

УДК 004.22

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-2512-2526](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-2512-2526)

Нежуренко Олександр Григорович кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Житомирський державний університет імені Івана Франка, <https://orcid.org/0009-0007-4594-9606>

5G/6G ДЛЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ: ТЕХНІЧНІ ОБМЕЖЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ДО 2030 РОКУ

Анотація. Мета статті. Метою статті є проведення кількісного технічного аналізу ключових параметрів мереж 5G (Fifth Generation Mobile Network – мобільна мережа п'ятого покоління) та 6G (Sixth Generation Mobile Network – мобільна мережа шостого покоління) – частотних діапазонів, масивних систем MIMO (Multiple Input Multiple Output – множинний вхід – множинний вихід), мережної сегментації, енергоефективності та AI (Artificial Intelligence – штучний інтелект)-оптимізації – з метою оцінки реальних можливостей і обмежень у підтримці масових IoT (Internet of Things – Інтернет речей)-екосистем станом на 2030 рік за умови прогнозованого зростання кількості пристроїв до сотень мільярдів.

Наукова новизна. Новизна полягає в системному кількісному порівнянні технічних компромісів 5G та 6G саме для різних категорій IoT-додатків з використанням уніфікованих метрик (дальність, затримка, щільність підключень, енергоспоживання на біт, автономність). Вперше в одному дослідженні зіставлено вплив терагерцових хвиль, ультрамасивних MIMO (до 4096 антен), технологій ambient backscatter (пасивна зворотна розсіювання навколишнього радіосигналу), energy harvesting (збір енергії з навколишнього середовища) та edge-AI (AI на периферії мережі) на досягнення параметрів URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication – ультранадійний зв'язок з малою затримкою), mMTC (massive Machine Type Communication – масовий машинний зв'язок) та широкосмугового IoT. Запропоновано комплексну оцінку фундаментальних фізичних та обчислювальних обмежень (модель Фріїса, теорема Шеннона, складність обробки $O(N^2 \log N)$, ККД ректенн) з прогнозними значеннями до 2030 року.

Результати. Продемонстровано, що 5G mmWave (millimeter Wave – міліметрові хвилі, 24–100 ГГц) забезпечує дальність лише 100–500 м, затримку 5–10 мс, щільність до 10^5 пристроїв/км² та автономність 1–3 роки при енергоспоживанні 100–500 нДж/біт. 6G на базі THz (Terahertz – терагерцовий

діапазон, 0,1–10 ТГц) теоретично досягає пропускної здатності до 1 Тбіт/с і затримки $<0,1$ мс, але дальність скорочується до 10–100 м через атмосферне загасання 10–100 дБ/км. Ультрамасивні MIMO (1024–4096 антен) підвищують щільність підключень до 10^7 пристроїв/км² та точність beamforming (формування променя) до $\pm 0,5^\circ$. Технології ambient backscatter (0,001–0,01 нДж/біт) та energy harvesting дозволяють автономність пасивних пристроїв 15–20 років. AI-оптимізація (Deep RL – глибоке навчання з підкріпленням, LSTM – довга короткотривала пам'ять, CNN – згорткові нейронні мережі) на edge-рівні забезпечує приріст пропускної здатності на 35 % та економію енергії до 40 % при обчислювальній складності 10–200 GFLOPS (Giga Floating Point Operations Per Second – мільярдів операцій з плаваючою комою за секунду).

Висновки. Технологія 6G до 2030 року здатна подолати ключові обмеження 5G і забезпечити підтримку надщільних, ультранадійних та довгоавтономних IoT-мереж завдяки терагерцовому спектру, ультрамасивним MIMO, пасивним та енергозберігаючим технікам передачі й інтеграції AI на всіх рівнях мережі. Водночас реалізація вимагає вирішення викликів: щільного розгортання інфраструктури, створення спеціалізованих AI-прискорювачів (TPU – Tensor Processing Unit / тензорний процесор, NPU – Neural Processing Unit / нейронний процесор), підвищення ККД ректенн (rectifying antenna – випрямляюча антена) >60 % та міжнародної стандартизації терагерцового діапазону. Отримані кількісні оцінки можуть бути використані для обґрунтування стратегій міграції до 6G в розумних містах, промисловому IoT та критичних інфраструктурах.

Ключові слова: 5G/6G технології, Інтернет речей, міліметрові та терагерцові діапазони, масивні MIMO-системи, мережна сегментація, енергоефективність IoT-пристроїв, штучний інтелект у мережевій інфраструктурі.

