

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-40>

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.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ЕФЕКТИВНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 6G

Городецька О. С., Будаш М. В., Павліченко Ю. Ю., Прикмета А. В. Науково-технічні основи ефективного функціонування телекомунікаційних мереж 6G. У статті представлено комплексний аналіз ключових векторів розвитку технологій шостого покоління мобільного зв'язку (6G), що розглядається як основа побудови високопродуктивної, безпечної, адаптивної та енергоефективної інфокомунікаційної інфраструктури майбутнього. Досліджено сучасні наукові публікації, які висвітлюють стратегічні напрями еволюції бездротових мереж у контексті зростання вимог до швидкості передавання даних, затримки, масштабованості, надійності та безпеки. Обґрунтовано основні функціональні цілі 6G, зокрема досягнення терабітних швидкостей передавання, субмілісекундних затримок, підтримку масової гіперзв'язності, інтеграцію штучного інтелекту в керуванні мережею, забезпечення енергоефективності та захисту конфіденційності даних. Особливу увагу приділено перспективним технологіям, які формують технічний фундамент 6G: терагерцовим комунікаціям, massive MIMO, голографічному зв'язку, когнітивному керуванню спектром, блокчейн-рішенням, квантово-безпечним протоколам, енергоавтономним пристроям і edge/fog-computing. Проведено систематизацію основних викликів, серед яких виділено складність використання THz-діапазону, зростання кіберзагроз, відсутність стандартизації для надвисоких частот, вимоги до енергоспоживання та етичні аспекти використання ШІ. У процесі дослідження визначено архітектурні підходи до реалізації 6G, включаючи оркестрацію на основі ШІ, децентралізацію сервісів, підтримку новітніх сценаріїв (AR/VR/XR, IoNT, BCI, голографічна комунікація), гнучке управління ресурсами та інтеграцію наземних і неназемних сегментів. Окреслено стратегічні напрями подальших наукових досліджень: розвиток наноелементної бази для антен і сенсорів, моделювання інтелектуального керування мережею, удосконалення захищених протоколів обміну та розробка стандартизованих методів валідації продуктивності. Запропонований аналіз закладає концептуальну основу для розроблення надійної та масштабованої архітектури мереж шостого покоління.

Ключові слова: штучний інтелект, голографічний зв'язок, квантова безпека, енергоефективність, когнітивне радіо, блокчейн, мережа нового покоління, інтелектуальне керування спектром, автономна система, Інтернет речей, розширена реальність.

Horodetska O., Budash M., Pavlichenko Yu., Prykmeta A. Scientific and technical foundations for the efficient operation of 6G telecommunication networks. The article presents a comprehensive analysis of the key development vectors of sixth-generation (6G) mobile communication technologies, which are considered the foundation for building a high-performance, secure, adaptive, and energy-efficient infocommunication infrastructure of the future. The study reviews contemporary scientific publications highlighting the strategic directions of wireless network evolution in the context of increasing demands for data transmission speed, latency, scalability, reliability, and security. The core functional objectives of 6G are substantiated, including achieving terabit-level data rates, sub-millisecond latency, support for massive hyperconnectivity, integration of artificial intelligence (AI) into network management, energy efficiency, and data confidentiality protection. Particular attention is paid to promising technologies that form the technical foundation of 6G: terahertz communications, massive MIMO, holographic communication, cognitive spectrum management, blockchain solutions, quantum-secure protocols, energy-autonomous devices, and edge/fog computing. The primary challenges are systematized, including the complexity of THz band utilization, growing cyber threats, lack of standardization for ultra-high frequencies, increasing energy consumption demands, and ethical considerations related to AI deployment. The research outlines architectural approaches to 6G implementation, including AI-based orchestration, service decentralization, support for emerging scenarios (AR/VR/XR, IoNT, BCI, holographic communication), flexible resource management, and the integration of terrestrial and non-terrestrial segments. Strategic directions for further research are identified, such as the development of nanoscale components for antennas and sensors, modeling of intelligent network management, enhancement of secure communication protocols, and the development of standardized performance validation methods. The proposed analysis provides a conceptual basis for designing a reliable and scalable sixth-generation network architecture.

