

DOI: 10.18372/2310-5461.55.16904

УДК 539.3:534.1

Р. С. Одарченко, д-р техн. наук, професор
Національний авіаційний університет
orcid.org/ 0000-0002-7130-1375
e-mail: odarchenko.r.s@ukr.net

Т. В. Дика
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-7850-2161
e-mail: tanya_dyka@ukr.net

О. В. Жарова, канд. пед. наук
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-4060-850X
e-mail: jarova@ukr.net;

М. С. Одарченко, PhD-докторант
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-7714-3558
e-mail: odarchenko.m.s@gmail.com;

В. М. Жога, PhD-докторант
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-3207-013X
e-mail: jogajook@gmail.com

О. П. Слободян, канд. техн. наук
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-6202-4070,
e-mail: sapfel@ukr.net

КЛЮЧОВІ НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ НА ШЛЯХУ ДО 6G (ОГЛЯД)

Вступ

Мережі мобільного зв'язку 5G вже розгортаються по всьому світу, безліч нових додатків і варіантів використання, які керуються сучасними тенденціями, вже задумуються, що кидає виклик можливостям 5G. На сьогоднішній день мережа 5G підтримує розширений мобільний широкопasmовий зв'язок (eMBB), щоб забезпечити максимальну швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с. Крім того, ультранадійний зв'язок із низькою затримкою (uRLLC) мінімізує затримки до 1 мс, а масивний зв'язок машинного типу (mMTC) підтримує понад 100 разів більше пристроїв на одиницю площі порівняно з 4G. Очікувана надійність і доступність мережі становить понад 99,999 % [1]. Мережеве програмне забезпечення – це невід'ємна складова технології 5G, яка забезпечує динамічність, програмованість і абстракцію мереж [2]. Можливості 5G відкрили можливість реалізації принципово нових випадків використання, таких як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), змішана реальність (MR), автономні транспортні засоби, Інтернет речей (IoT) і промисловість 4.0 [3, 4].

Останні розробки в сфері комунікацій запровадили багато нових концепцій, таких як Edge Intelligence (EI), зв'язок за межами суб-6 ГГц до ТГц, неортогональний множинний доступ (NOMA), великі інтелектуальні поверхні (LIS), ройові мережі та самопідтримувані мережі (SSN)) [5, 6]. Ці концепції еволюціонують, щоб стати повноцінними технологіями, які можуть використовуватися для майбутніх.

Впровадження штучного інтелекту (AI) в еволюцію 5G має вирішальне значення для управління складністю та стимулюванні наступного квантового стрибка в стільникових мережах. Еволюція систем 5G для підвищення продуктивності та вирішення нових випадків використання робить 5G ще більш складною технологією. У таких складних системах 5G існує кілька технічних проблем: від моделювання системи до розробки алгоритму до конфігурації та керування мережею. Крім того, системи 5G генерують величезну кількість даних. Використання швидко вдосконалених методів штучного інтелекту, таких як машинне навчання (ML) і аналітика даних, має вирішальне значення для управління складністю, виявлення шаблонів у даних, оптимізації дизайну мережі, підвищення продуктивності системи та зниження операційних витрат [9]. По-

тенціал методів штучного інтелекту, особливо глибокого навчання, призвів до значного інтересу з боку наукових кіл до їх застосування в комунікаційних мережах [10, 11]. Індустрія мобільного зв'язку також прискорює використання найсучасніших технологій AI в стільникових мережах. Однак значною мірою поточне використання методів штучного інтелекту в реальних стільникових мережах в основному покладається на запатентовані реалізації та рішення.

3GPP узгодив стандарти 5G, які можна використовувати в регіонах без існуючої інфраструктури, відкриваючи шлях для розгортання 5G. Станом на 2018 рік мобільні оператори Сполученого Королівства інвестували 1,4 мільярда фунтів стерлінгів у спектр 2,3 ГГц і 3,44 ГГц. У 2018 році нова мобільна послуга 5G від AT&T була доступна в дюжині великих мегаполісів у Сполучених Штатах. У 2019 році ZTE представила ZTE Axon 10 Pro 5G у Китаї, скандинавських країнах і на Близькому Сході як перший мобільний смартфон із підтримкою 5G.

