

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-38>

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

СЦЕНАРІЙ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 6G-IOT В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Васильківський М. В., Грабчак Н. В., Бриль Д. Р., Олійник А. О. Сценарії застосування технологій 6G-IoT в інфокомунікаційних мережах нового покоління. У статті досліджено архітектурні, функціональні та технологічні аспекти формування інтелектуального міського середовища на основі Інтернету речей (IoT) і технологій шостого покоління мобільного зв'язку (6G). Представлено концептуальну модель смарт-міста з урахуванням особливостей масштабованої IoT-інфраструктури, децентралізованої обробки даних та застосування штучного інтелекту (AI) для оптимізації міських процесів. Проаналізовано ключові вектори впровадження IoT у розумних містах: моніторинг навколишнього середовища, енергоменеджмент, транспортна логістика, керування відходами, забезпечення безпеки та комунікація з громадськістю. Розкрито потенціал технологій 6G як основи надшвидкої, масштабованої, інтелектуалізованої комунікаційної платформи, що підтримує реалізацію концепцій доповненої/віртуальної реальності (AR/VR), голографічного зв'язку, автономного транспорту, телемедицини та дистанційної освіти. Окрема увага приділена впливу мереж 6G на розвиток медичних сервісів нового покоління: віддалені консультації, хірургія в реальному часі, безперервний моніторинг пацієнтів за допомогою IoMT, використання AI у діагностиці й плануванні лікування, захист конфіденційних медичних даних. Описано перспективи інтеграції автономного транспорту з інфраструктурою мереж 6G для підвищення безпеки, ефективності мобільності та екологічної стійкості в умовах урбанізації. Акцентовано увагу на синергії AI, edge/fog-комп'ютингу, квантової криптографії, блокчейну та віртуалізованих мереж у межах міського керування та цифрового контролю. Визначено виклики впровадження: технічні обмеження високочастотного зв'язку, забезпечення кіберзахисту, нормативно-правова адаптація, цифрова нерівність, складність міжмережевої інтеграції та необхідність стандартизації. На основі отриманих результатів запропоновано стратегічні підходи до формування стійкої, адаптивної, високотехнологічної та інноваційно орієнтованої урбаністичної інфраструктури майбутнього, здатної підтримувати інтелектуальні сервіси й сталий розвиток.

Ключові слова: розумне місто, Інтернет речей, мережа 6G, телемедицина, автономний транспорт, штучний інтелект, AR/VR, інфраструктура, кібербезпека, цифрова трансформація.

Vasylykivskiy M., Hrabchak N., Bryl D., Oliinyk A. 6G-IoT technology application scenarios in next-generation infocommunication networks. The article investigates the architectural, functional, and technological aspects of shaping an intelligent urban environment based on the Internet of Things (IoT) and sixth-generation (6G) mobile communication technologies. A conceptual model of a smart city is presented, taking into account the features of scalable IoT infrastructure, decentralized data processing, and the application of artificial intelligence (AI) to optimize urban processes. Key vectors of IoT implementation in smart cities are analyzed, including environmental monitoring, energy management, transportation logistics, waste management, public safety, and citizen communication. The potential of 6G technologies is revealed as the foundation of an ultra-fast, scalable, and intelligent communication platform supporting the implementation of augmented/virtual reality (AR/VR), holographic communication, autonomous transport, telemedicine, and remote education. Special attention is paid to the impact of 6G networks on the development of next-generation medical services, including remote consultations, real-time surgery, continuous patient monitoring via the Internet of Medical Things (IoMT), the use of AI in diagnostics and treatment planning, and the protection of sensitive medical data. The prospects of integrating autonomous transport with 6G network infrastructure are described, aimed at enhancing safety, mobility efficiency, and environmental sustainability amid urbanization. The paper highlights the synergy of AI, edge/fog computing, quantum cryptography, blockchain, and virtualized networks in urban governance and digital control. The challenges of implementation are identified, including the technical limitations of high-frequency communications, ensuring cybersecurity, regulatory adaptation, digital inequality, complexity of inter-network integration, and the need for standardization. Based on the results obtained, strategic approaches are proposed for developing a sustainable, adaptive, high-tech, and innovation-oriented urban infrastructure capable of supporting intelligent services and sustainable development.

Keywords: smart city, Internet of Things (IoT), 6G network, telemedicine, autonomous transport, artificial intelligence (AI), augmented reality (AR) / virtual reality (VR), infrastructure, cybersecurity, digital transformation.

Постановка наукової проблеми. Шосте покоління бездротових мереж (6G) є наступним етапом еволюції телекомунікаційних технологій після 5G. Попри те, що наразі 6G перебуває на стадії концептуалізації та початкових наукових досліджень, його метою є радикальне вдосконалення можливостей бездротового зв'язку шляхом досягнення ще вищих швидкостей передачі даних, зменшення затримок та підвищення надійності з'єднань порівняно з попередніми поколіннями [1, 2]. У цьому контексті передбачено розглянути низку перспективних напрямів застосування технологій 6G. Технологія 6G забезпечуватиме безперервну та високоякісну роботу VR- і AR-сервісів, що дозволить реалізувати повне занурення у віртуальні ігрові середовища,

достовірні тренажери, віддалену колаборацію та вдосконалене дистанційне навчання [2].

Очікується, що 6G надасть змогу здійснювати голографічний зв'язок у реальному часі, що сприятиме появі інтерактивних тривимірних зображень співрозмовників, трансформуючи телеприсутність, відеоконференції та сферу розваг. Завдяки підвищеній ємності та ефективності, 6G здатен підтримувати мільярди пристроїв IoT, що сприятиме розвитку «розумних» міст, інтелектуальних транспортних систем та автоматизованого виробництва [3].