Keywords: artificial intelligence, holographic communication, quantum security, energy efficiency, cognitive radio, blockchain, next-generation network, intelligent spectrum management, autonomous system, Internet of Things, augmented reality.

Постановка наукової проблеми. Стрімкий розвиток цифрових технологій та впровадження інноваційних сервісів, таких як голографічна комунікація, телеприсутність, автономні кіберфізичні системи та цифрові двійники, висувають до телекомунікаційних мереж нові вимоги — зокрема, надвисокі швидкості передавання даних, мінімальні затримки, підвищену надійність, масштабованість та енергоефективність.

Технології п'ятого покоління (5G), хоча й стали важливим етапом розвитку бездротового

зв'язку, виявляються недостатніми для забезпечення цих вимог. Це обумовлює необхідність переходу до мереж шостого покоління (6G), які мають забезпечити якісно новий рівень цифрової взаємодії, інтегруючи штучний інтелект, інтелектуальне управління ресурсами, підтримку надвисокочастотних діапазонів і реального часу обробки інформації [1].

Водночас реалізація концепції 6G супроводжується низкою складних науково-технічних проблем:

- розроблення нових моделей архітектури мереж і управління ресурсами, здатних до самонавчання, адаптації та автономної оптимізації;
- забезпечення енергоефективності при стрімкому зростанні кількості підключених пристроїв та обсягів трафіку;
- розв'язання питань регулювання і стандартизації в умовах використання надвисокочастотних спектрів і глобальної взаємодії різних суб'єктів телекомунікаційного ринку;
- аналіз соціоетичних та правових наслідків масового впровадження нових технологій, зокрема щодо конфіденційності, цифрової рівності та впливу автоматизації [2].

Таким чином, актуальна наукова проблема полягає у комплексному дослідженні технологічних, енергетичних, регуляторних та соціоетичних аспектів розроблення і впровадження систем 6G. Вирішення цієї проблеми потребує формування нових концептуальних засад і прикладних підходів до створення безпечних, інтелектуально керованих, масштабованих та енергоефективних бездротових мереж, орієнтованих на потреби інноваційного цифрового середовища [3].

Метою дослідження є систематизація ключових мотиваційних чинників розвитку технологій шостого покоління мобільного зв'язку (6G) та обґрунтування їхнього потенціалу як основи нової парадигми бездротових комунікацій. У межах дослідження передбачено комплексний аналіз технічних, соціальних та інфраструктурних драйверів переходу до 6G, а також визначення фундаментальних вимог до архітектури, протоколів і функціональних характеристик майбутніх мереж. Отримані результати дозволять сформулювати наукове підґрунтя для створення інноваційних, безпечних, енергоефективних і соціально відповідальних технологічних рішень шостого покоління.

Основні цілі дослідження:

- аналіз ключових характеристик і функціональних цілей 6G — дослідження потенціалу технологій шостого покоління у відповідь на нові виклики цифрового суспільства, з урахуванням обмежень існуючих мереж 5G і прогнозованих вимог до мережевих сервісів після 2030 року;
- обґрунтування основних технологічних напрямів розвитку 6G;
- ідентифікація ключових бар'єрів та викликів упровадження 6G, пов'язаних із технічними, регуляторними, безпековими, соціальними та етичними аспектами;
- формулювання перспектив подальших досліджень для подолання виявлених бар'єрів.
- розробка системного підходу до формування технологічної основи 6G, який дозволяє об'єднати технічні інновації з принципами відповідального розвитку, враховуючи соціальні, етичні й екологічні фактори. Вказані цілі визначають рамки дослідження, спрямованого на формування наукового підґрунтя для розробки інноваційних, безпечних та енергоефективних комунікаційних технологій шостого покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика розвитку технологій шостого покоління мобільного зв'язку (6G) активно досліджується як у вітчизняних, так і в зарубіжних наукових колах. Сучасні дослідження відображають стратегічну важливість 6G для формування нової парадигми бездротової комунікації, яка поєднує ультрависоку пропускну здатність, наднизьку затримку, інтелектуальне управління ресурсами й гнучку архітектуру мереж.

У роботах [4–6] особлива увага приділяється подоланню обмежень пропускну здатності, впровадженню концепції гіперзв'язності, а також розвитку технологій cell-free MIMO, інтеграції наземних і неназемних мереж, розподілених обчислень та інтелектуальних систем управління для підтримки масового підключення.

