

**ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ Микола**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>e-mail: [mvasylkivskyi@gmail.com](mailto:mvasylkivskyi@gmail.com)**КОЛОМІЄЦЬ Альона**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7665-6247>e-mail: [alona.kolomiets.vnt@gmail.com](mailto:alona.kolomiets.vnt@gmail.com)**ГРАБЧАК Назарій**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [nazarii.hrabchak@gmail.com](mailto:nazarii.hrabchak@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 6G

В роботі наведено результати досліджень технології 6G, яка дозволить інтегрувати всі типи доступу в одному мобільному телефоні, забезпечуючи плавне перемикання між послугами. Розглянуто нові варіанти використання мобільних мереж, такі як зондування та штучний інтелект, що формують нові показники якості інформаційної послуги – роздільну здатність зондування та ймовірність виведення. Для нових застосувань розглянуто перспективи подальших досліджень пов'язаних з ними показників, наприклад, гнучкості та масштабованості для підтримки власних сервісів штучного інтелекту та рівня надійності мережі. Розглянуто перспективи розвитку електронної охорони здоров'я на основі систем мобільного зв'язку з підвищеними вимогами щодо надійності, доступності, безпеки та конфіденційності. Досліджено платформу для переміщення з повітряною мобільністю різних датчиків і камер високої роздільної здатності для різних галузей промисловості на основі безпілотних літальних апаратів. Розглянуто фундаментальні енергетичні обмеження обчислень, пов'язаних з обробкою інформації, які є важливим кроком на шляху успішного розгортання бездротових мереж 6G. Тому при проектуванні архітектури інфокомунікаційної системи 6G необхідно в повній мірі враховувати вплив моделей, алгоритмів та обладнання штучного інтелекту на енергоспоживання, щоб забезпечити економічну вигоду клієнтам з відповідними операційними витратами системи.

Ключові слова: інфокомунікаційна система, технологія 6G, штучний інтелект, безпілотний літальний апарат, ключовий показник ефективності, безпроводна мережа.

VASYLKIVSKYI Mykola, KOLOMIETS Alyona, HRABCHAK Nazarii  
Vinnytsia National Technical University

## RESEARCH OF FUNCTIONAL PARAMETERS OF INFOCOMMUNICATION NETWORKS 6G

The work presents the results of research into 6G technology, which will allow integrating all types of access in one mobile phone, ensuring smooth switching between services. New options for the use of mobile networks, such as sensing and artificial intelligence, are considered, which form new indicators of the quality of the information service - the resolution of sensing and the probability of output. For new applications, the prospects for further research into related indicators, such as flexibility and scalability to support own artificial intelligence services and network reliability level, are considered. Prospects for the development of electronic health care based on mobile communication systems with increased requirements for reliability, availability, security and confidentiality are considered. A platform for aerial mobility of various high-resolution sensors and cameras for various industries based on unmanned aerial vehicles has been investigated. The fundamental energy limitations of calculations related to information processing, which are an important step on the way to the successful deployment of 6G wireless networks, are considered.

In the design of next-generation wireless communication networks, it has been determined that traditional AI optimization algorithms (such as federated learning) usually consider the bandwidth or delay of wireless connections as a weight for distributed multiprocessor data exchange, without considering the power energy bounds between different devices in different regions. This ambiguous consideration of AI energy limitations or power costs may lead to a large divergence between the design of a wireless network and the actual deployment of AI in the future. For this reason, equal importance must be attached to green AI and green communications. Therefore, when designing the architecture of the 6G information communication system, it is necessary to fully consider the impact of artificial intelligence models, algorithms and equipment on energy consumption to provide economic benefits to customers with corresponding operating costs of the system.

The peculiarities of providing users with access to Internet services at any time through the same device regardless of their location, which is one of the ultimate goals of creating effective wireless networks, are discussed. The proposed concept of green AI called Oncefor-All (once and forever), according to which it is proposed to train an information communication network with further specialization during deployment will allow for efficient logical implementation on many devices, taking into account the given resource constraints. At the same time, terrestrial and non-terrestrial 6G networks will be fully integrated at the system level, ensuring the convergence of services, radio interfaces, networks and user devices. By organically combining these two access environments into one converged multi-layer heterogeneous network covering the entire globe, 6G technology will provide users with the same service. Ensuring the global delivery of mobile services will be an important aspect of the development of the 6G network.

Keywords: information communication system, 6G technology, artificial intelligence, unmanned aerial vehicle, key performance indicator, wireless network.

### Постановка проблеми

Технологія 6G відкріє безліч нових можливостей для бездротових технологій. Однак з погляду всіх можливих застосувань технології 6G варіанти використання мережі 6G є просто окремими прикладами того, що чекає на нас у майбутньому.