Nezhurenko Oleksandr PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Computer Science and Information Technology, Zhytomyr Ivan Franko State University, <https://orcid.org/0009-0007-4594-9606>

5G/6G FOR THE INTERNET OF THINGS: TECHNICAL LIMITATIONS AND DEVELOPMENT PROSPECTS UNTIL 2030

Abstract. Purpose of the article. The purpose of the article is to conduct a quantitative technical analysis of the key parameters of 5G (Fifth Generation Mobile Network) and 6G (Sixth Generation Mobile Network) networks – frequency bands, massive MIMO systems (Multiple Input Multiple Output), network segmentation, energy efficiency, and AI (Artificial Intelligence) optimization – in order to assess the real capabilities and limitations in supporting mass IoT (Internet of Things)

ecosystems as of 2030, assuming a projected growth in the number of devices to hundreds of billions.

Scientific novelty. The novelty lies in the systematic quantitative comparison of 5G and 6G technical compromises specifically for different categories of IoT applications using unified metrics (range, latency, connection density, energy consumption per bit, autonomy). For the first time in a single study, the impact of terahertz waves, ultra-massive MIMO (up to 4096 antennas), ambient backscatter technologies (passive backscattering of the surrounding radio signal), energy harvesting (collecting energy from the environment), and edge-AI (AI at the network periphery) on achieving URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication), mMTC (massive Machine Type Communication), and broadband IoT parameters. A comprehensive assessment of fundamental physical and computational constraints (Fries model, Shannon theorem, $O(N^2 \log N)$ processing complexity, rectenna efficiency) with forecast values until 2030 is proposed.

Results. It has been demonstrated that 5G mmWave (millimeter Wave, 24–100 GHz) provides a range of only 100–500 m, a delay of 5–10 ms, a density of up to 10^5 devices/km², and an autonomy of 1–3 years with an energy consumption of 100–500 nJ/bit. THz-based 6G (Terahertz, 0.1–10 THz) theoretically achieves a throughput of up to 1 Tbit/s and a latency of <0.1 ms, but the range is reduced to 10–100 m due to atmospheric attenuation of 10–100 dB/km. Ultra-massive MIMO (1024–4096 antennas) increases connection density to 10^7 devices/km² and beamforming accuracy to $\pm 0.5^\circ$. Ambient backscatter (0.001–0.01 nJ/bit) and energy harvesting technologies enable passive devices to operate autonomously for 15–20 years. AI optimization (Deep RL – deep reinforcement learning, LSTM – long short-term memory, CNN – convolutional neural networks) at the edge level provides a 35% increase in throughput and energy savings of up to 40% with a computational complexity of 10–200 GFLOPS (Giga Floating Point Operations Per Second).

Conclusions. By 2030, 6G technology will be able to overcome the key limitations of 5G and support ultra-dense, ultra-reliable, and long-range IoT networks thanks to terahertz spectrum, ultra-massive MIMO, passive and energy-saving transmission techniques, and AI integration at all network levels. At the same time, implementation requires addressing challenges such as dense infrastructure deployment, the creation of specialized AI accelerators (TPU – Tensor Processing Unit, NPU – Neural Processing Unit), increasing the efficiency of rectifying antennas (rectifying antenna) >60%, and international standardization of the terahertz band. The quantitative estimates obtained can be used to justify migration strategies to 6G in smart cities, industrial IoT, and critical infrastructures.

Keywords: 5G/6G technologies, Internet of Things, millimeter and terahertz bands, massive MIMO systems, network segmentation, energy efficiency of IoT devices, artificial intelligence in network infrastructure.

