровадження штучного інтелекту (ШІ) в інтерфейси радіодоступу, удосконалення технологій множинного доступу, розширення архітектурних можливостей за рахунок об'єднання наземних і неназемних сегментів, а також пошук рішень для забезпечення високої енергоефективності, масштабованості та спектральної ефективності.

Зокрема, у роботах [3–5] акцент зроблено на використанні ШІ як ключового елемента оптимізації інтерфейсів передачі в мережах 6G. Продемонстровано, що інтеграція інтелектуальних алгоритмів дозволяє адаптувати системи до потреб масштабованого розподіленого навчання, автоматично оновлювати протоколи та знижувати витрати на стандартизацію. Окрема увага приділяється перспективам застосування ШІ для підвищення ефективності в бездротових Wi-Fi-мережах, що вказує на його міжтехнологічний потенціал.

Публікації [6–8] висвітлюють новітні підходи до реалізації множинного доступу, зокрема концепції Next-Generation Multiple Access (NGMA) та вдосконаленої PDMA. Розглянуто поєднання SDMA та NOMA для досягнення терабітних швидкостей, підвищення щільності підключень та покращення енергоефективності. Запропоновано алгоритмічні рішення, що забезпечують низьку

складність обробки при збереженні високих показників надійності та пропускну здатності навіть у складних сценаріях з низьким SNR.

Окрема група робіт [9–11] зосереджується на інтеграції інтерфейсів радіодоступу в архітектуру мереж типу SAGIN (космос–повітря–земля) як основи для забезпечення глобального покриття, підтримки цифрових двійників, IoT і ШІ. Досліджуються архітектури з використанням несуходільних мереж (NTN), програмованих інтелектуальних поверхонь (RIS) і повітряних платформ, що дозволяє досягти низьких затримок та високої адаптивності. Визначено технічні вимоги до антенних систем, протоколів керування та енергоспоживання.

У дослідженнях [10, 14] значну увагу приділено проблематиці спектральної ефективності й енергоефективності. Пропонуються інтерфейсні рішення з використанням багатонесучих модулюючих схем, розумних антен, ретрансляторів та технологій бекскатер-комунікацій. Визначено, що саме обмеженість спектра та складність його динамічного розподілу стають критичними викликами для 6G.

З точки зору обчислювальної інфраструктури, публікації [10, 11, 13] аналізують роль еволюційних обчислень, туманних і мобільних граничних обчислень у побудові інтелектуальних мережеских інтерфейсів і сервісів. Обґрунтовано доцільність використання технологій ML/AI, федеративного навчання та гомоморфного шифрування для реалізації децентралізованої безпеки, ефективно обробки даних та керування радіоресурсами.

Крім того, в огляді [8, 9, 12] підкреслюється важливість інтеграції наземних і неназемних мереж із використанням CF-mMIMO, FSO та систем з розподіленими обчисленнями. Такий підхід є необхідним для забезпечення гіперконективності, масштабованого покриття й підтримки сервісів нового покоління. Отже, огляд останніх досліджень вказує на багатовекторний розвиток 6G, у якому поєднуються інтелектуальні, архітектурні, спектральні та енергоефективні інновації. З огляду на технологічні та нетехнологічні бар'єри впровадження, ключовим завданням є створення гнучкої, адаптивної й стійкої мережевої інфраструктури, здатної задовольнити зростаючі вимоги цифрової економіки та інформаційного суспільства.

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

Перехід до кожного нового покоління бездротових технологій супроводжується фундаментальними змінами у підходах до побудови телекомунікаційних систем, що зумовлює появу нових можливостей у сфері сервісів, застосунків та користувацької взаємодії. У контексті формування мереж шостого покоління (6G) ключову роль відіграють інтерфейси радіодоступу нового покоління (Next-Generation Air Interfaces, NGAI), які забезпечують виконання цільових показників у сфері продуктивності, адаптивності, безпеки та енергоефективності. Переваги технології 6G наведено на рисунку 1.



Рис. 1. Схема функціонально-узгоджених характеристик мережі 6G

Історичний розвиток мобільних мереж від 1G до 5G дозволив досягти значного підвищення спектральної ефективності, розширення пропускну здатності та скорочення затримок. Проте сучасні вимоги, обумовлені масовим впровадженням Інтернету речей (IoT), доповненої реальності (AR/MR), автономних систем та кіберфізичних комплексів, висувають нові виклики до структури,

масштабованості та якості обслуговування бездротових інтерфейсів [1].