3GPP вивчає мережі радіодоступу з підтримкою штучного інтелекту (RAN) у релізі 17, включаючи принципи, функціональну структуру, варіанти використання та рішення. Однак, обсяг дослідження не охоплює дизайн радіоінтерфейсу. Щоб скористатися всіма перевагами технологій штучного інтелекту в RAN наступного покоління, ми повинні оптимізувати інтеграцію штучного інтелекту в проектування та реалізацію системи, включаючи радіоінтерфейс [12].

5G має обслуговувати різні пристрої в сценаріях використання eMBB, URLLC і mMTC. 3GPP Release 18 продовжить вивчати та впроваджувати спеціальні функції для покращення та розширення можливостей 5G для обслуговування не лише смартфонів, але й інших різноманітних пристроїв 5G, таких як розширена реальність (XR) та хмарні ігрові пристрої, UE низької складності, автомобільні пристрої та безпілотні літальні апарати (БПЛА), як показано на рис. 1 [13].

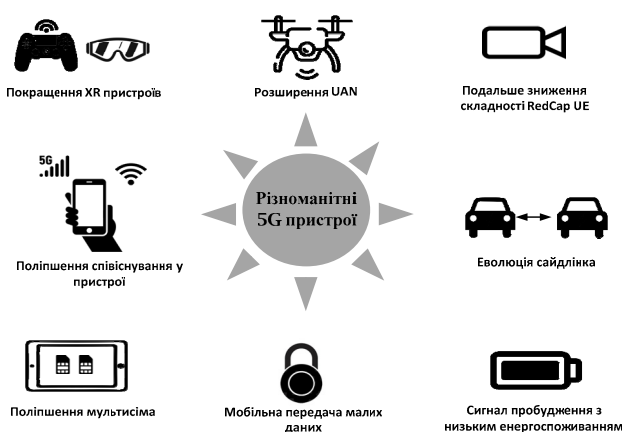


Рис. 1. Основні функції 3GPP Release-18

Напрямки трансформації цифрового світу

Наше суспільство стає все більш цифровим та глобально керованим. Перехід від доцифрової епохи, який відбувся лише кілька років тому, до нової цифрової реальності створює благодатний ґрунт для вчених для вивчення ландшафту, який змінюється на наших очах. Багато очікуваних майбутніх послуг, включаючи електронне здоров'я та автономні транспортні засоби будуть критично залежати від миттєвого, практично необмеженого бездротового підключення. Очікується, що технології мобільного зв'язку досягнуть значного прогресу, ніж усе, що було досі в додатках із бездротовою підтримкою, що зробить повсякденне життя більш безпечним і значно підвищить ефективність бізнесу. Наступне покоління цифрових технологій і програмного забезпечення, яких ще не можна було уявити, ще більше змінить ринки, суспільство та повсякденне життя [14].

На відміну від попередніх поколінь комунікаційних мереж, 5G вважається наріжним каменем цифрової трансформації галузі. Найбільші економіки світу вимагають 5G як невід'ємну частину довгострокового промислового розвитку. Наприклад, Європейський Союз запропонував план 2030 Digital Compass (Цифровий компас), у якому сформульовано плани комерційної цифрової трансформації та цифровізації державних послуг. Він прийняв 5G як основу для Індустрії 4.0. Як перша країна, яка розгорнула 5G, Південна Корея ще більше зміцнила побудову конвергентної екосистеми 5G+ і просувала об'єднані послуги 5G. Японія продовжує пропагувати цінність B5G (Beyond 5G) для засобів існування людей і суспільства. Китай також висунув довгострокову мету на 2035 рік, керуючись науково-технічними інноваціями та поглибленням «5G + промислового Інтернету» як своєї важливої поточної мети [15].