Технологія 6G сприятиме створенню цифрових двійників – віртуальних копій фізичних об'єктів і процесів – з метою їхнього моніторингу, аналізу та оптимізації в режимі реального часу, зокрема у сферах інфраструктури, промисловості та логістики [4, 5]. Мережі 6G підтримуватимуть розширені методи біометричної автентифікації та безперервний моніторинг фізіологічних параметрів, що відкриває перспективи персоналізованої медицини, ранньої діагностики та дистанційного нагляду за пацієнтами. Завдяки наднизькій затримці й високій надійності 6G створює умови для керування автономними системами й роботами в реальному часі в таких галузях, як виробництво, логістика, охорона здоров'я та сільське господарство.

Технології 6G сприятимуть покращенню збору та аналізу екологічних даних, зокрема для точного прогнозування погоди, реагування на надзвичайні ситуації та контролю змін клімату. У перспективі 6G може включати квантові технології зв'язку, що забезпечать надвисокий рівень захисту інформації під час передавання й шифрування даних у гіперз'єднаному цифровому середовищі.

Мережі 6G потенційно підтримуватимуть високошвидкісний і надійний зв'язок для місій у космосі, супутникових угруповань і послуг на основі космічних платформ, сприяючи розвитку досліджень, навігації та глобального зв'язку. Технологія 6G може відігравати ключову роль в оптимізації інфраструктури керування енергією та ресурсами, зокрема у формуванні інтелектуальних енергомереж, ефективному розподілі електроенергії та сталому використанні природних ресурсів. Зазначені приклади відображають лише частину потенційних сфер використання шостого покоління мобільного зв'язку. У міру подальшого розвитку наукових досліджень і технологій, можна очікувати появу нових інноваційних сценаріїв застосування, які здатні трансформувати ключові галузі економіки та підвищити якість повсякденного життя [6].

Метою дослідження є аналіз архітектурних рішень, переваг та викликів масштабного впровадження 6G-IoT-інфраструктури, які спрямовані на формування науково обґрунтованих засад для проєктування інтелектуальних міських систем нового покоління із застосуванням гібридних технологій штучного інтелекту, віртуальної/доповненої реальності, телемедицини та автономного транспорту в середовищі надшвидкісного бездротового зв'язку.

Основні цілі дослідження:

- систематизувати ключові архітектурні підходи до побудови розумних міст на основі технологій Інтернету речей (IoT), з урахуванням інтеграції сенсорних мереж, виконавчих пристроїв, платформ обробки даних та інтелектуальних алгоритмів;
- оцінити функціональні можливості IoT-рішень у контексті урбаністичної трансформації, зокрема щодо енергоефективності, транспортної мобільності, екологічного моніторингу, безпеки та участі громадян у керуванні містом;
- проаналізувати потенціал мереж шостого покоління (6G) для розвитку інтелектуальної міської інфраструктури, визначивши переваги щодо швидкості передачі даних, мінімізації затримок, масштабованості та підтримки масового IoT;
- дослідити синергію між технологіями 6G, штучним інтелектом (AI), edge/fog-computing, VR/AR та телемедициною в контексті формування інтелектуального середовища, орієнтованого на підвищення якості життя та сталий розвиток;
- розробити структурну модель інтеграції 6G-рішень у сферу охорони здоров'я, транспорту, екології та безпеки, визначивши приклади реалізації цифрових сервісів, чутливих до затримок і потреб у високій пропускну здатності;
- ідентифікувати основні технологічні, нормативно-правові та соціальні виклики, що супроводжують впровадження IoT і 6G у розумні міста, а також запропонувати підходи до їх подолання з урахуванням міжгалузевої кооперації;
- обґрунтувати перспективи створення нової урбаністичної парадигми, що базується на адаптивності, автоматизації, цифровій інклюзії та безпечному обміні даними в умовах масштабного впровадження 6G-технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій демонструє широку варіативність підходів до проектування та впровадження технологій шостого покоління (6G), що охоплюють як фундаментальні аспекти, так і галузеві застосування. У роботі [7] акцент зроблено на реалізації безпечного, гнучкого та високонапрявленого бездротового зв'язку, що переходить зі стадії теоретичних розробок до практичного впровадження. Основними перевагами 6G визначено можливості дистанційного зондування, формування високоточних зображень і бездротової передачі енергії. Підкреслено важливість прецизійного керування зоною покриття і спрямованістю терагерцового променя.

У дослідженні [8] висвітлено трансформаційний вплив 6G на сферу охорони здоров'я. Запропоновано багаторівневу архітектуру зв'язку, оптимізовану для медичних застосувань, включаючи роботизовані хірургічні втручання та безперервний моніторинг пацієнтів. Особливу увагу приділено синергії між 6G та технологіями штучного інтелекту, що формують основу концепції «розумної медицини».

У роботі [9] проаналізовано потенціал 6G у прикладних галузях: аграрному секторі, освіті, мультимедіа, транспорті, логістиці та туризмі. Наголошено на можливостях трансформації бізнес-моделей, забезпеченні економічної стабільності та досягненні цілей сталого розвитку. Виділено роль штучного інтелекту та програмованих інтелектуальних поверхонь (RIS), а також перспективи квантового зв'язку як чинника підвищення безпеки й ефективності обробки даних.

У [10] представлено підхід до підвищення надійності сервісів типу URLLC шляхом мультишляхового розподілу, рандомізації ідентифікаторів користувачів і використання малорозрядних DAC та PS. Запропоновано методологію ID-RZ як енергоефективну альтернативу традиційним схемам повторного призначення ідентифікаторів.