У публікаціях [7, 8] акцентовано на використанні 6G для новітніх застосувань — Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI), розширеної реальності (XR), глобального покриття та високої ситуаційної обізнаності завдяки впровадженню периферійного інтелекту та оркестрації ресурсів. Визначено основні KPI майбутніх мереж, ключові обмеження технологій 5G та перспективи їх подолання шляхом розвитку 6G. Дослідники також підкреслюють потенціал поєднання 6G із блокчейн-технологіями для підвищення безпеки, надійності й швидкодії мережевих сервісів [9].

Водночас, висока ступінь зв'язності породжує нові виклики, пов'язані з забезпеченням конфіденційності та захистом даних [10].

Публікації [2], [11–13] розглядають застосування 6G у сфері мультимедійних комунікацій, інтелектуальних транспортних систем (ITS), розумного здоров'я (smart healthcare), смарт-сіті та промислового IoT. Визначено потребу у стандартизації обробки контексту, розробці безпечних, адаптивних каналів зв'язку, впровадженні технологій бездротового енергоживлення, дистанційного зондування й масштабованої візуалізації.

Окремий напрям досліджень зосереджено на питаннях кібербезпеки, включно з розвитком мережевого розділення, edge computing, federated learning та інтеграції блокчейн-рішень для захисту даних у динамічних і гетерогенних цифрових середовищах.

Сучасні публікації узгоджено підкреслюють такі ключові технологічні напрями розвитку 6G:

- використання терагерцового (THz) спектра та оптичних бездротових технологій (VLC);
- впровадження інтелектуальних поверхонь і розподілених III-систем для мережевої оркестрації;
- підтримка Super-IoT, XR/AR/VR-систем, голографічного зв'язку та мультисенсорних інтерфейсів;
- інтеграція MIMO, просторової модуляції та адаптивного управління спектром;
- розвиток енергетично автономних пристроїв і трансиверів нового покоління для інтелектуальних середовищ, автономних систем та Інтернету наноречей (IoNT).

У ряді робіт [3–5] відзначається необхідність децентралізації сервісів, зокрема через застосування edge computing, federated learning та розподілених безпекових моделей, що дозволяє мінімізувати вузькі місця централізованих архітектур. Загалом, аналіз сучасних досліджень свідчить про багатовекторний характер розвитку 6G, що охоплює технологічні інновації, еволюцію архітектури мереж, поступову стандартизацію та вирішення соціально-етичних і правових питань. Системний підхід до формування архітектури й функціональних характеристик 6G визначається як критичний для задоволення потреб майбутнього цифрового суспільства.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. У ході дослідження здійснено комплексний аналіз ключових характеристик і функціональних цілей шостого покоління мобільного зв'язку (6G), що розглядається як відповідь на нові виклики цифрового суспільства. Обґрунтування технологічних пріоритетів базувалося на аналізі обмежень 5G та прогнозованих вимог до інфокомунікаційної інфраструктури після 2030 року (рис. 1). Серед визначальних векторів розвитку 6G виділено:

- досягнення надвисоких швидкостей передавання даних — до кількох Тбіт/с, що відкриває можливості для використання ресурсомістких застосувань (8K/16K-відео, голографічного зв'язку, XR-контенту) завдяки застосуванню терагерцового спектра;
- забезпечення ультранизької затримки (до субмілісекунд), що є критичним для сценаріїв автономного транспорту, роботизованої хірургії та промислової автоматизації;
- інтеграція засобів штучного інтелекту в управління мережею, що забезпечує самоорганізованість, адаптивність, оптимізацію ресурсів і енергоспоживання;
- гарантування безпеки та конфіденційності, зокрема впровадження квантостійких алгоритмів шифрування, децентралізованих схем автентифікації та захищених протоколів обміну;
- підвищення енергоефективності за рахунок енергоощадних методів передачі, енергооптимізованої архітектури мереж і мінімізації енергоспоживання кінцевих пристроїв;
- забезпечення глобального покриття завдяки інтеграції неназемних сегментів — супутникових, стратосферних і дронівих платформ;
- платформа для інноваційних технологій — інтерфейси мозок-комп'ютер, цифрові двійники, голографічні комунікації, метавсесвіти [6].