Поточні можливості мережі 5G все ще недостатні, тому потрібно їх продовжувати вдосконалювати в 3GPP R18 і наступних версіях. Перш за все, у майбутньому XR (розширена реальність) стане основним бізнесом, який буде підтримувати мережа. Роздільна здатність XR не тільки буде оновлена з 8K до 16K/32K або навіть вище, бізнес-сценарії доповненої реальності (Augmented Reality) для галузевих додатків також еволюціонуватимуть від одностороннього зв'язку до спільної взаємодії з декількома XR і швидко розвиватимуться після 2025 року [15].

Багатосторонні відеодзвінки та віртуальні зустрічі, представлені дистанційною роботою, стануть нормою. Поточний режим конференції з фіксованим доступом, відео та дзвінками перетвориться на багатосторонню віддалену співпрацю мобільного доступу та мультимедійних даних і взаємодії в реальному часі в бізнесі. Наприклад,

корпоративні співробітники можуть отримати доступ до середовища корпоративного офісу з віртуальними зображеннями в будь-який час вдома та спілкуватися з ними.

Таким чином, 5G-Advanced має забезпечити оновлену мережеву архітектуру та розширені можливості інтерактивного зв'язку, щоб задовольнити потреби розвитку бізнесу існуючих чітких голосових методів зв'язку, які розвиваються до повноцінних, інтерактивних та захоплюючих методів спілкування. Це також має дозволити покращити споживчий досвід.

Цифровізація галузі створила набагато складніше бізнес-середовище, ніж споживчі мережі. Підприємствам у різних галузях, таких як промисловий Інтернет, енергетичний Інтернет, шахти, порти та медичне обслуговування, потрібна мережа, щоб надати їм диференційований бізнес-досвід і надати детерміновані гарантії SLA для бізнес-результатів. Наприклад, для промислового Інтернету потрібні детерміновані затримки передачі зв'язку, які обмежені вгору та вниз, а інтелектуальні мережі потребують високоточної синхронізації годинника, високої ізоляції та високого рівня безпеки. Шахти повинні забезпечувати точне позиціонування під поверхнею, порти потребують дистанційного керування порталними кранами, а медичні заклади потребують діагностики в реальному часі та інформації про лікування, синхронізації та підтримки дистанційної діагностики з наднизькою затримкою.

Тому 5G-Advanced має повністю враховувати гарантію детермінованого досвіду для галузевих послуг, включаючи сприйняття послуг у реальному часі, вимірювання, планування та, нарешті, формування загального замкнутого контуру керування. Для різних галузей промисловості 5G має використовувати загальнодоступні мережі, локальні приватні мережі та різні режими гібридної мережі, щоб відповідати галузевим вимогам ізоляції бізнесу та безпеки даних. Таким чином, 5G-Advanced має зосередитися на архітектурі мережі, схемі мережі, формі обладнання та можливостях підтримки обслуговування, які відповідають різноманітному та складному бізнес-середовищу.

Аналіз досліджень і публікацій

Враховуючи тенденцію розвитку попередніх мобільних мереж, початкова мобільна мережа 6G мала б прийняти поточну архітектуру та сильні сторони 5G, такі, як діапазони вищих частот і оптимізована децентралізована мережева система. Хоча мобільна технологія 6G надає ряд переваг майбутнім надшільним мережам, є кілька питань, які все ще потрібно буде висвітлити, обговорити, а потім вирішити перед стандартизацією системи

6G. Таким чином, виконання дослідження, яке розглядає різні аспекти та обговорює технічні проблеми з різних точок зору, сприятиме досягненню цих цілей. У літературі є багато авторитетних оглядових журналів та статей про 6G, які були опубліковані. Існують сотні оглядових робіт, пов'язаних з технологією 6G, але в цій статті для обговорення вибрано лише кілька авторитетних статей, а також їх обмеження, які будуть висвітлені.