У роботі [11] досліджено прикладні можливості 6G у таких сферах, як IoT, транспорт, супутникові комунікації, UAV і медицина. Окреслено базові технології, які забезпечують реалізацію нових типів IoT-мереж, підвищення енергоефективності та організацію спектрально-ефективного спільного доступу в умовах масових підключень.

У дослідженні [12] розглянуто інтеграцію концепції Інтернету всього (IoE) із системами 6G, із застосуванням федеративного навчання та технології OAM-MIMO. Визначено стратегічні напрями розвитку, серед яких – проектування архітектур зв'язку нового типу, орієнтованих на гнучку адаптацію до зростаючих вимог майбутніх сервісів.

У роботі [13] обґрунтовано застосування когнітивної інфраструктури (CI) для розгортання небазових вузлів (NIB) у стільникових мережах 6G. Показано, що CI забезпечує ефективне керування змінними даними в реальному часі, враховуючи конфіденційність і низькі накладні витрати. Описано впровадження блокчейн-рішень з удосконаленою структурою блоку для підвищення безпеки агрегації та обробки даних у промислових умовах.

Таким чином, сучасні дослідження демонструють мультидисциплінарний характер розвитку 6G, охоплюючи як базові технічні аспекти (спектральна ефективність, гнучкі архітектури, когнітивне керування), так і практичні сценарії використання в охороні здоров'я, промисловості, агросекторі, логістиці та безпілотних технологіях. Особливу увагу приділено інтеграції з AI, IoE, RIS, OAM-MIMO, квантовими технологіями й блокчейном, що визначає напрям подальших наукових досліджень і технологічного розвитку [14].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Упродовж останніх років концепції розумних міст (smart cities) та інтелектуального середовища (smart environment) набули широкого визнання внаслідок швидкого розвитку технологій Інтернету речей (IoT). Їхнє впровадження спрямоване на підвищення ефективності міської інфраструктури, забезпечення сталості урбаністичних систем та покращення якості життя населення [15, 16]. З огляду на це, у даному розділі проаналізовано ключові компоненти IoT-орієнтованих рішень для розумних міст, їхні функціональні переваги, а також виклики, пов'язані з масштабним впровадженням відповідної інфраструктури.

Технологія IoT забезпечує інтеграцію великої кількості сенсорів і виконавчих пристроїв у різних сегментах міського простору (транспорт, енергетика, навколишнє середовище, громадська безпека тощо). Ці пристрої здійснюють безперервний збір даних у реальному часі, що дозволяє забезпечити високоточну аналітику стану об'єктів і процесів. В результаті досягається оптимізація розподілу ресурсів, підвищення якості муніципальних послуг та мінімізація екологічного впливу. На рисунку 1 представлено приклад архітектури смарт-міста з використанням мобільних технологій шостого покоління (6G), які забезпечують ультрашвидку передачу даних, мінімальну затримку та

гнучку масштабованість мережевої інфраструктури.



Рис. 1. Архітектура смарт-міста з інтеграцією технологій 6G

Ключові напрями реалізації IoT у межах розумних міст включають такі аспекти:

- розумні міста формують нову парадигму планування, де цифровізація та автоматизація є основою керування інфраструктурою. IoT перетворює традиційне місто на динамічну кіберфізичну систему з адаптивною реакцією на змінні умови;
- установлення широкого спектра датчиків дозволяє здійснювати моніторинг критичних параметрів: якості повітря, вологості, рівня шуму, температури, освітлення, трафіку, заповнення контейнерів для сміття;
- зібрані дані обробляються на периферійних (edge/fog) або хмарних платформах із застосуванням методів машинного навчання, штучного інтелекту та предиктивної аналітики. Це дозволяє виявляти аномалії, прогнозувати тенденції та приймати проактивні рішення;
- інтелектуальні системи керування забезпечують оптимізацію енергоспоживання, регулювання водопостачання, керування трафіком і логістикою. Наприклад, смарт-мережі (smart grids) забезпечують автоматичне балансування навантаження в енергосистемах.
- рішення на базі IoT дозволяють динамічно керувати світлофорами, створювати адаптивні транспортні маршрути, забезпечувати віддалене технічне обслуговування та зворотний зв'язок із громадянами;
- постійний контроль за екологічними показниками сприяє оперативному виявленню загроз і формуванню ефективних стратегій зниження негативного впливу на довкілля;
- інтеграція відеоаналітики, розумного освітлення та сенсорних мереж підвищує рівень безпеки завдяки швидкому реагуванню на інциденти та передбаченню ризиків;
- платформи електронної взаємодії сприяють залученню мешканців до керування містом: від подання звернень до участі у громадських ініціативах і процесах прийняття рішень;
- архітектура IoT у смарт-містах характеризується модульністю та можливістю інтеграції нових технологій, що забезпечує адаптацію до технологічного прогресу та урбаністичних змін.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що IoT-орієнтовані розумні міста формують якісно нову модель урбаністичного розвитку, в якій підключені пристрої, інтелектуальні алгоритми та високошвидкісний зв'язок виступають основою для прийняття рішень у реальному часі. Це забезпечує сталу трансформацію міських середовищ у більш ефективні, безпечні та комфортні для мешканців структури. Завдяки використанню технологій 6G, які забезпечують наднизькі затримки, високу щільність підключень і підтримку масового IoT, відкриваються нові можливості для вдосконалення смарт-інфраструктури. На рисунку 2 наведено детальну архітектуру розумного міста з інтеграцією 6G-рішень, яка ілюструє еволюцію підходів до цифрового керування міськими системами [1, 2].