У межах дослідження визначено, що для реалізації потенціалу мереж 6G (рис. 2) необхідне проектування інтерфейсів радіодоступу, які базуються на поєднанні низки інноваційних технологій, зокрема: адаптивних антенних систем, інтелектуального керування спектром, машинного навчання (ML) та штучного інтелекту (AI) [2].

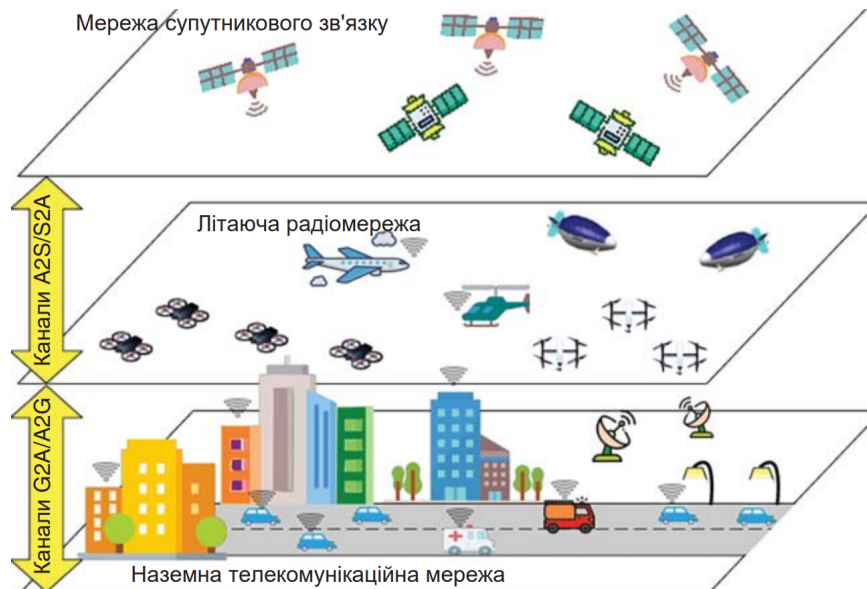


Рис. 2. Структура сегменту інтегрованої мережі 6G

Основні напрями розвитку NGAІ для 6G включають:

- підвищення спектральної ефективності за рахунок динамічного доступу до спектра (DSA), когнітивного радіо, високоефективних схем модуляції та повторного використання частотного ресурсу;
- забезпечення наднизької затримки та високої надійності (URLLC) через впровадження технологій периферійних обчислень, предиктивної аналітики та розподіленої обробки;
- підтримка масової підключеності в умовах великої кількості пристроїв за допомогою massive MIMO, динамічного формування променя та мережевого сегментування;
- енергоефективність, яка досягається за рахунок оптимізації режимів передавання, енергозбирання та використання енергоощадних схем підсилення;
- забезпечення кібербезпеки через впровадження сучасних механізмів криптографії, автентифікації та захисту даних у реальному часі [3].

У дослідженні також систематизовано технічні особливості розподілення спектра для потреб 6G, зокрема: ефективне використання міліметрового спектра (mmWave) та терагерцового діапазону (THz); інтеграція інтелектуальних методів динамічного доступу до спектра; урахування технічних обмежень, пов'язаних із затуханням сигналів у вищих діапазонах частот [4].

Окрему увагу приділено проектуванню радіоінтерфейсів, що мають забезпечити: використання massive MIMO у поєднанні з алгоритмами формування променя для підвищення зони покриття; впровадження технологій неортогонального множинного доступу (NOMA) як альтернативи традиційним схемам ОМА (FDMA, TDMA); інтелектуальне керування частотним ресурсом шляхом застосування когнітивних і машинних методів спектрального аналізу.

У результаті аналізу виявлено, що фундаментальними чинниками продуктивності 6G (рис. 3) є також форма сигналів і методи модуляції. Основними завданнями в цій галузі є: підвищення спектральної ефективності шляхом створення нових сигналів і оптимізованих модуляційних структур; досягнення мінімальних затримок і високої надійності через зменшення накладних витрат у часі та підвищення завадостійкості; оптимізація енергоспоживання за рахунок впровадження енергоощадних методів передавання і приймання.