Історичний огляд минулих мережевих технологій та того, як вони визначали існуючі тенденції в мережах 6G, вперше було представлено в [16]. У цій статті детально розбираються чотири основні сфери мереж 6G: розподілений AI, інтелектуальні граничні обчислення в реальному часі, 3D-домофони та інтелектуальне радіо. Також детально розглядаються певні потенційні технології розробки в кожній області на додаток до пов'язаних проблем безпеки та конфіденційності, які виникають.

Початкове бачення 6G представлено в [17], яке, серед інших, додатково розширено в [18; 19]. Вичерпний опис проблем дослідження та розгортання 6G за межами комунікаційних технологій обговорюється в [20]. З огляду на більш конкретну перспективу, потенційні ключові засоби підтримки МТС в 6G обговорюються в [21]. Крім цього, в оглядовому дослідженні проведено критичну оцінку бачення бездротового зв'язку 6G та його мережевої структури [22]. У дослідженні представлений огляд різних критичних технічних проблем, які виникли, певні потенційні рішення, що стосуються четвертого покоління (4G), процеси передачі на фізичному рівні, проекти мережі та заходи безпеки.

У науково-дослідній роботі [23] представлено більш широкий огляд існуючих розробок щодо 6G. Після цього пояснюються новітні програми, які охоплюють вимоги, викликані тенденціями руху 6G. Крім того, в ньому обговорюються вимоги, необхідні для реалізації додатків 6G. Далі в статті представлено детальний опис важливих технологій і короткий огляд існуючих дослідницьких проектів і заходів, включаючи зусилля зі стандартизації для розвитку 6G. Нарешті, представлено короткий підсумок уроків, отриманих в результаті останніх досліджень, та опрацьовано технічні труднощі, з якими стикаються, які б представили напрямки майбутніх досліджень у сфері 6G.

Ця стаття [24] представляє ретельне обговорення 6G на основі огляду розробок 5G, включаючи бачення та вимоги, технологічні розробки та проблеми. Метою є вирішення проблем пропускної здатності, покриття та швидкості

передачі даних користувача, а також швидкості переміщення систем мобільного зв'язку.

Альтернативне опитування також проведено в [25]. У статті обговорюються найбільш перспективні напрямки дослідження з новітньої літератури, які мають загальний напрямок для проектів 6G. Це в основному сприяє дослідженню життєво важливих проблем і можливих атрибутів комунікацій 6G, таких як бачення та основні характеристики, проблеми та можливі рішення та дослідницька діяльність. Було проведено ретельне вивчення цих спірних тем дослідження щодо мотивації їх окремих субдоменів, щоб можна було зробити чіткий, конкретний і стислий висновок.

Мережа 6G вже стала ключовою темою в галузі досліджень мобільного зв'язку. Публікується багато дослідницьких робіт про бачення 6G, передові технології, можливі додатки та випадки використання. Бачення 6G запропоновано в [26–30], висвітлюючи ключові вимоги, які варіюються від надзвичайно високих швидкостей передачі даних через FeMBB до зв'язку mMTC. Це бачення ґрунтується на нових технологіях і додатках, які, як очікується, процвітатимуть у найближче десятиліття. Багато дослідницьких робіт, у тому числі [31–33], зосереджені на розробці технологій, включаючи ТГц зв'язок, граничний інтелект, блокчейн, ройові мережі та 3D-мережі, які, як передбачається, стануть засобами мереж мобільного зв'язку 6G. Крім того, розробка таких додатків, як IoE, UAVs, HT, XR та Connected Autonomous Vehicles (CAV), які використовуватимуть майбутні мережі 6G, обговорюється в [34–36]. У [37; 38] описано проблеми, пов'язані з впровадженням цих футуристичних програм у реальність за допомогою передових комунікаційних технологій. Соціальні та технологічні тенденції, які викликають рух до 6G, обговорюються в [39; 40]. Проте в кількох роботах, включаючи [41], обговорювалися поточні проекти 6G, дослідницька діяльність і підходи до стандартизації.