Чисельний аналіз вимог до продуктивності у цих типових випадках використання призводить до формування цільових ключових показників ефективності. Наприклад, найвищі вимоги до швидкості передачі пред'являє тривимірний голографічний зв'язок. Що стосується затримки передачі, то найвищі вимоги пред'являють дистанційна робота у високодинамічних середовищах та промислове керування рухом транспортних засобів. Надзвичайно жорсткі вимоги до джитера та надійності висувають сценарії використання детермінованого зв'язку. У майбутніх розумних містах та розумному житті варіанти використання IoT визначають вимоги до щільності підключення та часу автономної роботи сенсорів. Нові варіанти використання мобільних мереж, такі як зондування та штучний інтелект формують нові показники якості інформаційної послуги – роздільна здатність зондування та ймовірність виведення. Для деяких нових застосувань можуть знадобитися подальші дослідження пов'язаних з ними показників, наприклад, гнучкості та масштабованості для підтримки власних сервісів штучного інтелекту та рівня надійності мережі [1].

Бездротові мережі швидко розвиваються за сценарієм, згідно з яким інфраструктура зв'язку зливатиметься з навколишнім середовищем. Якщо мережі 5G розвиваються у напрямку цільного розгортання базових станцій та антенних решіток, то технологія 6G перейде на наступний рівень, оснастивши об'єкти в галузі зв'язку, такі як будівлі, стіни, автомобілі та дорожні знаки, інтелектуальними поверхнями, здатними підсилювати електромагнітні сигнали, виконувати обчислення та зберігати дані.

У зв'язку з експоненційним збільшенням кількості підключених пристроїв, що потребують високопродуктивних послуг, комунікаційне середовище буде перетворено на інтелектуальну бездротову мережу, що характеризується безпрецедентним рівнем щільності, стохастичності та неоднорідності, а також дуже великими розмірами. У такому складному сценарії традиційні мережеві архітектури втратять працездатність, і тому буде потрібна зміна парадигми. Тому, необхідно розглядати основи комунікацій в інтелектуальній бездротовій мережі 6G, встановивши базис для обчислення теоретичних меж продуктивності, а також розроблення прикладних алгоритмів для наближення до цих меж.

Доцільно виходити з припущення, що мережева інфраструктура складається з кількох розподілених сегментів, кожен з яких наділений можливостями штучного інтелекту та діє як підсистема, що здатна приймати незалежні рішення. Це бачення може бути реалізовано за допомогою взаємодії теоретичних інструментів з множини дисциплін, що беруть початок у фундаментальній математиці та фізиці. Однак важливо відзначити, що для ефективного створення єдиної структури мережі необхідно усунути деякі прогалини у знаннях енергетичних показників.

#### Аналіз останніх джерел

Проектування бездротових мереж на основі показників енергоефективності є надзвичайно складним завданням, оскільки традиційні схеми розподілу потужності призводять до безперервної передачі з використанням максимальної доступної потужності. Однак останнім часом ця думка почала змінюватися, оскільки ключовим показником ефективності для мереж 5G стала енергоефективність у бітах на джоуль, яка визначається як кількість інформації, яка може бути надійно передана на один джоуль споживаної енергії [1]. В роботі [2] обговорюються систематичні підходи до вирішення завдань максимізації енергоефективності. Відповідно до цих підходів структура з [3] використовується в [4] та [5] для розробки енергоефективних алгоритмів керування потужністю для масивних систем ММО, а в [6] – для енергоефективних мереж з малими стільниками. Проте всі доступні дослідження розглядають два основні шляхи витрати енергії, а саме:

- енергія передачі: енергія, що виділяється кожною передавальною антеною;
- статична енергія: енергія, що споживається всіма апаратними блоками в кожному передавачі та приймачі (наприклад, аналого-цифровим перетворювачем, цифро-аналоговим перетворювачем, аналоговою фільтрацією, резервним акумулятором та системою охолодження).

Фактично аналіз енергоспоживання, необхідного для виконання обчислень при обробці інформації в цифровій області (наприклад, для обчислень при попередньому цифровому кодуванні та цифровому прийманні), погано вивчений. У цьому контексті доступні лише деякі результати, в яких використовуються принципи фундаментальної фізики/термодинаміки, щоб спочатку зрозуміти: чи дійсно цифрові обчислення повинні споживати енергію. Отже, жоден фізичний принцип не наказує споживати енергію для виконання обчислень у цифровій галузі. Справді, якщо обчислення, що виконується, не знищує жодну інформацію, то це оборотне перетворення, яке, згідно з другим законом термодинаміки, не збільшує ентропію. В результаті оборотні обчислення теоретично можуть виконуватися без витрат енергії [7]. Моделі машин, які реалізують цю оборотну логіку [8] працюють, зберігаючи як вихідні, так і вхідні дані кожного обчислення без стирання будь-яких бітів з пам'яті комп'ютера. Таким чином, завжди можна повернути обчислювальну машину у вихідний стан. Тоді виникає інше питання: чому сучасні комп'ютери ґрунтуються на булевій логіці, яка, як правило, необоротна.