Розвиток схем модуляції зосереджено на: розширенні можливостей QAM через геометричні трансформації та решіткові підходи; застосуванні машинного навчання для динамічного керування параметрами модуляції; використанні розріджених сигналів (compressive sensing), що дозволяє

скорочувати надмірність передавання.

З урахуванням вищезазначених аспектів обґрунтовано, що інтерфейси радіодоступу нового покоління є критично важливою складовою телекомунікаційної інфраструктури 6G. Їх впровадження відкриває перспективи побудови універсальних, інтелектуальних і енергоефективних бездротових систем, здатних забезпечити трансформаційний рівень мобільного зв'язку, інтегруючи фізичний, цифровий та кібернетичний простори в єдину функціональну екосистему.

Проектування ефективних схем множинного доступу для мереж шостого покоління (6G) зумовлене необхідністю вирішення низки ключових викликів, серед яких:

- масове підключення пристроїв - зі зростанням числа пристроїв Інтернету речей (IoT), очікується, що 6G забезпечить обслуговування понад  $10^7$  пристроїв на  $\text{km}^2$ , що потребує високоефективних схем доступу з мінімальними затримками та конфліктами;

- використання високочастотного спектра - частоти в терагерцовому (THz) діапазоні мають значний потенціал для реалізації надвисокошвидкісного зв'язку, однак відзначаються високими втратами при поширенні та чутливістю до перешкод. Це потребує гнучкого керування спектром і розвитку нових методів доступу з урахуванням напрямленості, розсіювання та динамічного розподілу частот;

- підтримка наднизьких затримок та висока пропускна здатність - 6G має забезпечувати затримки на рівні менше 0,1 мс та швидкість передавання в терабітах за секунду, що вимагає нових парадигм модуляції, кодування та доступу до середовища [5].