Таким чином, 6G не є лінійним продовженням 5G, а формує нову модель обміну інформацією, що поєднує надшвидкість, адаптивність, інтелектуальність і повсюдну доступність. Проведене дослідження підтвердило такі ключові переваги 6G:

- надвисока швидкість і мінімальна затримка забезпечують розвиток сервісів реального часу;
- використання терагерцового спектра та інтелектуального управління мережею оптимізує спектральну ефективність і підтримує масову підключеність;
- інтеграція III, яка підвищує стійкість до відмов і загроз, оптимізує енергоспоживання;
- сучасні технології захисту, включно з квантово-стійким шифруванням, гарантують

інформаційну безпеку;

- стратегія спрямована на створення глобальної, безпечної та інтелектуальної інфраструктури зв'язку.

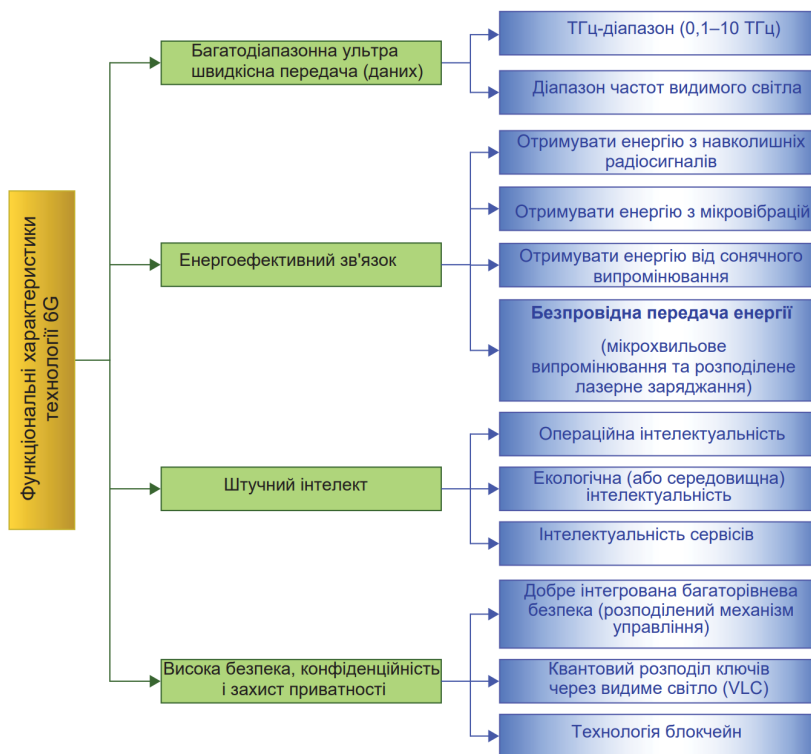


Рис. 1. Ключові характеристики технології 6G

Попри значний потенціал, розвиток 6G супроводжується низкою критичних викликів:

- технічні складнощі використання терагерцового діапазону через високі втрати сигналу та міжканальні завади;

- потреба в нових підходах до стандартизації, інтеграції та глобальної уніфікації мереж;

- відсутність узгодженого механізму розподілу частотного ресурсу на надвисоких частотах;

- підвищення рівня кіберзагроз і потреба в адаптивних засобах інформаційної безпеки;

- проблеми конфіденційності в умовах обробки великих обсягів персональних даних;

- необхідність подальших досліджень щодо впливу високочастотного випромінювання.

Аналіз розвитку 6G дозволяє визначити такі пріоритетні напрями наукових досліджень (рис.

2):