Інтеграція мереж шостого покоління (6G) у міську інфраструктуру сприяє суттєвій трансформації концепції розумного міста, розширюючи функціональні можливості інтелектуального середовища за рахунок надшвидкої передачі даних, масштабної підтримки IoT-пристроїв, інтелектуальної автоматизації та захищеної комунікації. Основні напрями такого впливу [3] наведено нижче. Технологія 6G забезпечує надвисокі швидкості передачі даних і мінімальні

затримки, що є критичними для функціонування систем автономного транспорту, інтелектуального керування трафіком, інфраструктури реагування на надзвичайні ситуації та інших сервісів, чутливих до затримок.



Рис. 2. Архітектура розумних міст із застосуванням технологій 6G

Завдяки розширеній пропускній здатності та високій ефективності 6G-мереж, забезпечується підтримка великої кількості розподілених сенсорів і виконавчих пристроїв, які здійснюють моніторинг міського середовища: якості повітря, транспортних потоків, споживання енергії, безпеки тощо. Це створює основу для формування data-driven рішень і динамічного керування ресурсами міста. Конективність 6G дозволяє впроваджувати доповнену та віртуальну реальність у повсякденне міське життя — від навігації з використанням смарт-окулярів до віртуальних симуляцій для планування інфраструктурних проєктів, створюючи умови для інтерактивної взаємодії користувачів з цифровим середовищем міста. Завдяки високій пропускній здатності та мізерним затримкам у мережах 6G, можливим стає використання голографічних технологій для реалістичної віддаленої взаємодії між людьми. Це відкриває перспективи нових форматів комунікації, зокрема для службової співпраці, освітніх заходів і віртуальних зустрічей.

Синергія AI та 6G сприяє автоматизації керування трафіком, енергоспоживанням, муніципальними послугами та екологічним моніторингом. Алгоритми штучного інтелекту обробляють великі масиви даних у реальному часі для підвищення ефективності прийняття рішень, зокрема шляхом адаптивного регулювання світлофорів або оптимізації роботи інженерних систем будівель. Інтеграція технологій квантового шифрування в інфраструктуру 6G підвищує рівень кіберзахисту критично важливих систем міста. Це гарантує безпечну передачу чутливої інформації, знижує ризики кібератак і забезпечує довіру до цифрової екосистеми розумного міста. Отже, використання потенціалу 6G створює передумови для глибокої трансформації урбаністичного простору, забезпечуючи високопродуктивну, безпечну та адаптивну інфраструктуру для життя, мобільності та цифрової взаємодії мешканців розумних міст.

Швидке зростання цифрової конективності, зокрема завдяки 6G, значно впливає на еволюцію медичних сервісів, зумовлюючи переорієнтацію системи охорони здоров'я на пацієнтоцентричну, дистанційну модель обслуговування. Основні аспекти [4] такої трансформації охоплюють:

1. Технології телемедицини забезпечують віддалене консультування пацієнтів із лікарями, усуваючи географічні бар'єри до медичної допомоги. Відеозв'язок, голосові дзвінки та захищені цифрові канали дозволяють надавати рекомендації, первинну діагностику та супровід пацієнтів без необхідності фізичної присутності.

2. Спеціалізовані платформи моделюють класичний прийом у лікаря, даючи змогу обговорити симптоми, отримати електронний рецепт або пройти базові обстеження в дистанційному форматі.

3. Телемедицина забезпечує зручний доступ до високоспеціалізованих медичних послуг незалежно від розташування пацієнта та лікаря, що особливо важливо для регіонів із недостатньою медичною інфраструктурою.

4. Телемедичні рішення сприяють тривалому дистанційному моніторингу пацієнтів із хронічними патологіями, забезпечуючи регулярну комунікацію, навчання та підтримку, що підвищує ефективність лікування й самоконтролю.

5. Завдяки з'єднанню телемедицинських систем із сенсорами та носимою електронікою (смарт-годинниками, фітнес-трекерами), забезпечується безперервний збір клінічних даних, які можуть використовуватись для оперативного медичного реагування.

6. Системи тріажу на базі телемедицини дозволяють класифікувати пацієнтів за тяжкістю стану до прибуття до медичного закладу, покращуючи логістику та якість невідкладної допомоги.

7. Дистанційні консультації з психотерапевтами та психіатрами відкривають доступ до лікування психічних розладів, мінімізуючи соціальні бар'єри та психологічну стигматизацію.

8. Телемедичні платформи функціонують як цифрове середовище для безперервного професійного розвитку, надаючи доступ до онлайн-курсів, сертифікацій, конференцій і клінічних симуляцій (рис. 3).

Узагальнюючи, телемедицина в умовах впровадження 6G створює нову парадигму надання медичних послуг — мобільну, персоналізовану, ефективну та захищену. Її роль полягає не лише в розширенні доступу до медицини, а й у формуванні високотехнологічної, адаптивної системи охорони здоров'я, здатної відповідати на виклики сучасності [5].