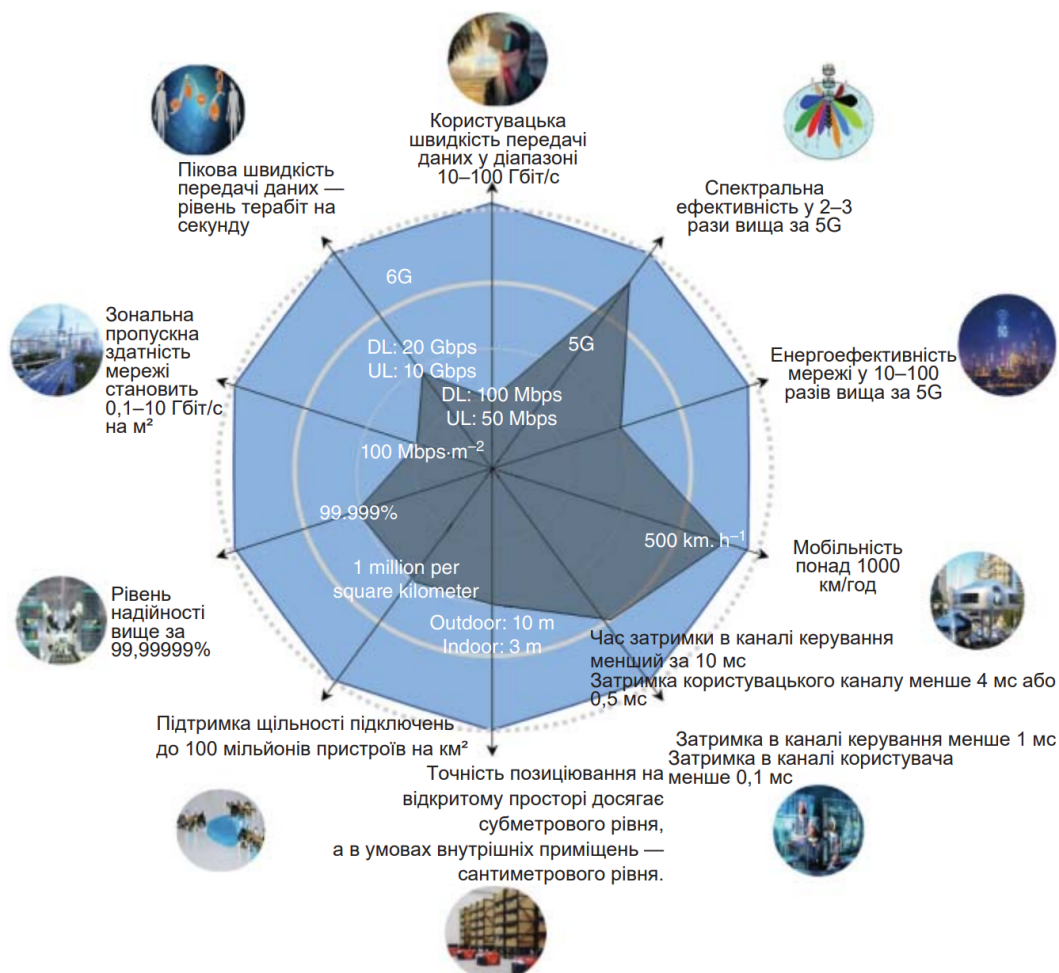


Рис. 3. Технологічні переваги мереж 6G

У межах розвитку мереж шостого покоління перспективними вважаються інноваційні підходи до організації доступу, серед яких:

- NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) забезпечує підвищення спектральної ефективності шляхом одночасної передачі сигналів декількох користувачів у одній часово-частотній області із

подальшим їх декодуванням за допомогою послідовного скасування перешкод (SIC, Successive Interference Cancellation);

- Rate-Splitting Multiple Access (RSMA) реалізує гнучке керування передачею даних шляхом розділення повідомлень, що дозволяє ефективно зменшити міжкористувацькі інтерференції та підвищити сумарну пропускну здатність мережі;

- Cell-Free Massive MIMO передбачає децентралізовану архітектуру з великою кількістю розподілених антен, що забезпечує рівномірне обслуговування користувачів незалежно від їхнього розташування, мінімізуючи рівень інтерференції та покращуючи якість обслуговування [6].

Сучасні дослідження спрямовані на вдосконалення методів кодування та ефективного використання спектрального ресурсу, зокрема:

- інтелектуальне керування спектром із використанням технологій когнітивного радіо та методів машинного навчання дозволяє динамічно адаптувати параметри доступу відповідно до змін у навантаженні, спектральному середовищі та рівні перешкод;

- кодування для терагерцового діапазону передбачає застосування адаптивних схем з високими можливостями корекції помилок, зокрема LDPC (Low-Density Parity-Check) та Polar-кодування, оптимізованих для компенсації згасань, фазових спотворень та нестабільностей у THz-каналах. Розробка нових підходів до модуляції та формування сигналів спрямована на підвищення ефективності спектрального використання та адаптивність передачі:

- мультиплексування на основі орбітального моменту імпульсу (Orbital Angular Momentum, OAM) дає змогу реалізувати паралельну передачу декількох незалежних потоків через різні фазові конфігурації електромагнітних хвиль;

- AI-NOMA та кодування з використанням машинного навчання забезпечують динамічне налаштування параметрів модуляції та доступу в реальному часі, підвищуючи ефективність передачі в умовах нестабільних каналів завдяки використанню моделей глибокого навчання.

Передавання сигналів у терагерцовому діапазоні (0.1–10 ТГц) розглядається як ключова технологія для досягнення терабітних швидкостей, проте її реалізація супроводжується низкою технічних викликів, зокрема: необхідністю застосування антенних систем із високим коефіцієнтом підсилення; впровадженням високоточних методів керування променем (beamforming); використанням реконфігурованих інтелектуальних поверхонь (RIS) та багатокрокового ретранслявання для компенсації втрат і забезпечення стійкості зв'язку [7].

У контексті формування архітектури та функціоналу мереж шостого покоління (6G) ключову роль відіграє інтеграція низки базових технологій, які забезпечують підвищення ефективності, адаптивності, безпеки та масштабованості систем. На рисунку 4 подано шість базових технологій, які забезпечують підвищення ефективності та безпеки 6G-систем [8].