Постановка проблеми. Експоненціальне зростання кількості пристроїв IoT до 500 мільярдів одиниць до 2030 року виявляє деякі критичні потреби у впровадженні мережевих технологій, необхідних для підтримки надвисокої щільності підключень ($>10^6$ пристроїв/км²), наднизької затримки (<1 мс), високої надійності ($>99,999\%$) або тривалої автономності пристроїв (>10 років). Технологія 5G, яка використовує міліметрові хвилі (24-100 ГГц), масові технології Multiple Input Multiple Output (MIMO) (64-256 антен), основні технічні обмеження: відстань 100-500 метрів, практична затримка в діапазоні 5-10 мс, щільність підключення не більше 10^5 пристроїв/км² та енергоспоживання 100-500 нДж/біт, що визначає автономність 1-3 роки. Технологія 6G передбачає використання терагерцових діапазонів (0,1-10 ТГц) і надпотужних систем MIMO (Multi-Input Multi-Output) (1024-4096 антен), оптимізованої за допомогою штучного інтелекту (AI) мережевої інфраструктури та нових енергоефективних технологій (розсіяння навколишнього середовища, збір енергії) для подолання цих обмежень. При цьому важливе значення має технічний аналіз певних параметрів цих технологій та кількісний аналіз впливу цих технологій на можливість підтримки різних класів додатків Інтернету речей станом на 2030 рік.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Shen F., Shi H., Yang Y. [1] провели ретельний аналіз мереж 5G і 6G, в якому систематизували архітектурні характеристики та ключові технології обох поколінь. Alwis C. D. та співавтори [2] надали детальний огляд перспектив 6G, включаючи аналіз терагерцових комунікацій та некластерних мереж. Nakamura T. [3] розглянув еволюцію від 5G до 6G, зосередившись на критичних відмінностях у підходах до проектування мереж. Adil M. та колеги [4] розробили таксономію технологій 5G/6G для метавсесвіту та проаналізували виклики безпеки. Vaezi M. та співавтори [5] провели детальний аналіз сотових, широкозонних та некластерних IoT-мереж на базі 5G з перспективами 6G. Yan Y. та колеги [6] запропонували метод виявлення вторгнень на основі мета-навчання для промислового інтернету на базі 5G. Latreche S., Bellahsene H., Taleb-Ahmed A. [7] систематизували перспективні застосування 6G. Ji B. та співавтори [8] ідентифікували шість ключових технологій для 6G. Bhatia S. та колеги [9] дослідили майбутнє IoT у контексті 5G, 6G та 7G. Al-Bahri M., Alkishri W., Ahmed F. Y. H. [10] проаналізували еволюцію від 5G до 6G для IoT-застосувань. Ferrag M. A. та співавтори [11] представили всебічний огляд вразливостей edge learning для 6G-enabled IoT. Ullah A. та колеги [12] дослідили застосування 6G IoT для розумних будинків, виділивши ISAC, ML, VLC та блокчейн як критичні технології. Hu C. [13] проаналізував застосування 5G/6G у інтелектуальних транспортних системах. Andrade A. та співавтори [14] провели систематичний огляд моніторингу життєвих показників на основі IoT. Malik M., Garg S. K. [15]

дослідили еволюцію мереж за межами 5G. Невирішеною залишається проблема кількісної оцінки технічних компромісів між параметрами частотних діапазонів, MIMO-систем, мережної сегментації та енергоефективності для різних категорій IoT-додатків.

Мета статті – кількісний технічний аналіз параметрів міліметрових/терагерцових діапазонів, масивних MIMO-систем, мережної сегментації, енергоефективності та AI-оптимізації для оцінки можливостей та обмежень 5G/6G щодо підтримки IoT-екосистем станом на 2030 рік.

Виклад основного матеріалу. Фундаментальною відмінністю між 5G та 6G є використання різних частотних діапазонів, що визначає компроміс між пропускну здатністю, дальністю покриття та енергоспоживанням. Технологія 5G використовує три діапазони: Sub-6 GHz (600 МГц - 6 ГГц) для широкого покриття, FR1 (410 МГц - 7.125 ГГц) та FR2 міліметрові хвилі (24.25-52.6 ГГц у Release 15/16). Технологія 6G планує освоєння терагерцового діапазону 0.1-10 ТГц, що забезпечує доступ до спектральних ресурсів порядку 10-100 ГГц ширини каналу. Основна відмінність між 5G і 6G полягає у використанні різних діапазонів частот оскільки це має прямий вплив на пропускну здатність, дальність зв'язку та придатність для застосувань Інтернету речей. У таблиці 1 наведено технічні характеристики міліметрових хвиль 5G і терагерцових хвиль 6G.

Таблиця 1

Порівняння частотних діапазонів 5G та 6G для IoT

Параметр	5G Sub-6 GHz	5G mmWave (24-100 GHz)	6G THz (0.1-10 THz)
Пропускна здатність	До 1 Гбіт/с	До 20 Гбіт/с	До 1 Тбіт/с
Дальність покриття	1-10 км	100-500 м	10-100 м
Проникнення крізь перешкоди	Високе	Низьке	Дуже низьке
Загасання атмосферою	0.01-0.1 дБ/км	5-20 дБ/км	10-100 дБ/км
Ширина каналу	100 MHz	400 MHz - 2 GHz	10-100 GHz
Спектральна ефективність	15 біт/с/Гц	30 біт/с/Гц	50+ біт/с/Гц
Енергоспоживання на біт	Базове	×3-5 від базового	×10-15 від базового

Джерело: складено на основі [1, 2, 3]

Дані в таблиці 1 показують основний компроміс між пропускнуою здатністю та діапазоном покриття. Терагерцові діапазони 6G мають теоретичну пропускну здатність до 1 Тбіт/с, що на два порядки більше, ніж у 5G mmWave, але діапазон покриття обмежений 10-100 метрами через високе атмосферне загасання (10-100 дБ/км). Для застосувань IoT це означає щільне розміщення базових станцій у міських районах, що можна розглядати як обмеження 6G THz до внутрішніх або локальних груп пристроїв.