Перше практичне міркування полягає в тому, що навіть якщо були запропоновані моделі оборотних логічних машин, вони мають суто теоретичний характер. Насправді обробка даних виконується макроскопічними пристроями, які розсіюють макроскопічні кількості енергії. Друге міркування більш фундаментальне - навіть якби ми могли побудувати оборотну логічну обчислювальну машину, у неї були б нездійсненні вимоги до пам'яті, тому що при цьому потрібно було б зберігати абсолютно всі вихідні та вхідні дані кожної операції без видалення будь-яких бітів з пам'яті. Однак оскільки обсяг даних, які можуть бути збережені в комп'ютері, обмежений обсягом банку пам'яті [9], навіть оборотні логічні машини зрештою

повинні будуть перезаписувати деякі осередки пам'яті, таким чином споживаючи енергію.

Аналогічна ситуація виникає при виявленні чи виправленні помилок при передачі даних по каналу зв'язку. Виявлення помилок теоретично не спричиняє розсіювання енергії, та її виправлення призводить до втрати інформації (в довкілля), генеруючи ентропію. Це призводить до нереалістичної ситуації, коли, щоб уникнути генерації ентропії, система зв'язку повинна також зберігати отримані повідомлення, що містять помилки. У результаті ми приходимо до того, що необхідно враховувати незворотні операції, але дуже мало відомо про їх фундаментальні обмеження щодо розсіювання енергії в системах зв'язку.

**Метою роботи** є дослідження особливостей впровадження сегментів інфокомунікаційних мереж на основі технологій 6G з використанням штучного інтелекту для підвищення ефективності роботи апаратно-програмного телекомунікаційного обладнання.

### Виклад основного матеріалу

Сьогодні приблизно 3,7 млрд. людей все ще не мають навіть базового доступу до інтернету [1]. Більшість із них проживають у сільських та віддалених районах, де наземні та неназемні мережі могли б працювати разом для надання широкопasmового доступу, як показано на рис. 1. Для організації широкопasmового доступу на морі застосовуватиметься інтеграція широкопasmових супутників, корабельних та наземних станцій.

Крім використання фіксованої та рухомої ретрансляції, привабливою перспективою виглядає пряме з'єднання між неназемними станціями та мобільними телефонами. Протягом багатьох років таке з'єднання було надзвичайно дорогим та забезпечувало низьку швидкість передачі даних. Крім того, абонентам доводилося використовувати два різні телефони: один для доступу до супутникової мережі, а інший – для доступу до стаціонарної мережі. У майбутньому технологія 6G дозволить інтегрувати всі типи доступу в одному мобільному телефоні, забезпечуючи плавне перемикання між послугами.

Для забезпечення стабільного та високоякісного обслуговування в сільській місцевості інтегрована мережа 6G повинна забезпечувати високу швидкість передачі даних, аналогічну тій, що пропонується через базові станції 5G, зокрема 50 Мбіт/с у низхідному каналі (завантаження) та 25 Мбіт/с у висхідному каналі (вивантаження) у перерахунку на одного користувача [2].

Надання користувачам доступу до інтернет-послуг у будь-який час через один і той же пристрій незалежно від їхнього місцезнаходження є однією з кінцевих цілей створення ефективних бездротових мереж. Сьогодні транспортні засоби можна розділити на чотири основні типи: автомобілі, поїзди, літаки та кораблі (рис. 2). Якщо взяти за приклад літак, то в 2019 році цим типом транспорту скористалися понад 4 млрд осіб [3]. Більшість із них не мали доступу до інтернету під час польотів; для тих, у кого він був, передача даних була повільною і дорогою. У майбутньому інтегровані системи 6G зможуть забезпечити мобільне широкопasmове підключення всім пасажиром літаків. При цьому, швидкість передачі даних для кожного користувача повинна перевищувати 15 Мбіт/с та 7,5 Мбіт/с для завантаження та вивантаження відповідно [2], за умови 20-відсоткового коефіцієнта активності та 400 користувачів на літак. У цьому випадку загальна швидкість передачі даних для одного літака повинна бути не менше 1,2 Гбіт/с і 600 Мбіт/с для завантаження та вивантаження відповідно.