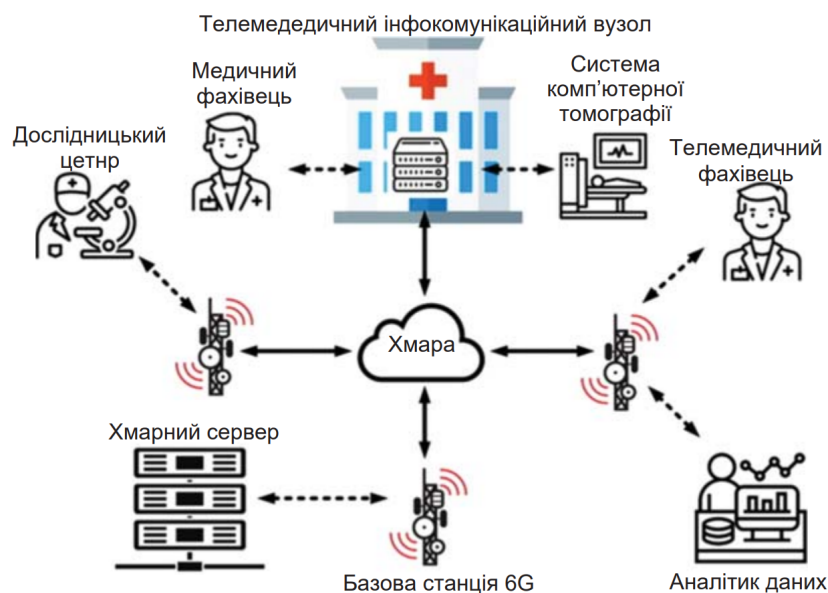


Рис. 3. Схема телемедицинської системи з використанням 6G-зв'язку

З розвитком технологій шостого покоління (6G) система охорони здоров'я зазнає кардинальних змін, спрямованих на цифровізацію, персоналізацію та підвищення якості медичних послуг. Інфраструктура 6G відкриває нові можливості для інноваційного розвитку медицини, зокрема через такі рішення:

- мережі 6G забезпечують передавання UHD-відео з мінімальною затримкою, що дозволяє реалізовувати високоточні відеоконсультації з ефектом повної присутності. Це підвищує якість взаємодії лікар-пацієнт та сприяє оперативній діагностиці;

- завдяки надійності та швидкодії 6G-хмарних платформ можливе дистанційне керування роботизованими хірургічними системами в режимі реального часу. Це забезпечує надання вузькоспеціалізованої допомоги без фізичної присутності хірурга;

- високопродуктивний голографічний зв'язок 6G дає змогу здійснювати тривимірну реконструкцію медичних зображень. Це значно покращує точність діагностування й ефективність планування оперативних втручань;

- розширення IoT у 6G-середовищі дозволяє здійснювати безперервний моніторинг життєвих показників за допомогою носимих пристроїв, що створює умови для проактивної, персоналізованої медицини;

- висока пропускна здатність мереж 6G сприяє обробці великих масивів даних (історії хвороб, зображення, сенсорна інформація) з використанням алгоритмів штучного інтелекту для підтримки

клінічних рішень;

- технологія 6G забезпечує швидку передачу конфіденційної генетичної інформації, що дозволяє реалізовувати концепцію персоналізованої терапії відповідно до індивідуального генетичного профілю пацієнта;

- IoT-пристрої, під'єднані до 6G, дозволяють виявляти критичні зміни стану пацієнтів у реальному часі та забезпечують швидке втручання, зокрема для людей із хронічними захворюваннями або літніх осіб;

- високий рівень безпеки в 6G-системах уможливорює застосування технологій блокчейн для створення децентралізованих медичних реєстрів, що гарантує цілісність, конфіденційність і прозорість обміну інформацією між медичними установами.

Загалом, 6G-технології мають потенціал підвищити ефективність, точність і персоналізованість надання медичних послуг, сприяючи покращенню здоров'я населення в умовах цифрової трансформації охорони здоров'я [6].

Автономні транспортні засоби (АТЗ), що функціонують на основі сенсорних систем, GPS, бортових комп'ютерів і зв'язку нового покоління, є фундаментальним елементом інтелектуальних транспортних систем, орієнтованих на інноваційні сервіси мобільності [7]. У поєднанні з 6G-мережами вони здатні забезпечити:

- завдяки усуненню людського фактора та застосуванню алгоритмів ШІ, АТЗ зменшують ризик аварій, оперативно реагуючи на потенційні загрози завдяки обробці даних із сенсорів у реальному часі;

- технологія 6G забезпечує ефективну V2V- і V2I-комунікацію, що дозволяє автономним транспортним засобам координувати маршрути та швидкість для зниження заторів і підвищення пропускної здатності дорожніх мереж;

- АТЗ надають мобільність соціально вразливим категоріям населення (літні люди, особи з інвалідністю), забезпечуючи рівний доступ до інфраструктурних послуг у міських і віддалених районах;

- інтелектуальне керування маршрутами та розвиток електромобільності в контексті АТЗ сприяють зниженню шкідливих викидів, витрат пального та вуглецевого сліду;

- АТЗ є рушієм сервісів типу "транспорт за запитом", карпулінгу й автономного таксі, що дає змогу зменшити кількість приватних авто та підвищити ефективність міських перевезень;

- в автономній доставці, зокрема на етапі "останньої милі", АТЗ і дрони забезпечують швидке та автоматизоване переміщення вантажів, що є критично важливим для електронної комерції та інфраструктури smart cities;

- безпілотні шатли й мікроавтобуси можуть виконувати роль фідерного транспорту, покращуючи first/last-mile-з'єднання та підвищуючи інклюзивність громадського транспорту;

- масове впровадження АТЗ потребує адаптації дорожньої інфраструктури та міського простору, включаючи інтелектуальні перехрестя, динамічні паркувальні системи та зони посадки/висадки пасажирів;

- для безпечного використання АТЗ необхідна розробка комплексних стандартів, що регулюють питання відповідальності, кібербезпеки, конфіденційності та етики автономного руху.

Завдяки поєднанню автономного транспорту з можливостями 6G, зокрема в контексті URLLC і massive Machine-Type Communications (mMTC), можливе створення стійких, інклюзивних та адаптивних транспортних систем нового покоління.