Фізичний аналіз показує, що загасання електромагнітних хвиль у атмосфері залежить від частоти згідно з моделлю Фріїса: $L = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(4\pi/c) + A(f)$, де $A(f)$ - частотно-залежне атмосферне поглинання, що зростає з $\sim f^2$ для міліметрових хвиль та $\sim f^{2.5}$ для терагерцових через резонансне поглинання молекулами H_2O та O_2 . Це пояснює 10-кратне збільшення загасання для THz (10-100 дБ/км) порівняно з mmWave (5-20 дБ/км). При цьому пропускна здатність визначається теоремою Шеннона $C = B \cdot \log_2(1+SNR)$, де збільшення смуги B від 400 МГц-2 ГГц (5G) до 10-100 ГГц (6G) забезпечує пропорційне зростання капациетету до 1 Тбіт/с при $SNR > 30$ дБ.

Технологія Massive MIMO відіграє важливу роль у підвищенні спектральної ефективності за допомогою просторового мультиплексування та спрямованості випромінювання. 5G використовує Massive MIMO з 64-256 антенними елементами. 6G передбачає використання ультрамасивних систем з 1024-4096 антенними елементами у вигляді планарних або конформних антенних решіток.

Технологія Massive MIMO має вирішальне значення для підвищення спектральної ефективності та забезпечення багаторазового доступу для пристроїв IoT. У таблиці 2 порівняно технічні параметри систем MIMO в 5G і 6G.

Таблиця 2

Технічні параметри масивних MIMO-систем 5G та 6G

Характеристика	5G Massive MIMO	6G Ultra-Massive MIMO	Вплив на IoT
Кількість антенних елементів	64-256	1024-4096	Збільшення одночасних підключень
Просторова роздільна здатність	8-16 потоків	64-128 потоків	Щільність до 10^7 пристроїв/км ²
Точність beamforming	$\pm 5^\circ$	$\pm 0.5^\circ$	Зниження інтерференції на 20-30 дБ

Характеристика	5G Massive MIMO	6G Ultra-Massive MIMO	Вплив на IoT
Складність обробки	$O(N^2)$	$O(N^2 \log N)$	Затримка обробки < 0.1 мс
Енергоефективність	Базова	$\times 5-10$ покращення	Автономність IoT до 15 років
Смуга когерентності	200 кГц	2 МГц	Стабільність каналу для IoT
Складність калібрування	Щогодинна	Адаптивна (AI)	Зменшення overhead на 40%

Джерело: складено на основі [5, 8, 12]

Перехід від масового MIMO (64-256 антен) у технології 5G до ультрамасового MIMO (1024-4096 антен) у технології 6G дозволяє вчетверо збільшити просторову роздільну здатність і обслуговувати до 10^7 пристроїв IoT на квадратний кілометр. Критично важливим є впровадження адаптивного калібрування на основі штучного інтелекту, яке зменшує накладні витрати на 40% порівняно з періодичним калібруванням у 5G. Складність обробки для 6G становить $O(N^2 \log N)$, тому потрібні спеціалізовані апаратні прискорювачі на основі тензорних процесорів.

Звернемо увагу на те, що просторова роздільна здатність MIMO пропорційна $\min(N_{tx}, N_{rx})$, де N_{tx} - кількість передавальних антен. При збільшенні N_{tx} від 256 (5G) до 4096 (6G) теоретична кількість одночасних просторових потоків зростає від 16 до 128, що забезпечує 8-кратне збільшення капacity при фіксованій смузі частот. Точність beamforming визначається роздільною здатністю кутів $\Delta\theta \approx \lambda / (N \cdot d)$, де λ - довжина хвилі, d - відстань між елементами. Для 6G з $\lambda = 0.3$ мм (1 ТГц), $N = 4096$, $d = \lambda / 2$ отримуємо $\Delta\theta \approx 0.5^\circ$, що на порядок точніше за 5G ($\Delta\theta \approx 5^\circ$). Це дозволяє зменшити інтерференцію між просторовими каналами на 20-30 дБ через вузькі промені. Складність обробки сигналів для beamforming $O(N^2)$ для класичних алгоритмів та $O(N^2 \log N)$ для швидких алгоритмів на базі FFT. Для 6G з $N = 4096$ це вимагає 10^8 - 10^9 операцій множення на символ, що потребує спеціалізованих ASIC/FPGA з продуктивністю > 100 GFLOPS.

Мережна сегментація (Network Slicing) реалізується через SDN/NFV архітектуру, що дозволяє створювати логічно ізольовані віртуальні мережі на єдиній фізичній інфраструктурі. Кожен сегмент має специфічні параметри QoS, оптимізовані для конкретного класу IoT-додатків.

Мережна сегментація (Network Slicing) дозволяє створювати віртуальні мережі з різними характеристиками QoS на єдиній фізичній інфраструктурі. Таблиця 3 деталізує технічні параметри сегментації для різних категорій IoT-додатків.