Рис. 1. Інтегрований сервіс в телекомунікаційній системі муніципального призначення

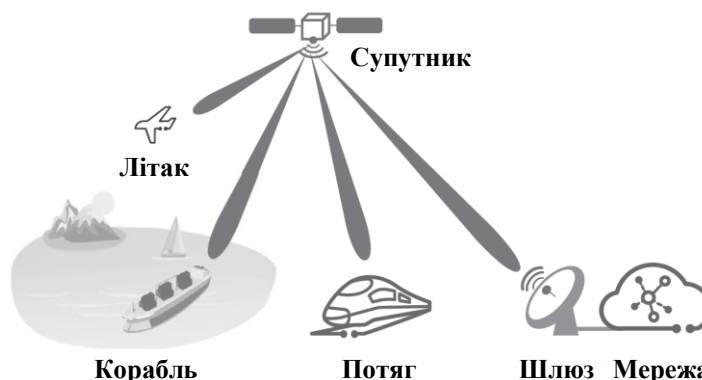


Рис. 2. Широкопasmове з'єднання мобільних користувачів інфокомунікаційної мережі

Надійна та безперебійна система екстреного зв'язку має вирішальне значення у сценаріях реагування на стихійні лиха, оскільки вона забезпечує їх прогнозування, оповіщення, реагування на надзвичайні ситуації та екстрений зв'язок. У деяких випадках стихійне лихо може порушити роботу наземних мереж, однак технологія 6G об'єднує наземні та неназемні мережі для забезпечення безперервного

обслуговування та підтримки керування у надзвичайних ситуаціях. Система зв'язку для керування в надзвичайних ситуаціях використовує декілька технологій, таких як провідна і бездротова передача голосу, передача даних і відеоспостереження. При надзвичайних ситуаціях за допомогою програмного забезпечення можна швидко зв'язатися з командним центром керування та диспетчеризації, відповідними підрозділами, групами експертів та місцевими рятувальними командами.

Всеосяжне та індивідуалізоване надання медичних послуг без будь-яких географічних обмежень є перспективою розвитку електронної охорони здоров'я на наступне десятиліття. Реалізація цього бачення багато в чому залежить від розвитку систем мобільного зв'язку, до яких будуть пред'являти підвищені вимоги щодо надійності, доступності, безпеки та конфіденційності.

У поєднанні із штучним інтелектом аналіз даних, отриманих від пацієнтів у режимі реального часу, може допомогти при прогнозуванні серйозних захворювань. У цьому плані передова інфраструктура з можливостями зондування матиме велике значення при боротьбі з великими пандеміями, такими як COVID-19. Передові відео-, голографічні та тактильні технології забезпечать новий рівень професійної взаємодії та досвіду роботи з ефектом присутності. Можна сміливо припустити, що дистанційна діагностика, дистанційна хірургія та динамічний моніторинг, а також голографічне медичне навчання стануть переважаючими технологіями у майбутньому, як показано на рис. 3. Такі сценарії використання, як дистанційна хірургія, можуть вимагати надмалої затримки та надвисокої надійності зв'язку на міжконтинентальній відстані. Це буде важливим для зниження гостроти проблеми старіння суспільства, особливо в регіонах з обмеженими медичними ресурсами [3].

Зручною платформою для переміщення з повітряною мобільністю різних датчиків і камер високої роздільної здатності, незалежно від галузі промисловості є безпілотні літальні апарати. З цієї причини безпілотні літальні апарати відіграватимуть важливу роль при підвищенні сенсорних можливостей мережі 6G. БПЛА не обов'язково повинні обмежуватися роллю кінцевого пристрою, оскільки вони можуть застосовуватися як ретранслятор або точка доступу для формування тимчасової мережі та розширення зони дії мобільного зв'язку, особливо у виняткових сценаріях (наприклад, при аваріях у горах або стихійних лих). Іншими словами, гнучкість та маневреність БПЛА можуть зробити їх гарною альтернативою у критичних ситуаціях за відсутності фіксованої інфраструктури.

БПЛА бувають різних розмірів і вантажопідйомності та можуть використовуватися в різноманітних сферах бізнесу. Наприклад, як показано на рис. 4, у них можуть бути комерційні та промислові застосування, такі як автоматична безпілотна інспекція, екстрене реагування для

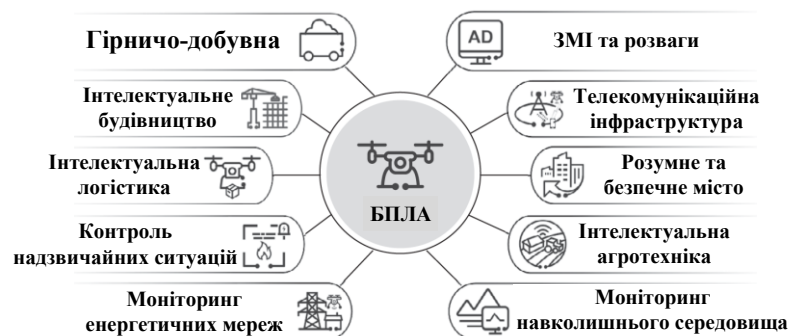


Рис. 4. Особливості застосування БПЛА

розумного та безпечного міста, моніторинг навколишнього середовища та інтелектуальна логістика.

