

АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 6G

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді розглянуто концептуальні засади формування архітектури інтелектуальних телекомунікаційних мереж шостого покоління (6G), що є логічним етапом еволюції мобільних технологій після 5G. Проаналізовано ключові технологічні напрями, які визначають розвиток 6G, зокрема інтеграцію штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML), використання терагерцового (THz) спектра, фотонних і оптичних систем, технологій масивного MIMO, beamforming та Інтернету речей (IoT). Особливу увагу приділено когнітивному управлінню ресурсами, автономній оптимізації мережесих процесів і створенню надширокопasmових, енергоефективних каналів зв'язку з наднизькою затримкою.

Показано, що архітектура 6G формується як багаторівнева адаптивна система, заснована на конвергенції хмарних, периферійних і туманних обчислень, інтегрованих з фотонними технологіями та інтелектуальними алгоритмами управління. Визначено перспективи використання квантово-стійких криптографічних методів, блокчейну та принципів «secure-by-design» для забезпечення безпеки мережесих інфраструктур.

Отримані результати свідчать, що 6G стане інтеграційною платформою для створення автономних, самоорганізованих і енергоефективних систем, що поєднують фізичний і цифровий простори, відкриваючи можливості для нових сервісів у галузях транспорту, промисловості, медицини, освіти та го-лографічних комунікацій.

Ключові слова: 6G, інтелектуальна телекомунікаційна мережа, штучний інтелект, машинне навчання, терагерцовий спектр, фотонна технологія, квантова безпека, хмарне обчислення.

Abstract

The report examines the conceptual foundations for developing the architecture of intelligent sixth-generation (6G) telecommunication networks, which represent a logical stage in the evolution of mobile technologies following 5G. The key technological directions shaping 6G development are analyzed, including the integration of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML), the use of the terahertz (THz) spectrum, photonic and optical systems, massive MIMO, beamforming, and the Internet of Things (IoT). Particular attention is paid to cognitive resource management, autonomous network optimization, and the creation of ultra-broadband, energy-efficient communication channels with ultra-low latency.

It is shown that the 6G architecture is being formed as a multi-level adaptive system based on the convergence of cloud, edge, and fog computing, integrated with photonic technologies and intelligent control algorithms. The prospects for applying quantum-resistant cryptographic methods, blockchain, and “secure-by-design” principles to ensure network infrastructure security are outlined.

The obtained results indicate that 6G will become an integration platform for the creation of autonomous, self-organizing, and energy-efficient systems that combine physical and digital spaces, opening new opportunities for services in transportation, industry, healthcare, education, and holographic communications.

Keywords: 6G, intelligent telecommunication network, artificial intelligence (AI), machine learning (ML), terahertz spectrum, photonic technology, quantum security, cloud computing.

Вступ

Сучасний етап розвитку телекомунікаційних технологій характеризується стрімким зростанням обсягів передавання даних, різноманітністю цифрових сервісів і підвищеними вимогами до швидкодії, надійності та інтелектуальності мережевої інфраструктури. Еволюція мобільних технологій від 1G до 5G забезпечила поступовий перехід до високошвидкісного широкопasmового зв'язку, однак виклики, пов'язані з розвитком інтернету речей (IoT), автономних систем,

голографічних комунікацій, AR/VR-технологій і промислової автоматизації, потребують нової архітектури мереж — шостого покоління (6G). Концепція 6G передбачає створення інтелектуальної телекомунікаційної екосистеми, що інтегрує штучний інтелект (AI), машинне навчання (ML), фотонні технології, терагерцовий (THz) спектр, сенсорні системи та розподілені обчислювальні платформи [1].

Основними напрямками розвитку є впровадження когнітивного управління ресурсами, прогнозування трафіку, автономної оптимізації мережесих процесів і створення надширокопasmових, енергоефективних каналів зв'язку з наднизькою затримкою (менше 1 мс). Важливою складовою архітектури 6G є конвергенція хмарних, периферійних і туманних обчислень, що забезпечують розподілене опрацювання даних у реальному часі. Використання фотонних і оптичних технологій відкриває перспективи реалізації терабітних каналів передавання, а інтеграція AI/ML підвищує автономність, стійкість і якість користувацького досвіду. Таким чином, формування архітектури інтелектуальних мереж 6G є ключовим напрямом розвитку телекомунікацій, спрямованим на створення високопродуктивних, адаптивних і безпечних систем зв'язку майбутнього [2].

Результати дослідження

У ході дослідження визначено ключові технологічні напрями, що формують основу функціонування та розвитку мереж шостого покоління (6G), зокрема штучний інтелект (AI) і машинне навчання (ML), Інтернет речей (IoT), фотонні та оптичні технології, а також нові парадигми обчислень (edge, cloud, fog, dew, spatial computing) [3]. Отримані результати дозволяють сформулювати такі основні висновки:

Інтеграція штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) є визначальним фактором підвищення ефективності, автономності та надійності мереж 6G. Алгоритми AI забезпечують динамічну оптимізацію мережесих параметрів, прогнозування трафіку, адаптивне управління ресурсами та проактивне технічне обслуговування. Вони формують основу для інтелектуальної самоорганізації, самовідновлення й персоналізації сервісів у режимі реального часу [4].

Використання високочастотних діапазонів — міліметрового (mmWave) і терагерцового (THz) спектрів — відкриває можливості для надшвидкої бездротової передачі даних із мінімальною затримкою. Ці частоти є базовими для реалізації URLLC-застосувань, таких як автономний транспорт, віртуальна та доповнена реальність, а також дистанційна хірургія [5].