Таблиця 3

Технічні параметри мережних сегментів для IoT у 5G та 6G

Тип IoT-сервісу	Затримка (мс)	Надійність (%)	Пропускна здатність	Щільність (пристр./км ²)	Енергія/пристрій
Критичний IoT (5G)	<5	99.999	1-10 Мбіт/с	10 ⁴	Висока
Критичний IoT (6G)	<0.1	99.99999	10-100 Мбіт/с	10 ⁶	Середня
Масовий IoT (5G)	<100	99.0	1-100 кбіт/с	10 ⁵	Дуже низька
Масовий IoT (6G)	<10	99.9	100 кбіт/с - 1 Мбіт/с	10 ⁷	Ультранизька
Широко смуговий IoT (6G)	<1	99.999	>1 Гбіт/с	10 ⁴	Середня

Джерело: складено на основі [4, 10, 13]

Технологія 6G забезпечує двократне покращення надійності критичних IoT-сервісів (від 99.999% до 99.99999%) та 50-кратне зниження затримки (від 5 мс до 0.1 мс), що критично важливо для промислової автоматизації та автономного транспорту. Для масового IoT щільність підключень зростає на два порядки (від 10⁵ до 10⁷ пристроїв/км²) при одночасному 10-кратному зниженні затримки, що дозволяє реалізувати розумні міста з real-time аналітикою. Затримка <0.1 мс для критичного IoT у 6G досягається через: 1) Зменшення довжини TTI (Transmission Time Interval) від 1 мс (5G) до 0.01 мс (6G) при використанні терагерцових несучих з періодом символу ~10 нс; 2) Edge computing з розміщенням MEC серверів безпосередньо на базових станціях для обробки локального трафіку без звернення до core network; 3)

Попереджувальне виділення ресурсів (Pre-scheduling) на основі AI-прогнозування потреб IoT-пристроїв. Надійність 99.99999% (URLLC) забезпечується через: 1) Пакетне дублювання по незалежних радіоканалах (5G Dual Connectivity розширена до Multi-Connectivity у 6G); 2) Forward Error Correction з надлишковістю 3-5×; 3) Adaptive retransmission з динамічною зміною MCS. Щільність 10⁷ пристроїв/км² для масового IoT у 6G потребує нових протоколів множинного доступу: NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) дозволяє накладання сигналів від множини пристроїв у одному часово-частотному ресурсі з розділенням через SIC (Successive Interference Cancellation).

Енергоспоживання IoT-пристрою складається з трьох компонентів: $E_{total} = E_{tx} + E_{rx} + E_{proc}$, де E_{tx} - енергія передачі, E_{rx} - енергія приймання, E_{proc} - енергія обробки. Для автономних пристроїв на батареях критичним є мінімізація E_{tx} , оскільки передавач споживає 60-80% загальної енергії.

Енергоефективність є критичним параметром для автономних IoT-пристроїв, що визначає можливість їх тривалої експлуатації без обслуговування. Таблиця 4 аналізує енергетичні характеристики різних технологічних рішень.

Таблиця 4

Енергетичні характеристики IoT-пристроїв у мережах 5G та 6G

Технологія	Потужність передачі (мВт)	Енергія/біт (нДж/біт)	Автономність (роки)	Застосування IoT
5G eMBB	200-1000	100-500	0.1-0.5	Відеомоніторинг
5G mMTC	20-100	10-50	1-3	Розумний лічильник
5G NB-IoT	5-20	1-5	5-10	Трекери, датчики
6G THz (активний)	100-500	50-200	0.5-2	Indoor високошвидкісний
6G Ambient backscatter	0.01-0.1	0.001-0.01	15-20	Пасивні RFID
6G Energy harvesting	0.1-1	0.01-0.1	10-15	Бездротові сенсори
6G AI-оптимізований	1-10	0.1-1	8-12	Розумний дім
6G RIS-асистований	5-50	0.5-5	5-10	Міський IoT

Джерело: складено на основі [5, 12, 14]

Технологія 6G забезпечує 100-1000 кратне зниження енергоспоживання для пасивних IoT-пристроїв через впровадження ambient backscatter (0.001-0.01 нДж/біт) та energy harvesting (0.01-0.1 нДж/біт) порівняно з активними 5G eMBB (100-500 нДж/біт). AI-оптимізація режимів роботи дозволяє досягти автономності 8-12 років при енергоспоживанні 0.1-1 нДж/біт. RIS-асистовані системи забезпечують компроміс між енергоефективністю та пропускну здатністю для міського IoT.