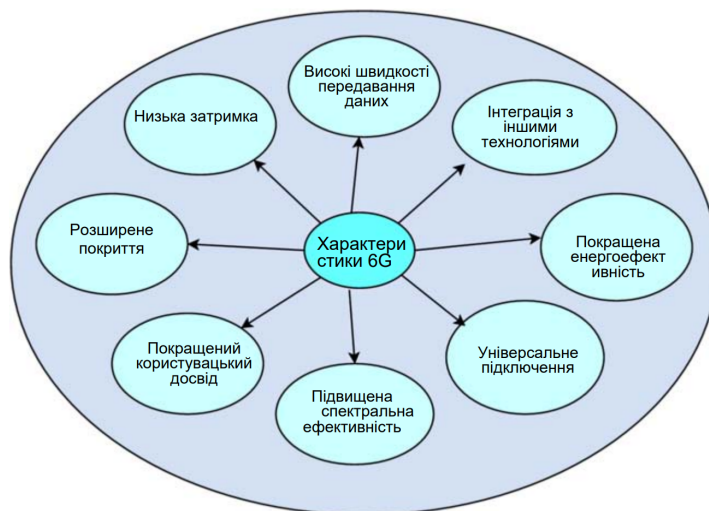


Рис. 2. Основні функціональні характеристики мереж 6G

- розробка ефективних схем модуляції, антен і засобів обробки сигналів;
- створення компонентів на базі метаматеріалів;
- використання ШІ для оркестрації мереж, управління ресурсами;
- збереження конфіденційності та безпеки даних — впровадження гомоморфного та квантового стійкого шифрування;
- розподілена обробка даних та edge-computing — зниження затримок і підвищення автономності пристроїв;
- бездротовий сенсорний моніторинг;
- енергоефективність — оптимізація енергоспоживання та тепловідведення;
- інтеграція блокчейн-рішень — забезпечення прозорості та контролю доступу;
- людино-машинна взаємодія — нові інтерфейси, включно з BCI.

Системний підхід до розв'язання окреслених завдань дозволить сформувати надійну, адаптивну, енергоефективну й безпечну цифрову екосистему шостого покоління (рис. 3) [3]. У процесі дослідження проаналізовано перспективні напрями розвитку технологій шостого покоління бездротового зв'язку, серед яких ключовими є застосування терагерцових комунікацій, масивних багатокористувацьких антенних систем, квантових технологій, штучного інтелекту та методів ефективного управління спектром.



Рис. 3. Функціонал мережі 6G з підтримкою штучного інтелекту

Терагерцові (THz) комунікації визначаються як базова технологія забезпечення надвисокої пропускної здатності в 6G-мережах завдяки доступу до частотного діапазону 0,1–10 ТГц. Проте їх широке впровадження обмежується високими втратами сигналу, атмосферним поглинанням та зменшенням радіусу дії. Це вимагає розробки вдосконалених методів формування променя, антенних систем і алгоритмів обробки сигналів. Перспективним є застосування компонентів на основі нанoelementів (графен, вуглецеві нанотрубки), що сприятиме створенню компактних і енергоефективних телекомунікаційних рішень. THz-технології також відкривають нові можливості для сенсорних систем, технологій зображення, безпеки й медицини [4].

Massive MIMO та адаптивне формування променя є стратегічними для підвищення ефективності використання спектра, пропускної здатності та якості покриття. Використання великої кількості антен з адаптивним керуванням забезпечує просторове мультиплексування даних, знижує затримки й оптимізує енергоспоживання. Поєднання Massive MIMO з технологіями beamforming

підтримує URLLC, eMBB і mMTC-сервіси. Водночас такі рішення вимагають вирішення питань конструктивної складності, енергоспоживання та обробки сигналів [5].

Квантова комунікація визначається як основа побудови захищених бездротових мереж 6G. Технології квантового розподілу ключів (QKD) гарантують стійкість до несанкціонованого доступу та кіберзагроз. Крім того, використання квантових ретрансляторів сприятиме розвитку глобальних квантових мереж. Поряд із цим впровадження квантових технологій потребує подолання технічних викликів: створення спеціалізованих компонентів, захисту від шумів і розробки стандартів квантових комунікацій [6].

Інтеграція штучного інтелекту в інфраструктуру 6G спрямована на забезпечення адаптивного управління мережею, автоматизованого розподілу ресурсів, управління спектром, прогнозування відмов і оптимізації роботи систем beamforming. ШІ сприятиме контекстно-залежному керуванню, персоналізації сервісів і розвитку нових застосувань (AR/VR, тактильний інтернет), підвищуючи ефективність і надійність мереж [7].

Керування спектральними ресурсами в 6G-мережах ґрунтується на впровадженні когнітивного радіо, динамічного управління спектром (DSA), агрегації смуг пропускання, network slicing і механізмах спільного використання спектру. Це дозволяє ефективно використовувати спектр, мінімізувати перешкоди, забезпечувати міжтехнологічну взаємодію та відповідати нормативним вимогам [8].

