

Нежуренко Олександр Григорович

кандидат технічних наук

старший викладач кафедри комп'ютерних наук

та інформаційних технологій

Житомирський державний університет імені Івана Франка

м. Житомир, Україна

<https://orcid.org/0009-0007-4594-9606>

ТЕХНОЛОГІЇ 5G ТА 6G ДЛЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ: АНАЛІЗ ОБМЕЖЕНЬ І ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ

Анотація. Тези присвячені аналізу можливостей і технічних бар'єрів під час розгортання мереж 5G/6G для потреб Інтернету речей. Доведено, що поточне покоління 5G успішно закриває базові потреби масового IoT. Проте майбутні сценарії залежатимуть від 6G і наскільки ефективно до 2030 року вдасться подолати обчислювальні та обмеження у новій архітектурі.

Ключові слова: 5G, 6G, Інтернет речей, терагерцовий діапазон, massive MIMO, network slicing, енергоефективність, edge AI.

Стрімке зростання кількості IoT-пристроїв формує нові вимоги до бездротових мереж: високу щільність підключень, малу затримку, високу надійність і тривалу автономність кінцевих вузлів. У цьому контексті 5G уже стало важливим етапом еволюції мережевої інфраструктури, однак для критичних, масових і широкосмугових IoT-сервісів його можливості поступово наближаються до технічної межі. Саме тому перехід до 6G розглядається не як формальне оновлення стандарту, а як необхідна зміна архітектури, частотних ресурсів і способів керування мережею [1, с. 274-278; 2, с. 836-886; 3, с. 2; 4, с. 1117-1174].

Однак, перехід IoT-мереж до 6G несе за собою певні перспективи та обмеження. З цієї причини є доцільним проведення порівняльного аналізу, аби виявити, що може запропонувати 6G і чи зможе він остаточно замінити 5G. Найбільш очевидна риса, яка відрізняє 5G від 6G - це різниця частотних діапазонів: якщо 5G для IoT спирається на sub-6 GHz і mmWave, то 6G орієнтується на терагерцовий спектр, що відкриває доступ до значно ширших смуг каналу й теоретично вищої пропускну здатності. Водночас зі зростанням частоти різко зменшується дальність зв'язку та погіршується проникнення крізь перешкоди, тому терагерцові рішення доцільні передусім для локальних, кластеризованих або внутрішніх IoT-сценаріїв. Отже, однією з головних технічних проблем 6G до 2030 року залишається компроміс між швидкістю, покриттям і вартістю щільного розгортання базових станцій [1, с. 274-278; 2, с. 836-886; 3, с. 2; 5, с. 136-141].

Паралельно з освоєнням нових частот відбувається розвиток технологій massive MIMO та мережної сегментації. Перехід до ultra-massive MIMO дає змогу підвищити просторову роздільну здатність, збільшити кількість одночасних потоків і масштабувати щільність підключень до рівня, потрібного для промислового IoT, автономного транспорту та розумних міст. Разом із гнучким network slicing це створює передумови для одночасної підтримки критичних, масових і широкосмугових IoT-сервісів у межах єдиної інфраструктури. Однак таке покращення супроводжується різким зростанням складності обробки сигналів, вимог до beamforming та потребою в AI-калібруванні радіоресурсів [4, с. 1117-1174; 5, с. 136-141; 6, с. 44-51; 9, с. 68-76].

У IoT-середовищі для автономних датчиків особливо важливим є низьке енергоспоживання: у 5G активні режими передавання істотно обмежують термін роботи батарейних сенсорів, тоді як у 6G перспективними вважаються ambient backscatter, energy harvesting, інтелектуальні режими сну та адаптивне керування трафіком. Поєднання цих підходів потенційно дає змогу істотно знизити енергоспоживання і наблизити автономність кінцевих вузлів до

багаторічної експлуатації без частого обслуговування. Водночас практичне впровадження таких рішень залежить від ефективності ректенн, доступності джерел енергії та реальної обчислювальної спроможності периферійних вузлів [4, с. 1117-1174; 7; 8, с. 101658].