Рис. 4. Функціонал мережі 6G з підтримкою штучного інтелекту

Штучний інтелект і машинне навчання (AI/ML), що виступають рушієм автономності мереж та інтелектуальної оптимізації ресурсів. AI/ML забезпечують когнітивне керування трафіком,

прогнозування навантаження, автоматизоване обслуговування та глибоку адаптацію до умов середовища передачі. Використання моделей глибокого навчання, зокрема DRL, підтримує самоконфігурацію, самоналагодження та самокерування мережевими функціями в режимі реального часу. THz- та міліметрові хвилі (THz/mmWave) відкривають можливості для досягнення надвисоких швидкостей передавання (до кількох Тбіт/с), що є критичним для підтримки голографічного зв'язку, XR-інтерфейсів та великих масивів IoT-пристроїв. Ці частоти, хоч і обмежені за дальністю поширення, забезпечують надшироку смугу пропускання та підвищену ємність мережі за рахунок ультраширокопосмугової передачі. Масиви антен з масивним багатокористувацьким MIMO (Massive MIMO) забезпечують просторову мультиплексію, формування вузьких променів (beamforming), підвищення спектральної ефективності та зниження міжканальної інтерференції. У поєднанні з AI/ML ці системи дають змогу динамічно адаптувати промені до мобільних користувачів і підвищувати стійкість зв'язку в умовах складного радіосередовища [9].

На рисунку 5 показано взаємозв'язки між ключовими технологіями 6G і перспективними прикладними рішеннями.



Рис. 5. Засоби впровадження мереж 6G у поєднанні з технологіями наступного покоління

Інтернет усього (IoE), який поєднує IoT, IIoT, IoV, IoMT, IoRT тощо, є основою для створення надмасштабної, гетерогенної, контекстно-чутливої екосистеми сенсорів, роботів, транспортних засобів і пристроїв. 6G-мережі мають забезпечити ефективний доступ, пріоритетизацію трафіку, керування мобільністю та енергозбереження для мільярдів підключених об'єктів. Технології периферійних обчислень (Edge, Mist, Fog, Dew) та хмарних обчислень (Cloud, Mobile Cloud Computing) уможливають розподілений аналіз даних, зменшення затримок, локальну обробку критичних завдань і оптимізацію маршрутизації. З урахуванням розвитку технологій, подальша еволюція можливостей 6G щодо ємності та швидкості передавання відображена в [10]. У свою чергу, ключові enabling-технології мережі 6G систематизовано на рисунку 6 [11].

У 6G реалізується тісна інтеграція обчислювальних ресурсів на різних рівнях – від датчиків до центральних хмар – з гнучким переміщенням сервісів у просторі-часі (service migration, offloading). Просторові обчислення (Spatial Computing) відіграють ключову роль у підтримці XR-застосунків, цифрових двійників, автономного керування та інтерактивного сприйняття простору. Вони поєднують сенсорні дані, геопросторову інформацію та AI-моделі для синхронізації реального та віртуального середовищ, що критично важливо для реалізації концепції метавесвіту в 6G.

Квантова безпека як фундаментальний елемент кіберзахисту передбачає впровадження квантової криптографії, генераторів істинної випадковості та QKD (Quantum Key Distribution) для гарантування стійкості проти атак з використанням квантових комп'ютерів. У рамках 6G важливим є і розвиток Post-Quantum Cryptography (PQC) для гібридних сценаріїв. Мережева сегментація (Network Slicing) забезпечує логічне розділення фізичної інфраструктури на ізольовані віртуальні фрагменти з різними характеристиками продуктивності, затримки, надійності та безпеки. Це дає змогу реалізувати концепцію "мережа як послуга" (NaaS) для різних галузей (eHealth, транспорт, промисловість, розваги тощо) з гарантованою якістю обслуговування [12].



Рис. 6. Функціональні особливості безпроводних мереж 6G

Таким чином, як показано на рис. 7, ШІ та МН стануть базовими технологіями для реалізації інтелектуальної оптимізації 6G-мереж, автономного керування, ефективного керування спектром, прогнозного обслуговування та персоналізації користувацького досвіду. Інтеграція інтелектуальних систем у структуру 6G дозволить мережам адаптуватися до змінних вимог, забезпечувати високу якість обслуговування та відкривати нові можливості для інноваційного розвитку [13].



Рис. 7. Поєднання штучного інтелекту та архітектури 6G

У мережах шостого покоління відбудеться інтеграція концепцій хмарних (Cloud), периферійних (Edge) та туманних (Mist) обчислень для створення розподіленої обчислювальної інфраструктури, орієнтованої на ефективну доставку сервісів кінцевим користувачам (рис. 8) [14].