Надщільні мережі (UDN) і малі стільники (small cells) є критично важливими для підвищення щільності підключень, пропускної здатності та якості обслуговування. Масове впровадження малих стільникових вузлів у поєднанні з технологіями CoMP і гетерогенними архітектурами (HetNet) забезпечить балансування навантаження, розширення покриття та ефективну підтримку IoT і промислових застосувань [9].

Ключові виклики впровадження 6G охоплюють [10]: регуляторне врегулювання спектру (особливо THz); завершення досліджень і тестувань базових технологій (THz, Massive MIMO, когнітивні мережі, квантова комунікація); розробку міжнародних стандартів інтероперабельності, безпеки та якості послуг; забезпечення стійкості до кіберзагроз і захисту персональних даних; оптимізацію енергоспоживання та зниження екологічного впливу; забезпечення рівного доступу до цифрових сервісів; врахування етичних аспектів під час впровадження автономних систем і ШІ.

Комплексний аналіз підтвердив, що подолання зазначених викликів і стратегічний розвиток зазначених технологічних напрямів створюють наукове підґрунтя для формування архітектури 6G, здатної забезпечити інноваційні сервіси, підвищену продуктивність і новий рівень якості бездротового зв'язку. У ході дослідження визначено низку стратегічних напрямів, що формують основу інноваційного розвитку архітектури 6G і забезпечують її технологічну стійкість, продуктивність та адаптивність до нових викликів (рис. 4).



Рис. 4. Бездротова комунікаційна мережа шостого покоління

Розвиток квантово-безпечних комунікаційних технологій спрямований на забезпечення високого рівня конфіденційності даних та захисту від сучасних кіберзагроз. Основними науковими завданнями є вдосконалення систем квантового розподілу ключів (QKD), розробка квантових ретрансляторів і створення криптографічних рішень, стійких до атак із застосуванням квантових обчислень. Успішна інтеграція таких протоколів у архітектуру 6G створить умови для побудови захищених глобальних комунікаційних систем. Використання технологій штучного інтелекту (AI) для оптимізації мережевих ресурсів, керування трафіком і прийняття рішень у реальному часі визначається як ключовий напрям. Розробка інтелектуальних систем керування спектром, механізмів адаптивного формування променів, контекстно-залежного управління та прогнозовної аналітики сприятиме підвищенню ефективності функціонування мережі, її адаптивності до умов середовища та зростаючих вимог користувачів [11, 12].

Впровадження голографічного підходу до зв'язку відкриває можливості покращення спектральної ефективності, просторового мультиплексування та управління напрямком випромінювання. Перспективними є дослідження голографічних антен, керованих оптичних елементів і метаповерхонь, здатних підтримувати нові сервіси з високими вимогами до пропускну здатності та якості обслуговування. Розробка систем збирання енергії з навколишнього середовища, технологій бездротової передачі живлення й енергоощадних комунікаційних протоколів спрямована на зниження енергоспоживання і забезпечення автономної роботи пристроїв. Це особливо актуально для IoT-застосувань, сенсорних мереж і віддалених об'єктів із обмеженим доступом до енергоресурсів [13, 14].

Інтеграція edge-computing та розподілених обчислювальних систем забезпечує зменшення затримок, підвищену надійність і масштабованість обслуговування в 6G-мережах. Основними напрямками є створення платформ для підтримки критичних застосувань, зокрема у сферах доповненої реальності, автономних систем, промислової автоматизації й медичних технологій. Зазначені напрями досліджень формують комплексне технологічне підґрунтя для розвитку 6G, відкриваючи нові можливості для впровадження інноваційних сервісів, створення ефективних бізнес-моделей і забезпечення глибокої інтеграції бездротових технологій у всі сфери економіки та суспільного життя.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження концептуальних основ і технологічних напрямів розвитку систем шостого покоління (6G) дозволяє зробити такі висновки. Технології 6G мають потенціал радикально трансформувати цифрове середовище завдяки поєднанню надвисоких швидкостей передавання даних, ультранизьких затримок і масового підключення пристроїв. Їх упровадження сприятиме розвитку нових сервісів, бізнес-моделей та інфраструктурних рішень. Разом із тим розгортання мереж 6G супроводжується низкою стратегічно важливих викликів, серед яких особливого значення набувають: створення умов для рівного доступу до інноваційних технологій у різних регіонах та серед різних соціальних груп; розробка засобів захисту в умовах зростаючих обсягів даних і складності кіберзагроз; впровадження енергоефективних технологій і стратегій сталого розвитку для мінімізації негативного впливу на довкілля; забезпечення прозорості, відповідальності та справедливості при розробці й застосуванні інтелектуальних систем і автоматизованих рішень. Формування відкритої, інклюзивної та стійкої цифрової екосистеми на базі 6G вимагає координованої взаємодії всіх учасників технологічного ландшафту — науковців, індустрії, регуляторних органів і громадськості. Такий підхід створить умови для гармонійного поєднання технологічного прогресу з вимогами суспільства.