У мережах 6G штучний інтелект буде використовуватися всюди і охоплюватиме всі рівні мережі - від RAN і edge-вузлів до її ядра. ШІ буде потрібен не лише для керування ресурсами й прогнозування навантаження, а й для економії енергії, підвищення безпеки мережі та стабільної роботи IoT-пристроїв. Саме тому перспективи 6G до 2030 року пов'язуються з появою edge AI-прискорювачів, предиктивного керування сегментами мережі та безпечного навчання на розподілених даних. Отже, 6G доцільно розглядати не як повну заміну 5G, а як наступний рівень розвитку мережевої екосистеми, у якій 5G забезпечуватиме базове масове підключення, а 6G — критичні й надщільні сценарії IoT [5, с. 136-141; 7; 8, с. 101658; 9, с. 68-76].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Shen F. A comprehensive study of 5G and 6G networks / F. Shen, H. Shi, Y. Yang // 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG). – 2021. – P. 274–278. DOI: <https://doi.org/10.1109/icwscg53609.2021.00070> URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9616582>
2. Alwis C. D. Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research / C. D. Alwis, A. Kalla, Q.-V. Pham, P. Kumar, K. Dev, W.-J. Hwang, M. Liyanage // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2021. – Vol. 2. – P. 836–886. DOI: <https://doi.org/10.1109/ojcoms.2021.3071496> URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9397776>
3. Nakamura T. 5G evolution and 6G / T. Nakamura // Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing and Networking. – 2021. –

- P. 2–2. DOI: <https://doi.org/10.1145/3427796.3432714> URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3427796.3432714>
4. Vaezi M. Cellular, Wide-Area, and Non-Terrestrial IoT: A Survey on 5G Advances and the Road Toward 6G / M. Vaezi, A. Azari, S. R. Khosravirad, M. Shirvanimoghaddam, M. M. Azari, D. Chasaki, P. Popovski // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, No. 2. – P. 1117–1174. DOI: <https://doi.org/10.1109/comst.2022.3151028> URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9711564>
 5. Al-Bahri M. From 5G to 6G: Evolution and Enabling Technologies in Shaping the Future of IoT Applications / M. Al-Bahri, W. Alkishri, F. Y. H. Ahmed // 5TH International Conference on Communication Engineering and Computer Science (CIC-COCOS'24). – 2024. – P. 136–141. DOI: <https://doi.org/10.24086/cocos2024/paper.1166> URL: <https://conferences.cihanuniversity.edu.iq/index.php/COCOS/COCOS24/paper/view/1166/487>
 6. Ji B. Several Key Technologies for 6G: Challenges and Opportunities / B. Ji, Y. Han, S. Liu, F. Tao, G. Zhang, Z. Fu, C. Li // IEEE Communications Standards Magazine. – 2021. – Vol. 5, No. 2. – P. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.1109/mcomstd.001.2000038> URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9464918>
 7. Ferrag M. A. Edge Learning for 6G-enabled Internet of Things: A Comprehensive Survey of Vulnerabilities, Datasets, and Defenses / M. A. Ferrag, O. Friha, B. Kantarci, N. Tihanyi, L. Cordeiro, M. Debbah, D. Hamouda, M. Al-Hawawreh, K.-K. R. Choo // arXiv preprint arXiv:2306.10309. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2306.10309> URL: <https://arxiv.org/abs/2306.10309>
 8. Ullah A. 6G Internet-of-Things assisted smart homes and buildings: Enabling technologies, opportunities and challenges / A. Ullah, Fawad, A. Nadeem, M. Arif, M. M. Bashir, W. Choi // Internet of Things. – 2025. – Vol. 32. – P. 101658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101658> URL: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101658>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2542660525001726>

9. Hu C. Application research of 5G/6G cellular network in intelligent Transportation Internet of Things / C. Hu // Highlights in Science, Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 85. – P. 68–76. DOI: <https://doi.org/10.54097/hqvvny02> URL: <https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/18304>