У контексті трансформаційних змін, що охоплюють сучасні технології зв'язку та інтелектуальні системи, особливу увагу привертають автономні транспортні засоби та застосування VR/AR у середовищі шостого покоління мобільного зв'язку (6G). Обидва напрями демонструють значний потенціал у підвищенні ефективності, безпеки й адаптивності сучасних соціотехнічних систем [8].

Автономні транспортні засоби (АТЗ) розглядаються як ключовий компонент майбутніх інтелектуальних транспортних систем. Їх інтеграція в урбаністичні й міські середовища здатна суттєво підвищити безпеку дорожнього руху, зменшити вплив людського чинника, оптимізувати транспортні потоки та знизити шкідливі викиди. Разом із тим, повномасштабне впровадження АТЗ передбачає вирішення ряду технічних, нормативно-правових і соціальних викликів. Реалізація цього потенціалу можлива лише за умови тісної кооперації між державними регуляторами, технологічними компаніями, дослідницькими установами та громадськістю [9].

Розвиток мереж 6G створює технологічну платформу для радикального вдосконалення

віртуальних та доповнених середовищ. У поєднанні з VR/AR-технологіями відкривається низка нових функціональних можливостей [10]:

- завдяки підтримці наднизької затримки та високої пропускної здатності 6G забезпечує безперервне й реалістичне занурення у віртуальні простори, що критично важливо для точності візуального контенту та швидкості інтеракції;
- технологія 6G стає основою для реалізації в реальному часі тривимірної передачі голограм, що змінює парадигму дистанційної комунікації, роблячи її максимально наближеною до фізичної присутності;
- висока щільність з'єднань дозволяє організовувати великі віртуальні події з одночасною участю тисяч користувачів, зокрема для освітніх, культурних і бізнесових цілей;
- перенесення обчислювального навантаження на мережеву периферію забезпечує зниження затримки та ефективну підтримку складних VR/AR-сценаріїв на мобільних пристроях;
- завдяки контекстуальному аналізу середовища та точній локалізації, користувачі отримують можливість реалістично взаємодіяти з фізичним простором через цифрові інтерфейси;
- імерсивні освітні середовища на базі VR/AR і 6G забезпечують нові формати навчання, включно з тренажерами, симуляціями та реконструкціями, що підвищують ефективність засвоєння матеріалу;
- використання віртуального моделювання хірургічних процедур, телеконсультацій і терапевтичних сценаріїв сприяє підвищенню якості надання медичних послуг;
- у поєднанні з гіпершвидкісним зв'язком та імерсивним контентом VR/AR надає користувачам можливість взаємодії у змішаних середовищах, де цифрові об'єкти інтегруються з фізичним світом (рис. 4).

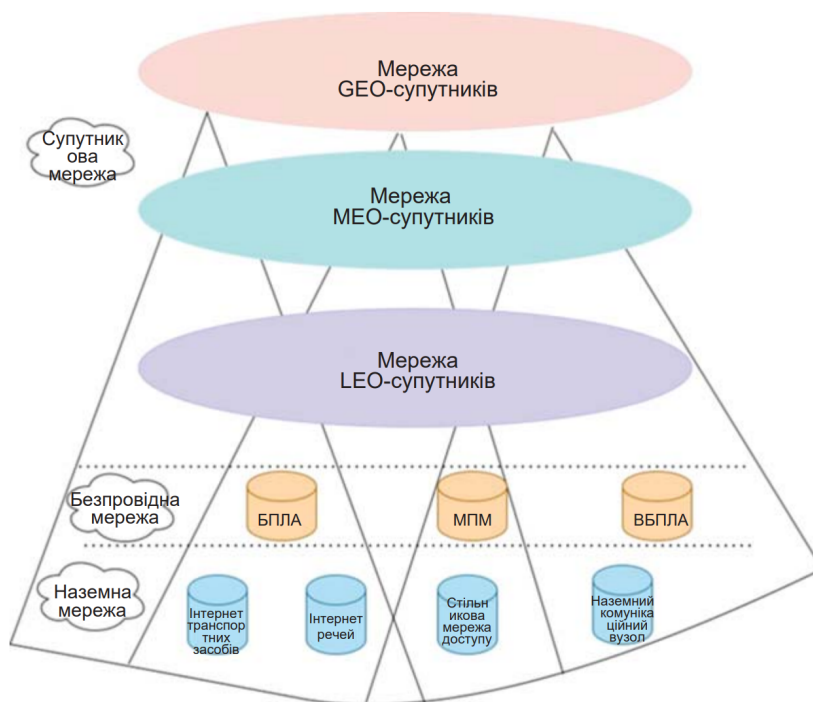


Рис. 4. Архітектура інтелектуальної інтегрованої мережі 6G

Узагальнюючи, синергія технологій VR/AR і можливостей 6G — включно з підтримкою штучного інтелекту, голографічною комунікацією, обчисленнями на периферії й масштабованістю — створює передумови для нової парадигми цифрової взаємодії. Ці інновації, що ілюструються на рисунку 5, мають потенціал радикально змінити як галузеві системи (освіта, охорона здоров'я, транспорт), так і повсякденне життя користувачів, формуючи основу для майбутнього метаінтегрованого цифрового середовища [11].

Розвиток технологій шостого покоління (6G) визначається як ключовий чинник цифрової трансформації провідних галузей економіки та суспільного життя. Очікується, що 6G виступатиме інфраструктурною основою для впровадження інноваційних сценаріїв у середньостроковій перспективі, забезпечуючи надвисокі швидкості передавання даних, наднизькі затримки, високу

надійність і масштабовану інтеграцію IoT, AI, XR та edge-комп'ютингу [12].