Перспективи подальших досліджень орієнтовані на міждисциплінарне опрацювання таких ключових напрямів: розробка адаптивних алгоритмів керування спектром і трафіком, здатних забезпечити ефективне використання ресурсів і стабільність мережевих з'єднань; створення енергоефективних архітектур бездротових мереж, спрямованих на зниження енергоспоживання та зменшення вуглецевого сліду; впровадження квантово-стійких засобів захисту, включно з протоколами криптографії, стійкими до квантових атак; формування етичних механізмів використання штучного інтелекту для забезпечення прозорості, відповідальності та недискримінаційності алгоритмічних рішень; розробка моделей цифрової інклюзії та механізмів інституційного регулювання, які сприятимуть справедливому доступу до технологій і формуванню глобального інформаційного простору.

Підсумовуючи, впровадження 6G передбачає не лише технічні інновації, але й поглиблене опрацювання соціальних, етичних та екологічних аспектів. Лише інтеграція науково-технічного

прогресу з принципами відповідального інноваційного розвитку дозволить створити сталу основу для цифрової трансформації майбутнього суспільства.

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. 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. Васильківський М., Коломієць А., Будах 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. Васильківський М., Коломієць А., Будах М., Прикмета А., Олійник А. Забезпечення якості обслуговування інтернету медичних речей в мережі стандарту 5G. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2024. Вип. № 56. С. 345-355.
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. Будах // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2022. – № 6. – С. 53–60.
9. 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.
10. Оптимізація адаптивних радіосистем із використанням алгоритмів ШІ та МН [Текст] / М. Васильківський, Д. Нікітович, Н. Грабчак, і Н. Якубіська // 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. Будах // 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. Будах, 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. Vasylykivskyi M., Kolomiets A., Budash M., Prykmeta A., Oliynyk A. Tekhnologichni aspekty vprovadzhennia proqramno-kеровanykh merezh 5G ta 6G. Komp'uterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. 2024. Vyp. № 56. S. 335–344 [in Ukrainian].
4. Vasylykivskyi M., Kolomiets A., Budash M., Prykmeta A., Oliynyk A. Zabezpechennia yakosti obsluhovuvannia internetu medychnykh rechei v merezhi standartu 5G. Komp'uterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. 2024. Vyp. № 56. S. 345–355 [in Ukrainian].
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. Vasylykivskyi M. V. Doslidzhennia arkhitektury shtuchnoho intelektu dlia infokomunikatsiinykh merezh 6G [Text] / M. Vasylykivskyi, H. Vargatiuk, O. Boldyreva // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh. – 2022. – № 4. – S. 62–70 [in Ukrainian].
8. Otsiniuvannia parametriv radiotraktiv infokomunikatsiinykh system 5G/6G [Text] / M. V. Vasylykivskyi, A. Kolomiets, M. Budash // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky». – 2022. – №

6. – S. 53–60 [in Ukrainian].
9. 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].
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 konstruktsii dlia pidvyshchennia efektyvnosti infokomunikatsiinykh radiosystem mobilnoho zviazku 5G ta 6G \[Text] / M. V. Vasylykivskiy, O. S. Boldyreva, H. Vargatiuk, M. V. Budash // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya «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'iuterna inzheneriia. – 2023. – № 1. – S. 92–101 [in Ukrainian].