Постановка задач дослідження

Таким чином, необхідно визначити ключові напрямки дослідження, які сприятимуть подальшому інтенсивному розвитку стільникових мереж зв'язку на шляху до 6G. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові задачі:

1. Проаналізувати напрямки трансформації цифрового світу.

2. Проаналізувати та класифікувати ключові драйвери розвитку стільникових мереж зв'язку.

3. Визначити ключові показники якості обслуговування абонентів стільникових мереж 5G.

4. Сформулювати та узагальнити подальші напрямки досліджень для удосконалення стільникових мереж 5G на шляху до 6G.

Аналіз напрямків трансформації цифрового світу

Хоча за останнє десятиліття було проведено значну кількість досліджень у сфері цифрової трансформації, ще багато чого потрібно дізнатися про цю зміну. Це значною мірою тому, що цифрова трансформація залежить від великої кількості непередбачених ситуацій і відбувається в мінливому середовищі, яке постійно змінюється, що вимагає цілісного розуміння всієї екосистеми, в якій вона розгортається. Серед численних емпіричних досліджень феномену цифрової трансформації дослідники досліджували зміни в організаційних стратегіях [42], процесах [43], структурах та організації прийняття рішень [44], культурі [45], а також зміни в галузі [46].

Нові сценарії застосування технологій продовжуватимуть зростати до 2030 року. Сценарії поділяються на три категорії: розумне виробництво, розумне життя та розумне суспільство. Типовий варіант використання після 2030 року представлений в [47]:

Розумне виробництво: цифрова економіка може перерости завдяки застосуванню нових технологій у сільському господарстві та промисловості. 6G забезпечить інтелектуальне виробництво за допомогою інформатизації. Наприклад, дрони використовують у сільському господарстві. Робототехніка та віртуальна реальність підвищать ефективність виробництва. Завдяки сучасним технологіям, таким як цифрові близнюки, 6G матиме більш значне інтелектуальне виробництво.

Розумне життя: мережа подвійних зон Synesthesia Інтернет і інтелектуальна взаємодія, ймовірно, змінять наше життя в 2030 році.

Розумне суспільство: повсюдна мережа покриття у 2030 році значно розширить покриття державних послуг, подолавши цифровий розрив між регіонами. Загалом мережа 6G зміцнить соціальне управління та створить міцну основу для кращого суспільства.

Ключові драйвери розвитку стільникових мереж зв'язку

Як суспільство, ми прагнемо, щоб можливості захоплюючого мультимедіа високої роздільної здатності через Інтернет, розумного Інтернету речей, автоматизації виробництва та автономних транспортних засобів стали реальними. Роль стільникових мереж полягає у визначенні

правильного набору мережевих технологій, необхідних для доставки цих програм. Якщо бути точним, мережа покликана задовольнити комунікаційні потреби нашого суспільства в майбутньому. Її метою залишається розробка нових можливостей як державних, так і приватних дротових або фіксованих мереж. Гіпермасштаб речей працюватиме на рівні системи, а не в ізольованих середовищах, таких як приватні мережі: це вимагатиме координації розподіленого інтелекту по всій структурі підключення.

Хоч SMS і є сервісом, який був розроблений більше ніж 30 років тому, SMS залишатиметься одним з ключових каналів зв'язку, що використовується в Інтернеті речей. Основною технологією в Інтернеті речей, яка використовує SMS є SIM OTA (Over-The-Air) [82]. OTA дозволяє оператору зв'язуватись, закачувати додатки, а також управляти SIM-картою не маючи до неї фізичного доступу. OTA надає можливість змінювати конфігурацію SIM-карти, а також активувати додаткові сервіси віддалено. Сервери оператора генерують запит через OTA-шлюз, який перетворює його на SMS і відправляє пристрою/пристроєм через SMSF. SMS також може використовуватись в разі коли IoT пристрої мають обмежену автономність та не можуть постійно перебувати в режимі активної передачі даних. Це можуть бути такі пристрої, як датчики температури, електричні, газові та інші типи лічильників. Дані з цих пристроїв можуть передаватись з певною періодичністю використовуючи SMS. Для пристроїв, які передають дані через IP мережі, SMS може використовуватись задля активації пристрою та початку передачі даних.