БПЛА є діючим варіантом використання сервісів 5G, і вони будуть розвиватися в напрямку технології 6G з точки зору більш високих вимог ключових показників ефективності, включаючи надвисоку швидкість передачі даних (наприклад, відеопотік з оглядом 360 ° та пропускну здатністю більше 10 Гбіт/с), надвисоку надійність та наднизьку затримку (для плавного керування або повністю автономного польоту). БПЛА потребують високоточного позиціонування, і показовий приклад полягає в тому, що для прямої відеотрансляції 8K, лазерного картографування/патрулювання та серійних фотознімків може знадобитися визначення місця розташування з точністю до одного сантиметра. Крім вимог ключових показників ефективності для БПЛА буде обов'язковою надійність промислового рівня. Вона користується попитом у сценаріях, де, наприклад, БПЛА стають джерелом приватних даних. У цьому контексті розробки нових систем мобільного зв'язку також враховуватимуть можливість забезпечення суверенітету даних.

Однак, обмежена ємність акумулятора не дозволяє безпілотним літальним апаратам працювати протягом тривалих періодів часу. Отже, «зелений зв'язок» безперечно стане в нагоді для організації енергозберігаючого зв'язку з БПЛА.

Тому, до енергоефективності мереж 6G будуть пред'являтися дуже суворі вимоги. Отже, надзвичайно важливо вивчити вартість обчислень у нейромережах з погляду енергоспоживання. Крім того, необхідно вивчити енергетичний аспект у зв'язку з вимогами до затримки обробки для технологій 6G, які



Рис. 3. Особливості застосування розумної охорони здоров'я

розумного та безпечного міста, моніторинг навколишнього середовища та інтелектуальна логістика.

БПЛА є діючим варіантом використання сервісів 5G, і вони будуть розвиватися в напрямку технології 6G з точки зору більш високих вимог ключових показників ефективності, включаючи надвисоку швидкість передачі даних (наприклад, відеопотік з оглядом 360 ° та пропускну здатністю більше 10

також дуже суворі та потребують швидких (та енергоємних) обчислень. Розуміння фундаментальних енергетичних обмежень обчислень, пов'язаних з обробкою інформації, є важливим кроком на шляху успішного розгортання бездротових мереж 6G. Як було сказано раніше, якщо передбачається нескінченний простір пам'яті, теоретично для виконання оборотних обчислень не потрібна енергія. Однак визначено, що фізично неможливо побудувати мережу, яка базується лише на оборотних операціях. Отже, з інженерної точки зору важливо розуміти, якої мінімальної межі ми можемо досягти, виконуючи незворотні операції.

Оскільки сучасні комп'ютери засновані на незворотній (бульовій) логіці, необхідно заповнити теоретичну прогалину між оборотними та незворотними обчисленнями, щоб зрозуміти фундаментальні енергетичні обмеження обробки інформації. Ці дослідження виглядають проблематичними через те, що бездротові мережі стають все складнішими, і в майбутньому стануть набагато складнішими, ніж усі попередні та нинішні мережі зв'язку, що потребує розробки спеціальних теоретичних моделей для оцінки обсягу інформації, яка має бути оброблена для підтримки бажаної функціональності мережі [4]. Крім дослідження енергії, необхідної для обробки інформації, також важливо зрозуміти, як фундаментальні обмеження енергії обробки інформації пов'язані з фундаментальними обмеженнями продуктивності зв'язку. Наприклад, який оптимальний компроміс між продуктивністю зв'язку та споживанням енергії в мережі? Це питання досліджувалося лише щодо енергії, що використовується для зв'язку, тоді як майже нічого невідомо про енергію, яка використовується для обчислень, пов'язаних з обробкою інформації. Крім того, у всіх попередніх дослідженнях розглядалися традиційні мережеві архітектури та топології, без урахування впливу використання глибокого навчання та нейромереж [5].

Термодинаміка при поєднанні до комунікацій та теорії обчислень здатна допомогти у розробці нових алгоритмів для енергоефективних мереж 6G.

У майбутньому штучний інтелект (ШІ) зазнає неймовірної еволюції і проникне у всі верстви суспільства. Під час цього процесу ШІ та зв'язок зближуватимуться, при цьому або мережа зв'язку обслуговуватиме та забезпечуватиме конвеєри даних для додатків ШІ, або ШІ підвищить ефективність передачі даних у мережі зв'язку. Проте споживання електроенергії та викиди вуглецю внаслідок використання штучним інтелектом великих обчислювальних ресурсів є дуже неприємним чинником як з погляду захисту довкілля, так і з погляду економічних чинників. З цієї причини зелений ШІ привертає дедалі більшу увагу у науковому та інженерному співтовариствах [5, 6], а перехід від чорного ШІ до зеленого суттєво вплине на принципи проектування мереж бездротового зв'язку наступного покоління.