Енергія передачі $E_{tx} = P_{tx} \cdot t_{tx}$, де P_{tx} - потужність передавача, t_{tx} - час передачі. Для 5G eMBB при $P_{tx}=200-1000$ мВт та швидкості передачі 100

Мбіт/с отримуємо 100-500 нДж/біт. Технологія 6G ambient backscatter досягає радикального зниження до 0.001-0.01 нДж/біт через пасивне відбиття модульованих сигналів від навколишніх RF-джерел без активної генерації несучої. Принцип роботи: IoT-пристрій модулює імпеданс антени (Z_{mod}) з частотою даних f_d , що створює бокові смуги $\pm f_d$ від несучої частоти f_c зовнішнього джерела. Енергоспоживання визначається лише перемиканням імпедансу $E_{sw} \approx C \cdot V^2 / 2$, де $C \sim 0.1$ пФ, $V \sim 1$ В, що дає $E_{sw} \sim 0.05$ пДж/біт при 10 Мбіт/с. Energy harvesting використовує ректенни для конверсії RF-енергії від базових станцій у DC: $\eta_{RF-DC} = P_{DC} / P_{RF} \sim 40-60\%$ при $P_{RF} > -10$ дБм. При щільності потужності 1 мВт/см² та площі ректенни 10 см² отримуємо $P_{harvested} \sim 4-6$ мВт, достатньо для живлення низькошвидкісних сенсорів (1-10 кбіт/с). AI-оптимізація енергоспоживання використовує reinforcement learning для динамічного вибору режиму роботи: Deep Sleep (μ A), Light Sleep (mA), Active RX (10-50 mA), Active TX (100-500 mA) на основі прогнозування потреб у передачі даних, що знижує середнє споживання на 40-60%.

Інтеграція AI в інфраструктуру мережі 6G відбувається на трьох рівнях: 1) RAN Intelligence — оптимізація радіоресурсів; 2) Edge AI — локальні перетворення компонентів IoT; 3) Core Network AI — глобальна координація. Ключові технології включають Deep Reinforcement Learning, LSTM/GRU для часових рядів, CNN для просторової обробки.

Інтеграція штучного інтелекту у мережеву інфраструктуру 6G є ключовим фактором для забезпечення самооптимізації, предиктивного управління ресур-сами та адаптації до динамічних умов IoT-трафіку. Таблиця 5 систематизує AI-функції та їх технічний вплив.

Таблиця 5

AI-функції в мережевій інфраструктурі 6G для IoT

AI-функція	Технологія ML	Покращення метрики	Складність (GFLOPS)	Затримка (мс)
Розподіл ресурсів	Deep RL	Пропускна здатність +35%	10-50	<1
Передбачення навантаження	LSTM/GRU	Ефективність енергії +40%	5-20	<5
Beamforming оптимізація	CNN	SINR +15 дБ	50-200	<0.5
Детекція аномалій	Autoencoder	Виявлення атак 99.5%	2-10	<10
Керування handover	DQN	Втрати пакетів - 60%	5-15	<2

AI-функція	Технологія ML	Покращення метрики	Складність (GFLOPS)	Затримка (мс)
Адаптація модуляції	Random Forest	BER зниження $\times 10$	1-5	<1
Федеративне навчання	FedAvg	Конфіденційність даних	100-500	N/A

Джерело: складено на основі [6, 11, 15]

AI-оптимізація мережевих функцій забезпечує 35% приріст пропускної здатності через інтелектуальний розподіл ресурсів на базі Deep RL та 40% покращення енергоефективності через LSTM-прогнозування навантаження. Критичним є досягнення затримки <1 мс для real-time AI-функцій (розподіл ресурсів, адаптація модуляції), що вимагає edge AI-прискорювачів потужністю 50-200 GFLOPS. Федеративне навчання дозволяє тренувати моделі без централізації даних IoT, зберігаючи конфіденційність.

Deep RL для розподілу ресурсів використовує DQN (Deep Q-Network) з state space $S = \{\text{channel_quality}, \text{buffer_occupancy}, \text{latency_requirements}\}$, action space $A = \{\text{resource_blocks}, \text{MCS}, \text{power_level}\}$, reward $R = \text{throughput} - \alpha \cdot \text{latency} - \beta \cdot \text{power}$. Навчання виконується в симульованому середовищі з $>10^6$ епізодів, досягаючи 35% приросту пропускної здатності через оптимальне matching між пристроями та ресурсами. LSTM-прогнозування навантаження використовує багат шарову архітектуру: input layer (64 neurons), LSTM layers (128, 64 neurons), dense output layer для передбачення трафіку на горизонті 1-10 хвилин з accuracy >90%, що дозволяє проактивно включати/вимикати базові станції для економії 40% енергії. CNN-beamforming оптимізує ваги антенної решітки $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]$ через згорткові шари, що обробляють 2D матриці channel state information $H \in \mathbb{C}^{(N \times K)}$, де N - антени, K - користувачі. Output layer генерує оптимальні ваги, що максимізують $\text{SINR} = |w^H h|^2 / (\sigma^2 + \sum \text{interference})$, досягаючи покращення на 15 дБ порівняно з класичним ZF/MRC. Обчислювальна складність 50-200 GFLOPS вимагає спеціалізованих AI-прискорювачів (TPU, NPU) на edge серверах. Федеративне навчання дозволяє тренувати глобальну модель θ_{global} без централізації даних: кожен edge сервер локально оптимізує θ_{local} на своїх даних, потім надсилає лише градієнти $\Delta\theta$ до central aggregator, який виконує FedAvg: $\theta_{\text{global}} \leftarrow \theta_{\text{global}} + \eta \cdot \sum (w_i \cdot \Delta\theta_i)$, де w_i - ваги на основі розміру локального dataset.