Також одним з наступних кроків еволюції SMS є перехід до Rich Communication Services (RCS) [83]. RCS дозволяє передачу доповнених повідомлень, які включають в себе мультимедіа, надають змогу встановлювати чат з користувачами, а також багато різних можливостей. У мережах четвертого покоління Universal Profile (Універсальний профіль) [84] для підтримки RCS був опціональним, тоді як в мережах п'ятого покоління підтримка Універсального профілю є обов'язковою вимогою.

Однією з ключових відмінностей між сьогоднішніми мережами та мережами майбутнього є те, що останні базуватимуться на абсолютно нових технологіях як у апаратному, так і в програмному забезпеченні. Вони повинні бути сумісні з поточним поколінням і майбутніми поколіннями та новими утвореннями космічних мереж. Мережа – це абстракція як над, так і між різними типами та поколіннями комунікаційних

технологій. Масштаби виклику означають, що малоймовірно, що один телекомунікаційний оператор або постачальник контенту зможе керувати всім процесом, починаючи від дослідження й тестування й закінчуючи впровадженням. Одночасно зникає межа між IT і телекомунікаціями. Поширення окремих публічних і приватних мереж, у багатьох випадках створених і наданих нетрадиційними платформами конвергентних послуг, ще більше посилює складний характер мереж у майбутньому.

Поява технології мобільного зв'язку 5G вже демонструє ознаки того, що стає основним фактором підвищення продуктивності та, як очікується, стане ключовим фактором для довгоочікуваних, високоінтегрованих та автономних додатків у багатьох секторах. Ця нова хвиля технологій прискорить цифровізацію економіки та суспільства. Історично нове мобільне «покоління» з'являється приблизно кожні десять років, а 6G, як очікується, з'явиться приблизно у 2030 році.

Продуктивність і варіанти використання 5G продовжуватимуть розвиватися поки мережа 6G не впровадить нові технології та задовольнить комунікаційні вимоги, що будуть виходити за рамки еволюції п'ятого покоління. Зараз ідеальний час, щоб визначити майбутні потреби в комунікації, вимоги до продуктивності, системні й радіотехнічні проблеми, а також основні технічні варіанти для 6G, щоб визначити цілі дослідження до 2030-х років.

Як зазначено в [63], як дані збираються, обробляються, передаються та споживаються в бездротових мережах, буде ключовим драйвером для 6G. Використовуючи ці дані, забезпечуючи конфіденційність на найвищому рівні, ми вважаємо, що 6G відкриє нову еру «Інтернету інтелекту» із підключеними людьми, підключеними речами та підключеним інтелектом. ШІ стане рідною особливістю 6G. Можливості AI для міркування та висновків будуть вбудовані повсюдно в мережі 6G для різкого розширення можливостей мережі, а архітектура зв'язку буде переглянута для полегшення збору та поширення інформації.

Багато очікуваних майбутніх послуг будуть критично залежати від миттєвого, практично необмеженого бездротового підключення. Ресурси, зокрема, за рахунок використання все більш широкого спектру та більших решіток антен, будуть продовжувати використовуватися. Мережа 6G надасть структуру послуг, включаючи послуги зв'язку, де всі обчислення та інтелект, що стосуються користувача, можуть переміщуватися до граничної хмари. Внутрішня інтеграція зондування з комунікацією за допомогою спеціалізованих методів віртуалізації принесе ще

один стрибок у можливостях мережі. Ємність, зменшення затримки та точність позиціонування покращаться, забезпечуючи справді захоплюючий слуховий, візуальний, тактильний та сенсорний досвід спілкування. Підтримка мобільних пристроїв, що збирають енергію, що включають зарядку за допомогою радіохвиль або лазерних променів, а також використання енергії сонячних елементів або рухів тіла також відіграватиме важливу роль.