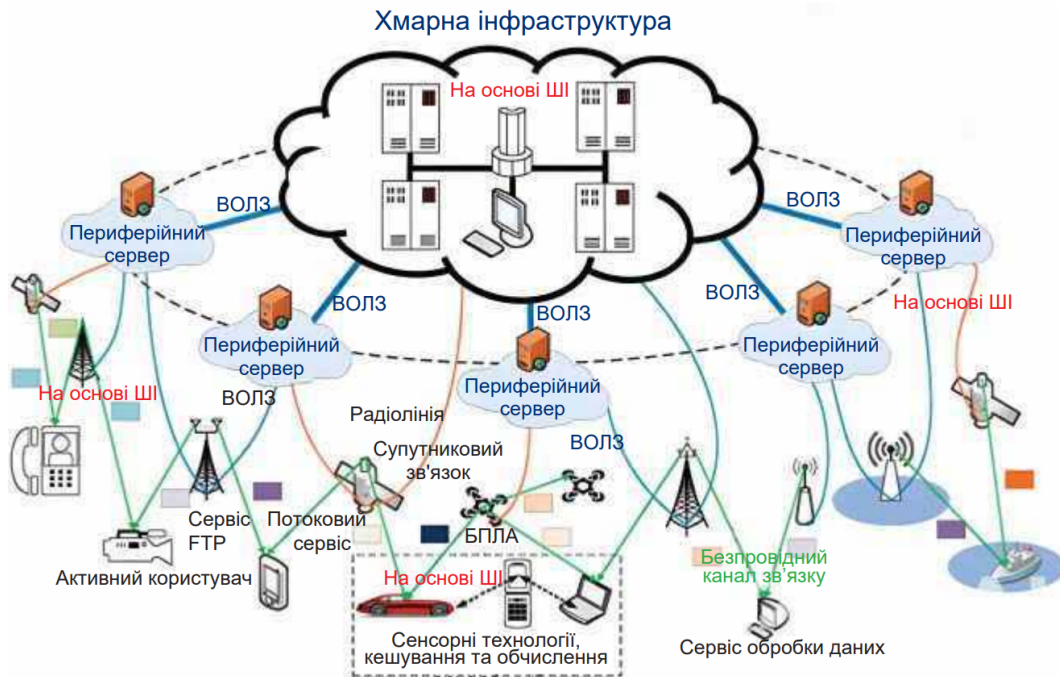


Рис. 8. Інтелектуальна хмарна архітектура мереж доступу 6G

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Розробка інтерфейсів радіодоступу нового покоління є критичним чинником на шляху до реалізації концепції 6G — мережі з ультрашвидким, наднадійним та повсюдним бездротовим з'єднанням. Завдяки синергії міждисциплінарних підходів та інтеграції новітніх технологій, таких як інтелектуальні антенно-фідерні системи, ефективне використання спектра, штучний інтелект (AI), машинне навчання (ML), квантові технології, фотоніка та бездротова передача енергії (WPT), 6G-інтерфейси створюють основу для реалізації якісно нових сервісів та сценаріїв цифрової взаємодії.

Основними перевагами інтерфейсів доступу 6G виступають: підвищення спектральної та енергетичної ефективності; зменшення затримок і забезпечення гарантованої якості обслуговування (QoS); підтримка масового підключення пристроїв і висока масштабованість; адаптація до динамічних умов середовища передачі; забезпечення надійності та кіберстійкості мережевих рішень. Інтеграція AI/ML у фізичний та мережевий рівні сприятиме реалізації самоналаштовуваних систем, що зможуть автономно оптимізувати ресурси та адаптуватися до змін навколишнього середовища. Наднизькі затримки та висока пропускну здатність відкривають шлях до впровадження сервісів телеприсутності, глибоко занурених XR-досвідів, автономного транспорту, телемедицини, розумних міст та індустрії 5.0. Однак повномасштабне розгортання інтерфейсів 6G супроводжується низкою викликів: потреба у створенні глобально узгоджених стандартів, забезпечення інформаційної безпеки, зниження енергоспоживання, підтримка стійкості до збоїв і врахування етичних аспектів використання автономних рішень та персоналізованих даних.

Перспективи подальших досліджень охоплюють: проектування нових архітектур інтерфейсів доступу з підтримкою інтелектуальних функцій; моделювання та оптимізацію розподілу радіоресурсів; розробку енергоефективних протоколів доступу; інтеграцію квантових та фотонних рішень на фізичному рівні; дослідження соціально-економічних наслідків впровадження 6G; формування міждисциплінарної нормативно-технічної бази для гармонізації розвитку технологій. Таким чином, інтерфейси доступу нового покоління виступають рушієм еволюції інфокомунікаційної інфраструктури, визначаючи вектор розвитку цифрового суспільства у бік сталості, інклюзивності та інноваційності.