Червоний ШІ використовує модель, яка навчається за допомогою навчального набору даних та оцінюється за допомогою тестового набору даних. Щоб розробити червону модель ШІ, нам зазвичай потрібно використовувати набір навчальних даних для ітеративного коригування гіперпараметрів. Відповідно, зелений ШІ відноситься до рішення, в якому моделі, алгоритми та обладнання дають нові результати без збільшення обчислювальних витрат та фактично знижують їх в ідеальних сценаріях [5].

Як правило, собівартість обчислень моделі ШІ пропорційна добутку трьох ключових факторів: вартості виконання моделі на одній вибірці, розміру навчального набору даних та кількості експериментів з гіперпараметрами. Кількість операцій з плаваючою комою, внаслідок використання різних алгоритмів для реалізації однієї і тієї ж функції ШІ, зменшилась у 44 рази з 2012 по 2019 рік, що еквівалентно подвоєнню ефективності алгоритму кожні 16 місяців протягом семи років [7]. Тим часом через швидке розширення наборів навчальних даних та гіперпараметрів і, зокрема, через надмірне прагнення до підвищення точності навчання на основі величезних обчислювальних ресурсів споживання електроенергії ШІ збільшилося в  $3 \cdot 10^5$  разів з 2012 по 2018 рік, що еквівалентно подвоєнню 3,4 місяці [8]. Оцінювання споживання енергії штучним інтелектом ( $p_t$ ) та викидів  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_{2e}$ ) можна здійснити за виразами (1) та (2) [6]:

$$p_t = \frac{PUE \times t \times (p_c + p_r + gp_g)}{1000} \quad (\text{кВт*г}), \quad (1)$$

$$\text{CO}_{2e} = CUP \times p_t \quad (\text{кг}), \quad (2)$$

де  $t$  – очікуваний загальний час, витрачений на навчання моделі;

$p_c$ ,  $p_r$  та  $p_g$  являють собою середнє енергоспоживання (у ватах) від усіх сокетів ЦП, від усіх сокетів DRAM (основної пам'яті) та кожного графічного процесора відповідно під час навчання;

$g$  – кількість графічних процесорів, що використовуються для прискорення навчання.

$PUE$  – це скорочення від power usage effectiveness, що означає ефективність використання енергії з урахуванням додаткової енергії, необхідної для підтримки обчислювальної інфраструктури (насамперед охолодження). Середній світовий показник  $PUE$  центрів обробки даних становить 1,58 [9].  $CUP$  – це скорочення від carbon dioxide per unit power (кількість вуглекислого газу на одиницю потужності), яке залежить від рівня розвитку місцевої енергетики.

Агентство з охорони навколишнього природного середовища США надало середній коефіцієнт виробництва  $\text{CO}_2$  0,433 кг/кВт\*г [10].

На прикладі моделі NLP (обробка природної мови) показано, що споживання енергії та викиди вуглецю, що відповідають різним моделям ШІ та апаратного забезпечення, не можна ігнорувати з економічної точки зору. Зокрема, будь-які моделі, чутливі до наборів даних та гіперпараметрів, будуть дуже дорогими, оскільки вони можуть потребувати перенавчання щоразу, коли виникає нова ситуація [5].

В останні роки з'явилася величезна кількість наукових статей з ШІ в різних сферах застосування,

включаючи ШІ, що використовується в мережах бездротового зв'язку. Однак мало уваги приділяється проблемам енергоспоживання і викидів вуглецю, що зумовлені величезним обсягом прямих неоптимізованих обчислень під час впровадження ШІ. Особливостями перспективного дослідження цих проблем є: (1) повідомляти про час навчання та чутливість до гіперпараметрів у публікаціях з ШІ; (2) надавати рівноправний доступ до обчислювальних ресурсів під час реалізації ШІ та (3) приділяти пріоритетну увагу обчислювальній ефективності апаратного забезпечення та алгоритмів штучного інтелекту.