Щоб забезпечити покриття, включаючи всі інші непідключені області у світі, 6G покладається на плавну інтеграцію неземних мереж, таких як БПЛА (безпілотні літальні апарати), дрони та супутники з дуже низькою орбітою, у системи стільникового зв'язку. Нове обладнання, нові пристрої та нові користувацькі інтерфейси вступають у гру, експлуатуючи всі можливі види відновлюваної енергії та змінюючи спосіб взаємодії людей із цифровим світом.

Таким чином, для успішного розвитку мережі і подальших можливостей потрібен доступ до великомасштабних фізичних і віртуальних засобів розробки та тестування з вбудованими сучасними вимірювальними засобами. Без міжгалузевої співпраці існує реальний ризик того, що майбутнє розгортання мережевих технологій здійснюватиметься нескоординованим чином, наслідки якого виявлятимуться в реальних збогах у мережі, у силосуванні та проблемах продуктивності, через перешкоди для прийняття цифрових послуг, через зниження продуктивності та через підрив довіри суспільства. Стратегічне міжгалузеве співробітництво між операторами, технологічними компаніями, постачальниками послуг, академічними колами, органами стандартизації та форумами, а також державними установами буде мати важливе значення, а також доступ до необхідних засобів і ресурсів для розвитку можливостей майбутньої мережі.

Визначення ключових показників якості обслуговування 6G

Вважається, що мережа п'ятого покоління забезпечує розширений мобільний широкомутовий зв'язок (eMBB), тобто пропонує швидкість до 20 Гбіт/с [48] і підтримку масового зв'язку машинного типу (mMTC). Однак, це не зможе відповідати вимогам найближчого майбутнього, оскільки очікується, що до 2030 року 5G досягне своїх меж [49]. Природа швидкості зв'язку, яка залежить від попиту, диктує, що менш ніж через 10 років швидкість передачі даних має значно підвищитися, щоб перевищити 1 Тбіт/с (до 10 Тбіт/с) [50]. Таким чином, погляд за межі 5G включає

дослідження методів, які можуть запропонувати такі швидкості. Крім того, 5G розроблено для використання міліметрового діапазону 20–100 ГГц [15]. Однак у цьому діапазоні неможливо досягти таких високих швидкостей через поточні конструкції трансиверів і обмеження методів цифрової модуляції, такі як нелінійні підсилювачі потужності, фазовий шум і низька роздільна здатність аналого-цифрового перетворювача (АЦП) [51].

Крім того, 5G пропонує наднадійний зв'язок із малою затримкою (URLLC) як один із ключових факторів. Однак, він обмежений межею мережі без реальної інтеграції по всій мережі (включно з ядром) [52]. Крім того, концепція гетерогенних мереж (HetNets) лежить в основі технологій 5G, але наразі така мережева інтеграція обмежена наземними мережами. Його необхідно розширити, щоб стати тривимірним, включивши в основну мережу повітряні та космічні мережі. Важливо також відзначити, що 5G не захищений від атак на відмову в обслуговуванні (DoS) або загроз, які ставлять під загрозу його доступність [53]. Надзвичайно важливо, щоб це було вдосконалено в майбутніх мережах, щоб пристосуватися до розміру постійно зростаючих мереж із мільярдами вузлів.

Надзвичайно високі швидкості передачі даних виправдані типом послуг, які з'являються або очікуються на широке поширення найближчим часом. Такі послуги, як доповнена реальність (AR), імплантати людських наночіпів, підключена робототехніка, автономні системи та телемедицина [54] наразі перебувають у стадії розробки та вдосконалення, щоб у найближчому майбутньому їх розгорнути у широкому масштабі. Крім того, з передбачуваним зростанням комунікацій M2M очікується, що до Інтернету будуть підключені сотні мільярдів пристроїв [55]. Проте, очікується, що 5G запропонує найкращі компроміси щодо продуктивності лише на рівні мільярда пристроїв [56]. Таким чином, наступне велике оновлення мережі мобільного зв'язку буде масштабовано з урахуванням такої величезної кількості підключень пристроїв і більшої, ніж будь-коли, згущеної мережі.