#### 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. Lakshmanan, A., 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. Васильківський М., Коломієць А., Будащ М., Прикмета А., Олійник А. Технологічні аспекти впровадження програмно-керованих мереж 5G та 6G. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2024. Вип. № 56. С. 335-344.
4. Tyagi, A.K. (2024). Dew computing: state of the art, opportunities, and research challenges. In: Machine Learning Algorithms Using Scikit and TensorFlow Environments. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8531-6.ch017>.
5. 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>.
6. 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>.
7. 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.
8. Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G [Текст] / М. В. Васильківський, А. Коломієць, М. Будащ // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2022. – № 6. – С. 53–60.
9. Васильківський М. В. 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.
10. 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.
11. Оптимальні 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. Будащ // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2023. – № 2. (319). – С. 48–55.
12. Васильківський М. В. Забезпечення інформаційного захисту в телекомунікаційних мережах 6G [Текст] / М. В. Васильківський, М. В. Будащ, О. С. Болдирева // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2023. – № 50. – С. 142-150.
13. Васильківський М. В. Інтегрована супутникова мережа 6G [Текст] / М. В. Васильківський, Г. Варгатюк, Д. В. Нікітович // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – Вип. 1. – С. 66–75.
14. 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.

#### 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. Lakkshmanan, A., 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. Vasylykivskiy M., Kolomiets A., Budash M., Prykmeta A., Oliinyk A. Tekhnolohichni aspekty vprovadzhennia prohramno-kerovanykh merezh 5G ta 6G. Komp'uterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. 2024. Vyp. № 56. S. 335–344 [in Ukrainian].
4. Tyagi, A.K. (2024). Dew computing: state of the art, opportunities, and research challenges. In: Machine Learning Algorithms Using Scikit and TensorFlow Environments. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8531-6.ch017>.
5. 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>.
6. 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>.
7. Vasylykivskiy M. V. Doslidzhennia arkhitektury shtuchnoho 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].
8. Otsiniuvannia parametriv radiotraktiv infokomunikatsiinykh system 5G/6G [Text] / M. V. Vasylykivskiy, A. Kolomiets, M. Budash // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii «Tekhnichni nauky». – 2022. – № 6. – S. 53–60 [in Ukrainian].
9. Vasylykivskiy M. V. Doslidzhennia funktsionalnykh parametriv infokomunikatsiinykh merezh 6G [Text] / M. Vasylykivskiy, A. Kolomiets, N. Hrabchak // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii «Tekhnichni nauky». – 2022. – № 6. – S. 46–52 [in Ukrainian].
10. Optymizatsiia adaptyvnykh 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].
11. Optymalni syhnalno-kodovi konstruktzii dlia pidvyshchennia efektyvnosti infokomunikatsiinykh radiosystem mobilnoho zviyazku 5G ta 6G [Text] / M. V. Vasylykivskiy, O. S. Boldyreva, H. Vargatiuk, M. V. Budash // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii «Tekhnichni nauky». – 2023. – № 2 (319). – S. 48–55 [in Ukrainian].

12. Vasylykivskiy M. V. Zabezpechennia informatsiinoho zakhystu v telekomunikatsiinykh merezhakh 6G \[Text] / M. V. Vasylykivskiy, M. V. Budash, O. S. Boldyreva // Komp'uterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. – 2023. – № 50. – S. 142–150 [in Ukrainian].
13. Vasylykivskiy M. V. Intehrovana suputnykova merezha 6G \[Text] / M. V. Vasylykivskiy, H. Vargatiuk, D. V. Nikitovych // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2023. – Vyp. 1. – S. 66–75 [in Ukrainian].
14. Pidvyshchennia efektyvnosti intelektualnykh merezh MIMO na osnovi 6G \[Text] / M. V. Vasylykivskiy, O. S. Horodetska, O. V. Stalchenko, B. S. Klymchuk // Informatsiini tekhnolohii ta komp'uterna inzheneriia. – 2023. – № 1. – S. 92–101 [in Ukrainian].