Для оцінювання енергоефективності інформаційної системи або мережі необхідно повідомляти обсяг роботи для отримання результату (для навчання моделі та налаштування гіперпараметрів) у додатках ШІ [5]. При складанні звіту про обсяг роботи, виконаної додатком ШІ, необхідно виміряти певні показники, щоб забезпечити справедливе порівняння між різними моделями. Йдеться про такі показники:

- викиди вуглецю: кількість, яку зелений ШІ прагне мінімізувати;
- енергоспоживання: пов'язане з викидами вуглецю, але не залежить від часу та місця;
- витрачений реальний час: загальний час роботи для створення результату ШІ, який є природним показником ефективності;
- кількість параметрів: кількість параметрів (навчальних чи загальних), що використовуються моделлю ШІ, яка є ще одним поширеним показником ефективності;
- операції з плаваючою комою: конкретна міра ефективності у процесі генерації результату ШІ.

Запропонована концепція зеленого ШІ під назвою Oncefor-All (раз і назавжди), згідно з якою пропонується навчати інфокомунікаційну мережу з подальшою спеціалізацією при розгортанні дозволить забезпечити ефективне логічне впровадження на багатьох пристроях з врахуванням заданих обмежень ресурсів. Традиційні підходи зводяться або до ручного проектування, або до пошуку нейронної архітектури для знаходження спеціалізованої нейронної мережі для подальшого її навчання з нуля для кожного випадку, що неприпустимо з обчислювальної точки зору та генерує велику кількість викидів CO<sub>2</sub>. І навпаки, універсальна мережа підтримує різні архітектурні налаштування за рахунок поділу навчання та пошуку, що дозволяє швидко отримати спеціалізовану підмережу без додаткового навчання.

При проектуванні бездротових комунікаційних мереж наступного покоління, слід зазначити, що традиційні алгоритми оптимізації ШІ (такі як федеративне навчання) зазвичай розглядають пропускну здатність або затримку бездротових з'єднань як вагу для розподіленого мультипроцесорного обміну даними, без урахування граничних значень енергії потужності між різними пристроями у різних регіонах. Цей неоднозначний розгляд обмежень енергії ШІ або витрат на електроенергію може призвести до великого розходження між проектом бездротової мережі та фактичним розгортанням ШІ в майбутньому. З цієї причини необхідно надавати однакоє значення зеленому ШІ та зеленим комунікаціям. Тому, з самого початку проектування архітектури системи слід повною мірою враховувати вплив моделей, алгоритмів та обладнання штучного інтелекту на енергоспоживання, щоб забезпечити економічну вигоду клієнтам з відповідними операційними витратами системи.

### Висновки

В епоху 6G виникне потреба в архітектурі енергоефективних обчислень, які мають враховувати енергетичні обмеження ШІ. Втім, це важливо вже сьогодні, оскільки такі міркування однаково актуальні у нинішніх мережах 4G та 5G.

Від бездротової мережі наступного покоління ми очікуємо глобального покриття поверхні Землі, щоб користувачі та підключені речі могли отримати доступ до інтернету у будь-якому місці та у будь-який час. При впровадженні технології 6G наземні мережі зможуть об'єднуватися з вузлами неназемного доступу, такими як супутники, дрони, висотні платформи (high-altitude platform, HAP) та автомобілі. Це об'єднання сформує глобальну інтегровану мережу зв'язку, яка забезпечить безшовне покриття, що охоплює сушу, море та небо. Крім того, ця інтеграція дозволить користувачам підключатися до мережі 6G незалежно від того, чи йдуть вони пішки, їдуть автомобілем або летять на борту літака, і забезпечить безперебійне обслуговування, навіть якщо якась частина інфраструктури несправна або пошкоджена. При цьому наземні та неназемні мережі 6G будуть повністю інтегровані на системному рівні, забезпечуючи конвергенцію послуг, радіоінтерфейсів, мереж та пристроїв користувача. Органічно поєднуючи ці два середовища доступу в одну конвергентну багаторівневу гетерогенну мережу, що охоплює всю земну кулю, технологія 6G надасть користувачам однакоє обслуговування. Забезпечення глобальної доставки мобільних послуг стане важливим аспектом розвитку мережі 6G.

Розглянуто варіанти формування інтегрованої мережі 6G, яка розширить спектр послуг, що надаються користувачам. При цьому, інтеграція наземних та неназемних мереж 6G забезпечить широкосмуговий зв'язок та послуги IoT у регіонах та областях, де відсутнє покриття наземної мережі, включаючи віддалені ферми, і навіть на борту кораблів та літаків. Крім того, 6G сприятиме появі нових застосувань, таких як високоточне позиціонування об'єктів комбінованими засобами супутникових та наземних систем та високоточна зйомка земної поверхні в реальному часі для сільського господарства.

Досліджено інтегровану мережу 6G з 3D-покриттям, що дозволить усунути всі прогалини у покритті по всьому світу. При цьому, користувачі зможуть підключатися до мережі 6G через наземні та неназемні канали, використовуючи той самий мобільний телефон або портативний пристрій у будь-якому місці та в будь-який час. Крім того, інтегрована мережа 6G буде стійкою до стихійного лиха, а це означає, що вона

може забезпечити підключення для служб швидкого реагування та надання допомоги під час лиха.