Однією з провідних сфер застосування 6G стане індустріальна автоматизація. Передбачається, що мережі 6G забезпечуватимуть надійний та надшвидкий зв'язок між автономними роботизованими системами, сприяючи трансформації виробництва, логістики, аграрного сектора й будівництва. Це дозволить досягти підвищення ефективності, точності й безпеки операцій, керованих ШІ. У сфері розваг і спорту очікується поширення високоякісного контенту на основі доповненої (AR) та віртуальної реальності (VR).



Рис. 5. Інтелектуальні технології на базі 6G-мереж

Технології 6G дадуть змогу реалізувати живі AR-трансляції спортивних подій, VR-концерти, ігри у змішаній реальності, формуючи новий рівень занурення користувачів у віртуальне середовище. Агропромисловий комплекс отримає нові інструменти оптимізації завдяки поєднанню масового підключення IoT-датчиків, використання дронів та AI-аналітики. На основі даних про стан ґрунту, рослин, клімату й техніки здійснюватиметься точне керування агропроцесами — зрошенням, внесенням добрив, збором урожаю. У сфері торгівлі та клієнтського сервісу 6G відкриє можливості для інтерактивного й персоналізованого обслуговування: віртуальні примірки товарів, 3D-візуалізації продуктів, рекомендаційні системи з підтримкою ШІ сприятимуть прийняттю обґрунтованих споживчих рішень [13]. Мережа 6G створить технологічне підґрунтя для екологічного моніторингу, що включає використання супутників, дронів, IoT-мереж для збору даних про стан атмосфери, водних ресурсів, рослинного й тваринного світу. Це забезпечить формування ефективної природоохоронної політики. У сфері енергетики очікується розвиток розумних енергосистем із динамічним керуванням генерацією, розподілом і споживанням енергії. Використання високоточних датчиків, ШІ-алгоритмів і smart-лічильників дозволить балансувати навантаження, підвищуючи гнучкість і енергоефективність. Медична робототехніка та дистанційна хірургія стануть можливими завдяки високій надійності й мінімальній затримці 6G-зв'язку, що дозволить виконувати операції на відстані з використанням тактильного зворотного зв'язку, підвищуючи доступність спеціалізованої медичної допомоги [14]. У сфері космічного зв'язку 6G-технології сприятимуть розвитку високошвидкісної лазерної комунікації між супутниками та космічними апаратами, підтримуючи ефективну передачу даних і точне керування. Для освіти 6G забезпечить умови для впровадження AR/VR-класів, інтерактивних підручників і адаптивних платформ навчання, що сприятиме інклюзивності та доступності освітніх послуг. У контексті розумного міського середовища 6G стане основою цифрового керування інфраструктурою, транспортом і енергоспоживанням, забезпечуючи комфорт, безпеку та сталість урбанізованих територій [15].

Незважаючи на широкий спектр перспективних застосувань, впровадження 6G супроводжується низкою технічних і нетехнічних викликів [16]:

- розроблення нових антенних систем, базових станцій, високочастотних компонентів;

- необхідність міжнародної координації політики використання частот;
- впровадження edge/fog-комп'ютингу та AI-оптимізації для обслуговування зростаючих обсягів даних;
- потреба у наскрізному шифруванні, автентифікації та захисті даних;
- забезпечення сумісності обладнання й протоколів у глобальному масштабі;
- розробка протоколів із низьким енергоспоживанням для IoT та інфраструктури;
- створення правових механізмів у сферах ліцензування, захисту прав споживачів, податкової політики;
- питання цифрової нерівності, захисту приватності, суспільної довіри;
- необхідність оцінки інвестиційних ризиків і моделей монетизації.

Узагальнюючи, повноцінне розгортання технологій шостого покоління потребує стратегічного підходу, системного вирішення технічних, регуляторних і соціальних викликів, а також широкої науково-промислової кооперації. Це відкриває можливості для формування нового етапу цифрової епохи, орієнтованого на сталий розвиток, інновації й суспільне благо.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження засвідчує, що технології шостого покоління (6G) мають потенціал стати ключовим рушієм трансформаційних змін у широкому спектрі галузей – від телекомунікацій і транспорту до охорони здоров'я, промисловості, освіти, містобудування та соціальної взаємодії. Інтеграція надвисоких швидкостей передавання даних, ультранизької затримки, масового підключення пристроїв та підвищеної надійності забезпечує основу для розвитку нових архітектур мереж, систем телеприсутності, XR-платформ, інтелектуальної автоматизації, автономного руху та хмарно-периферійних обчислень.

Проте реалізація повного функціонального потенціалу 6G потребує комплексного подолання низки викликів, серед яких – технологічні обмеження (енергоефективність, безпека, стійкість до завад, інтеграція мультидоменних ресурсів), регуляторні бар'єри (розподіл спектра, забезпечення стандартів інтероперабельності), а також етичні й соціальні аспекти (захист персональних даних, цифрова нерівність, кібербезпека).

Подальші дослідження мають бути зосереджені на міждисциплінарних напрямках, зокрема: розробці адаптивних і когнітивних протоколів доступу; створенні ефективних систем енергоменеджменту; забезпеченні квантово-безпечного зв'язку; моделюванні цифрових двійників і інтелектуального керування мережею; стандартизації архітектури гетерогенних мереж (SAGIN, FMC, AI-native Networks). Досягнення цілей розвитку 6G можливе лише за умов стратегічної співпраці між академічними установами, індустріальними партнерами, державними регуляторами та громадянським суспільством. Просування відкритих дослідницьких ініціатив, формування глобальних інноваційних екосистем і підтримка сталого технологічного впровадження мають стати основою для формування інклюзивного цифрового майбутнього.