Висновки. Технічний аналіз виявив критичні обмеження 5G для IoT: міліметрові хвилі (24-100 ГГц) обмежують дальність до 100-500 м через загасання 5-20 дБ/км та низьку проникність крізь перешкоди; масивні MIMO (64-256 антен) підтримують лише 10^4 - 10^5 пристроїв/км² при точності beamforming $\pm 5^\circ$; практична затримка критичних сервісів становить 5-10 мс

через $TTI=1$ мс та overhead core network; енергоспоживання 100-500 нДж/біт для активних трансиверів обмежує автономність до 1-3 років; мережна сегментація забезпечує надійність лише 99.999% з щільністю до 10^5 пристроїв/км². Технологія 6G станом на 2030 рік подолає ці обмеження через: терагерцові діапазони (0.1-10 ТГц) з пропускнуою здатністю до 1 Тбіт/с при збільшенні загасання до 10-100 дБ/км, що потребує щільного розгортання базових станцій (10-100 м); ультрамасивні MIMO (1024-4096 антен) для підтримки 10^6 - 10^7 пристроїв/км² з точністю beamforming $\pm 0.5^\circ$ та зниженням інтерференції на 20-30 дБ; зменшення TTI до 0.01 мс та edge computing для досягнення затримки < 0.1 мс при надійності 99.99999%; ambient backscatter (0.001-0.01 нДж/біт) та energy harvesting (0.01-0.1 нДж/біт) для автономності 10-20 років пасивних IoT-пристроїв; AI-оптимізацію мережесих функцій (Deep RL, LSTM, CNN) з обчислювальною складністю 10-200 GFLOPS для 35-40% покращення метрик пропускнуої здатності та енергоефективності. Критичними викликами залишаються: необхідність спеціалізованих AI-прискорювачів (TPU/NPU) на edge-серверах, розробка ефективних протоколів множинного доступу (NOMA) для 10^7 пристроїв/км², створення високоефективних ректенн ($\eta > 60\%$) для energy harvesting, стандартизація терагерцового діапазону 0.1-10 ТГц через міжнародні регуляторні органи.

Література:

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/icwcsng53609.2021.00070> 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. Adil M. 5G/6G-enabled metaverse technologies: Taxonomy, applications, and open security challenges with future research directions / M. Adil, H. Song, M. K. Khan, A. Farouk, Z. Jin // Journal of Network and Computer Applications. – 2024. – Vol. 223. – P. 103828. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103828> URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1084804524000055?via%3Dihub>
5. 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>

6. Yan Y. Meta learning-based few-shot intrusion detection for 5G-enabled industrial internet / Y. Yan, Y. Yang, F. Shen, M. Gao, Y. Gu // *Complex & Intelligent Systems*. – 2024. – Vol. 10, No. 3. – P. 4589–4608. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-024-01388-1> URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40747-024-01388-1>

7. Latreche S. Some Applications envisaged for the new generation of communications networks 6G / S. Latreche, H. Bellahsene, A. Taleb-Ahmed // *arXiv preprint arXiv:2501.14117*. – 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2501.14117> URL: <https://arxiv.org/abs/2501.14117v1>

8. 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>

9. Bhatia S. The Future IoT: The Current Generation 5G and Next Generation 6G and 7G Technologies / S. Bhatia, B. Mallikarjuna, D. Gautam, U. Gupta, S. Kumar, S. Verma // *2023 International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies (DICCT)*. – 2023. – P. 212–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/dicct56244.2023.10110066> URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10110066>

10. 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>

11. 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>

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

13. 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/hqvyny02> URL: <https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/18304>

14. Andrade A. IoT-based vital sign monitoring: A literature review / A. Andrade, A. T. Cabral, B. Bellini, V. Facco Rodrigues, R. da Rosa Righi, C. André da Costa, J. L. V. Barbosa // *Smart Health*. – 2024. – Vol. 32. – P. 100462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2024.100462> URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352648324000187?via%3Dihub>

15. Malik M. Towards 6G: Network Evolution beyond 5G; Indian Scenario / M. Malik, S. K. Garg // *2022 2nd International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM)*. – 2022. – P. 656–661. DOI: <https://doi.org/10.1109/iciptm54933.2022.9753847> URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9753847>