### Література

1. Hernandez D. and Brown T. B. Measuring the algorithmic efficiency of neural networks, arXiv preprint arXiv:2005.04305, 2020.
2. Cai H., Gan C., Wang T., Zhang Z., Han S. Once-for-all: Train one network and specialize it for efficient deployment, arXiv preprint arXiv:1908.09791, 2019.
3. Pizzo A., Marzetta T. L., Sanguinetti L. Degrees of freedom of holographic MIMO channels, in Proc. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020, pp. 1–5.
4. Wong K. K., Tong K. F., Chu Z., Zhang Y. A vision to smart radio environment: Surface wave communication superhighways, arXiv preprint arXiv: 2005.14082, 2020.
5. Bortnyk G., Vasykivskiy M., Kychak V. High-Processing Method of Spectral Analysis Wide-Signals. 2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165507.
6. Васильківський М. В. Оцінювання енергетичних характеристик радіоканалів міліметрового діапазону / М. В. Васильківський, О. І. Мельничук, О. В. Стальченко // *Матеріали І Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)"*, Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 80–81.
7. Бортник Г. Г. *Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу* : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 126 с.
8. Бортник Г. Г. *Метод розширення динамічного діапазону аналого-цифрових трактів засобів цифрового оброблення радіосигналів* / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Р. М. Вітер // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія "Технічні науки"*. – 2020. – № 1 (281). – С. 48–51.
9. Васильківський М. В. Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж п'ятого покоління / М. В. Васильківський, С. О. Болдинюк // *Матеріали І Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)»*, Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – С. 68–69.
10. Кичак В. М. *Технології надпровідних приймачів терагерцового діапазону* / В. М. Кичак, М. В. Васильківський // *Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи телекомунікацій"*, 15–19 квітня 2019 р. – Київ : Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – С. 222–224.

### References

1. Hernandez D. and Brown T. B. Measuring the algorithmic efficiency of neural networks, arXiv preprint arXiv:2005.04305, 2020.
2. Cai H., Gan C., Wang T., Zhang Z., Han S. Once-for-all: Train one network and specialize it for efficient deployment, arXiv preprint arXiv:1908.09791, 2019.
3. Pizzo A., Marzetta T. L., Sanguinetti L. Degrees of freedom of holographic MIMO channels, in Proc. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020, pp. 1–5.
4. Wong K. K., Tong K. F., Chu Z., Zhang Y. A vision to smart radio environment: Surface wave communication superhighways, arXiv preprint arXiv: 2005.14082, 2020.
5. Bortnyk G., Vasykivskiy M., Kychak V. High-Processing Method of Spectral Analysis Wide-Signals. 2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165507.
6. Vasykivskiy M. V. Otsiniuvannia enerhetychnykh kharakterystyk radiokanaliv milimetrovoho diapazonu / M. V. Vasykivskiy, O. I. Melnychuk, O. V. Stalchenko // *Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Suchasni problemy infokomunikatsii, radioelektroniky ta nanosystem (SPIRN-2019)"*, Vinnytsia, 14-16 lystopada 2019 r. – 2019. – S. 80–81.
7. Bortnyk H. H. *Metody ta zasoby tsyfrovoho obrobлення radiosyhnaliv dlia system bezpeky ta monitorynhu* : monohrafiia / H. H. Bortnyk, M. V. Vasykivskiy, V. M. Kychak. – Vinnytsia : VNTU, 2020. – 126 s.
8. Bortnyk H. H. *Metod rozshyrennia dynamichnoho diapazonu analoho-tsyfrovykh traktiv zasobiv tsyfrovoho obrobлення radiosyhnaliv* / H. H. Bortnyk, M. V. Vasykivskiy, R. M. Viter // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriiia "Tekhnichni nauky"*. – 2020. – № 1 (281). – S. 48–51.
9. Vasykivskiy M. V. *Optyimizatsiia parametriv infokomunikatsiinykh merezh piatoho pokolinnia* / M. V. Vasykivskiy, S. O. Boldyniuk // *Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Suchasni problemy infokomunikatsii, radioelektroniky ta nanosystem (SPIRN-2019)»*, Vinnytsia, 14-16 lystopada 2019 r. – S. 68–69.
10. Kychak V. M. *Tekhnolohii nadprovodnykh prymachiv terahertsovoho diapazonu* / V. M. Kychak, M. V. Vasykivskiy // *Materialy tryndsiatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Perspektyvy telekomunikatsii"* , 15–19 kvitnia 2019 r. – Kyiv : Natsionalnyi tekhnichni universytet Ukrainy "Kyivskiy politekhnichni instytut imeni Ihoria Sikorskoho". – S. 222–224.