Список бібліографічного опису

1. Li, X. and Wang, Y. (2023). Applications and use cases of 6G technology: a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 25 (7): 5158–5182. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3158121>.
2. Sun, Q. and Rappaport, T.S. (2023). Next-generation applications and use cases of 6G technology: challenges and opportunities. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 72 (10): 10687–10703. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3158123>.
3. Tyagi, A.K. and Richa (2023). Digital twin technology: opportunities and challenges for smart era's applications. In: *Proceedings of the 2023 Fifteenth International Conference on Contemporary Computing (IC3-2023)*, 328–336. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3607947.3608015>.
4. Jing-Cheng, Z., Geng-Bo, W., Chen, M.K. et al. (2023). A 6G meta-device for 3D varifocal. *Science Advances* <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf8478>.
5. Wang, Y. and Zhang, Q. (2023). Enabling technologies for emerging applications and use cases of 6G technology: a survey. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* 11 (2): 100–115. <https://doi.org/10.1109/TETC.2023.3158125>.
6. Zhou, Z. and Wu, W. (2023). IoT-based applications and use cases of 6G technology: state-of-the-art and challenges. *IEEE Internet of Things Journal* 10 (11): 8899–8913. <https://doi.org/10.1109/IJOT.2023.3158127>.
7. Li, Z. and Wang, X. (2023). Edge computing-enabled applications and use cases of 6G technology: opportunities and challenges. *IEEE Transactions on Cloud Computing* 11 (1): 126–140. <https://doi.org/10.1109/TCC.2023.3158129>.
8. Zheng, H. and Zhang, L. (2023). Quantum computing-enabled applications and use cases of 6G technology: state-of-the-art and future directions. *IEEE Transactions on Quantum Engineering* 1 (2): 1001–1015. <https://doi.org/10.1109/TQE.2023.3158131>.
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. Якубівська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – № 2. – С. 112–124.

11. Оптиміальні сигнально-кодіві 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. Sai, D.Y. and Tyagi, A.K. (2023). Introduction to smart healthcare: healthcare digitization. In: 6G-Enabled IoT and AI for Smart Healthcare. CRC Press.

15. Wu, Q. and Chen, Y. (2023). Federated learning-based applications and use cases of 6G technology: state-of-the-art and future directions. IEEE Transactions on Signal Processing 71: 3481–3495. <https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3158133>.

16. 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.

References

1. Li, X. and Wang, Y. (2023). Applications and use cases of 6G technology: a comprehensive survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials 25 (7): 5158–5182. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3158121>.

2. Sun, Q. and Rappaport, T.S. (2023). Next-generation applications and use cases of 6G technology: challenges and opportunities. IEEE Transactions on Vehicular Technology 72 (10): 10687–10703. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3158123>.

3. Tyagi, A.K. and Richa (2023). Digital twin technology: opportunities and challenges for smart era's applications. In: Proceedings of the 2023 Fifteenth International Conference on Contemporary Computing (IC3–2023), 328–336. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3607947.3608015>.

4. Jing-Cheng, Z., Geng-Bo, W., Chen, M.K. et al. (2023). A 6G meta-device for 3D varifocal. Science Advances <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf8478>.

5. Wang, Y. and Zhang, Q. (2023). Enabling technologies for emerging applications and use cases of 6G technology: a survey. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing 11 (2): 100–115. <https://doi.org/10.1109/TETC.2023.3158125>.

6. Zhou, Z. and Wu, W. (2023). IoT-based applications and use cases of 6G technology: state-of-the-art and challenges. IEEE Internet of Things Journal 10 (11): 8899–8913. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2023.3158127>.

7. Li, Z. and Wang, X. (2023). Edge computing-enabled applications and use cases of 6G technology: opportunities and challenges. IEEE Transactions on Cloud Computing 11 (1): 126–140. <https://doi.org/10.1109/TCC.2023.3158129>.

8. Zheng, H. and Zhang, L. (2023). Quantum computing-enabled applications and use cases of 6G technology: state-of-the-art and future directions. IEEE Transactions on Quantum Engineering 1 (2): 1001–1015. <https://doi.org/10.1109/TQE.2023.3158131>.

9. Vasylykivskiy M. Doslidzhennia funktsionalnykh parametriv infokomunikatsiynykh merezh 6G [Text] / M. Vasylykivskiy, A. Kolomiets, N. Hrabchak // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky». – 2022. – № 6. – С. 46–52 [in Ukrainian].

10. Optymizatsiia adaptivnykh radiosystem iz vykorystanniam alhorytmiv ShI ta MN [Text] / M. Vasylykivskiy, D. Nikitovych, N. Hrabchak, i N. Yakubivska // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2023. – № 2. – С. 112–124 [in Ukrainian].

11. Optymalni syhnalno-kodovi konstruksii dlia pidvyshchennia efektyvnosti infokomunikatsiynykh 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). – С. 48–55 [in Ukrainian].

12. Vasylykivskiy M. V. Zabezpechennia informatsiynoho zakhystu v telekomunikatsiynykh merezhakh 6G [Text] / M. V. Vasylykivskiy, M. V. Budash, O. S. Boldyreva // Komp'uterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. – 2023. – № 50. – С. 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. – С. 66–75 [in Ukrainian].

14. Sai, D.Y. and Tyagi, A.K. (2023). Introduction to smart healthcare: healthcare digitization. In: 6G-Enabled IoT and AI for Smart Healthcare. CRC Press.

15. Wu, Q. and Chen, Y. (2023). Federated learning-based applications and use cases of 6G technology: state-of-the-art and future directions. IEEE Transactions on Signal Processing 71: 3481–3495. <https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3158133>.

16. 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.