Технології масивного MIMO та формування променя (beamforming) забезпечують підвищену спектральну ефективність, стабільність сигналу та розширене покриття. Використання антенних решіток із великою кількістю елементів сприяє ефективному керуванню променями в умовах щільної міської забудови [6].

Інтеграція IoT і сенсорних мереж у 6G сприятиме створенню всеохопного середовища підключення для мільярдів пристроїв. Забезпечення наднизької затримки, масштабованості та енергоефективності дозволить реалізувати інтелектуальні системи у сферах розумних міст, промисловості, медицини, сільського господарства та транспорту [7].

Розподілені обчислювальні архітектури (cloud, edge, fog, dew computing) створюють єдину обчислювальну екосистему для оброблення даних у реальному часі.

Хмарні обчислення забезпечують масштабованість і централізоване управління ресурсами.

Периферійні (edge) обчислення мінімізують затримку, наближаючи аналітику до користувача.

Туманні (fog) обчислення підтримують локальну взаємодію пристроїв і спільну аналітику.

Dew computing доповнює систему децентралізованою локальною обробкою на рівні пристроїв, забезпечуючи автономність і стійкість систем.

Просторові (spatial) обчислення та технології AR/VR/MR у 6G створюють нову парадигму взаємодії людини з цифровим середовищем. Завдяки ультранизькій затримці, високій пропускній здатності й AI-персоналізації забезпечується безперервна інтеграція фізичного та цифрового просторів, що відкриває перспективи для телеприсутності, віддаленої співпраці та навчання [8].

Фотонні та оптичні технології визначають основу інфраструктури 6G:

Терагерцова комунікація (THz) забезпечує передачу даних на швидкостях до терабіт за се-

кунду.

Оптична бездротова комунікація (FSO) доповнює радіочастотні системи, забезпечуючи високошвидкісні канали в перевантажених зонах.

Інтегрована фотоніка сприяє створенню компактних, енергоефективних компонентів для оптичних систем 6G.

Волоконно-оптичні мережі залишаються магістральною основою backhaul/fronthaul-з'єднань, забезпечуючи надвисоку пропускну здатність і надійність.

Безпека та надійність у 6G забезпечуються впровадженням квантово-стійких криптографічних методів, блокчейну та принципів «secure-by-design». Це гарантує захист даних IoT-пристроїв, мережових з'єднань і хмарних сервісів від сучасних і майбутніх кіберзагроз [1-5].

Отримані результати підтверджують, що мережі шостого покоління стануть інтеграційною платформою для інтелектуальних, автономних та енергоефективних систем, які поєднують штучний інтелект, фотоніку, оптичні канали та розподілені обчислення. Така архітектура забезпечить технологічний фундамент для реалізації нових сервісів, підвищення ефективності цифрової економіки та формування глобального інтелектуального середовища майбутнього.

Висновки

Архітектура інтелектуальних телекомунікаційних мереж шостого покоління (6G) формується як багаторівнева, адаптивна та когнітивна система, що інтегрує штучний інтелект, квантові, фотонні та розподілені технології. Результати дослідження свідчать, що ключовими чинниками розвитку 6G є поєднання штучного інтелекту (AI) і машинного навчання (ML) з новими підходами до керування ресурсами, передавання даних і забезпечення безпеки. Це створює передумови для реалізації автономних, самонавчальних мереж із наднизькою затримкою, високою пропускну здатністю та підвищеною енергоефективністю.

Впровадження фотонних технологій, оптичних систем, бездротової передачі енергії (WPT) та механізмів енергозбирання забезпечує перехід до стійких, енергонезалежних і високопродуктивних мережових інфраструктур. Така еволюція сприяє появі нових сервісів у галузях охорони здоров'я, транспорту, виробництва, розумних міст і голографічних комунікацій.

Водночас подальший розвиток 6G вимагає вирішення питань стандартизації, кібербезпеки, управління даними та етичного використання технологій штучного інтелекту. Комплексне дослідження архітектурних принципів і міждисциплінарних рішень є запорукою ефективного впровадження 6G як основи для формування глобальної інтелектуальної цифрової екосистеми майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tyagi, A.K., Kumari, S., Chidambaram, N., and Sharma, A. (2024). Engineering applications of Blockchain in this smart era. In: Enhancing Medical Imaging with Emerging Technologies. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5261-8.ch011>.
2. Ajanthaa, L. and Seranmadevi, R. (2024). Engineering applications of artificial intelligence. In: Enhancing Medical Imaging with Emerging Technologies (ed. P.H. Sree and A.K. Tyagi). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5261-8.ch010>.
3. Tyagi, A.K., Kukreja, S., Richa, and Sivakumar, P. (February 2024). Role of Blockchain Technology in Smart era: a review on possible smart applications. Journal of Information & Knowledge Management. <https://doi.org/10.1142/S0219649224500321>
4. 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>.
5. 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>.
6. 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>.

7. Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж [Текст] / М. В. Васильківський, А. В. Прикмета, А. Олійник, Д. В. Нікітович // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2023. – № 1. (317). – С. 33–41.

8. 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.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфо-комунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Прикмета Андрій Володимирович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: botan.mua@gmail.com

Карпенко Іван Володимирович — студент групи ТСМ-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: casko2003@gmail.com

Vasylkivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Prykmeta Andrii V. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: botan.mua@gmail.com

Karpenko Ivan V. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: casko2003@gmail.com