References:

1. Shen, F., Shi, H., & Yang, Y. (2021, August). A comprehensive study of 5G and 6G networks. 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG). 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG). <https://doi.org/10.1109/icwcs53609.2021.00070> Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9616582> [in English].
2. Alwis, C. D., Kalla, A., Pham, Q.-V., Kumar, P., Dev, K., Hwang, W.-J., & Liyanage, M. (2021). Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2, 836–886. <https://doi.org/10.1109/ojcoms.2021.3071496> Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9397776> [in English].
3. Nakamura, T. (2021). 5G evolution and 6G. *Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing and Networking*, 2–2. <https://doi.org/10.1145/3427796.3432714> Retrieved from <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3427796.3432714> [in English].
4. Adil, M., Song, H., Khan, M. K., Farouk, A., & Jin, Z. (2024). 5G/6G-enabled metaverse technologies: Taxonomy, applications, and open security challenges with future research directions. *Journal of Network and Computer Applications*, 223, 103828. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103828> Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1084804524000055?via%3Dihub> [in English].
5. Vaezi, M., Azari, A., Khosravirad, S. R., Shirvanimoghaddam, M., Azari, M. M., Chasaki, D., & Popovski, P. (2022). Cellular, Wide-Area, and Non-Terrestrial IoT: A Survey on 5G Advances and the Road Toward 6G. *IEEE Communications Surveys; Tutorials*, 24(2), 1117–1174. <https://doi.org/10.1109/comst.2022.3151028> Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9711564> [in English].
6. Yan, Y., Yang, Y., Shen, F., Gao, M., & Gu, Y. (2024). Meta learning-based few-shot intrusion detection for 5G-enabled industrial internet. *Complex; Intelligent Systems*, 10(3), 4589–4608. <https://doi.org/10.1007/s40747-024-01388-1> Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s40747-024-01388-1> [in English].
7. Latreche, S., Bellahsene, H., & Taleb-Ahmed, A. (2025). Some Applications envisaged for the new generation of communications networks 6G. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2501.14117> Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2501.14117v1> [in English].
8. Ji, B., Han, Y., Liu, S., Tao, F., Zhang, G., Fu, Z., & Li, C. (2021). Several Key Technologies for 6G: Challenges and Opportunities. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(2), 44–51. <https://doi.org/10.1109/mcomstd.001.2000038> Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9464918> [in English].
9. Bhatia, S., Mallikarjuna, B., Gautam, D., Gupta, U., Kumar, S., & Verma, S. (2023). The Future IoT: The Current Generation 5G and Next Generation 6G and 7G Technologies. 2023 International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies, (DICCT), 212–217. <https://doi.org/10.1109/dicct56244.2023.10110066> Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/10110066> [in English].
10. Al-Bahri, M., Alkishri, W., & Y. H. Ahmed, F. (2024). From 5G to 6G: Evolution and Enabling Technologies in Shaping the Future of IoT Applications. 5TH International Conference on Communication Engineering and Computer Science (CIC-COCOS'24), 136–141. <https://doi.org/10.24086/cocos2024/paper.1166> Retrieved from <https://conferences.cihanuniversity.edu.iq/index.php/COCOS/COCOS24/paper/view/1166/487> [in English].
11. Ferrag, M. A., Friha, O., Kantarci, B., Tihanyi, N., Cordeiro, L., Debbah, M., Hamouda, D., Al-Hawawreh, M., & Choo, K.-K. R. (2023). Edge Learning for 6G-enabled Internet of Things:

A Comprehensive Survey of Vulnerabilities, Datasets, and Defenses (Version 2). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2306.10309> Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2306.10309> [in English].

12. Ullah, A., Fawad, Nadeem, A., Arif, M., Bashir, M. M., & Choi, W. (2025). 6G Internet-of-Things assisted smart homes and buildings: Enabling technologies, opportunities and challenges. *Internet of Things*, 32, 101658. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101658> Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2542660525001726> [in English].

13. Hu, C. (2024). Application research of 5G/6G cellular network in intelligent Transportation Internet of Things. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 85, 68–76. <https://doi.org/10.54097/hqvyny02> Retrieved from <https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/18304> [in English].

14. Andrade, A., Cabral, A. T., Bellini, B., Facco Rodrigues, V., da Rosa Righi, R., André da Costa, C., & Barbosa, J. L. V. (2024). IoT-based vital sign monitoring: A literature review. *Smart Health*, 32, 100462. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2024.100462> Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352648324000187?via%3Dihub> [in English].

15. Malik, M., & Garg, S. K. (2022, February 23). Towards 6G: Network Evolution beyond 5G; Indian Scenario. 2022 2nd International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM). 2022 2nd International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM). <https://doi.org/10.1109/iciptm54933.2022.9753847> Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9753847> [in English].