Передбачається, що бачення 6G буде сформульоване до 2022–2023 років для встановлення вимог до 6G та оцінки розвитку 6G, технологій, стандартів тощо. Органи стандартизації, такі як Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) і Проєкт партнерства третього покоління (3GPP) очікується розробка специфікацій для розвитку 6G до 2026–2027 років [61]. До цього часу оператори мереж розпочнуть науково-дослідну роботу (R&D) 6G, щоб провести випробування

мережі 6G до 2028–2029 років, щоб запустити мережі зв'язку 6G до 2030 року [62].

Надійність, затримка, щільність пристроїв та енергоефективність є одними з основних ключових показників ефективності шостого покоління. Очікується, що вимоги до надійності та затримки 6G будуть різноманітними та специфічними для конкретного випадку з найбільш екстремальними значеннями 10–9 та 0,1 мілісекунди (мс), що відповідають поточним вимогам до дротових промислових мереж керування. [64].

Роблячи висновки з визначеної ІТУ щільність пристроїв 5G у мільйон пристроїв IoT на км² і враховуючи, що 3D з'єднання буде важливим показником ємності в 6G [65], очікується, що мережі повинні підтримувати близько 10 пристроїв на м² - 100 пристроїв на м³.

З точки зору енергоефективності, 6G представить надтривалий термін служби батареї за допомогою комбінації енергоефективного зв'язку, передових технологій акумулятора та методів збирання енергії (ЕН). Остаточне бачення полягає в тому, щоб повністю усунути необхідність окремої зарядки мобільних пристроїв

Крім того, очікується, що 6G стане першим поколінням, яка з нуля розгляне низку нових вимог, що охоплюють технічні (наприклад, точність позиціонування), соціальні (наприклад, вимірювання підключення як право людини), екологічні (наприклад, слід CO₂) та економічні аспекти [66].

Система 6G також підвищить продуктивність і максимізує QoS користувача в кілька разів більше, ніж 5G, а також деякі цікаві функції. Це захистить систему та дані користувача. Це забезпечить комфортні послуги. Очікується, що система зв'язку 6G стане глобальним комунікаційним засобом. Передбачається, що швидкість передачі даних на користувача в 6G буде приблизно 1 Тбіт/с у багатьох випадках [67]. Очікується, що система 6G забезпечить одночасне бездротове підключення, що в 1000 разів вище, ніж 5G.

Найцікавішою особливістю 6G є включення повністю підтримуваного AI для керування автономними системами. Трафік відео типу, ймовірно, буде домінуючим серед різних систем трафіку даних у комунікації 6G. Найважливіші технології, які будуть рушійною силою для 6G є діапазон терагерц (ТГц), штучний інтелект, оптичний бездротовий зв'язок (OWC), 3D-мережі, безпілотні літальні апарати і бездротова передача енергії. Ще більше інформації щодо того, як можна розробити комунікаційні системи 6G; очікуваних технологій 6G та питання дослідження, необхідні для задоволення потреб майбутніх розумних мереж представлено в [68].

Однак, тісний зв'язок між 6G та AI за визначенням не призводить до кращої безпеки та конфіденційності. Це також може стати засобом та причиною їх порушення в різних випадках. Крім того, існує багато зусиль/пропозицій щодо поєднання нових технологій, таких як блокчейн, зв'язок у видимому світлі (VLC), THz та функції квантових обчислень/комунікацій у парадигмах інтелектуальних мереж 6G таким чином, щоб вирішувати проблеми безпеки та конфіденційності. Тому міркування безпеки 6G необхідно проаналізувати з точки зору безпеки фізичного рівня, безпеки мережевої інформації та безпеки, пов'язаної з розширеним навчанням (наприклад, глибинне навчання) [69].

Формулювання ключових напрямків досліджень в галузі стільникових мереж зв'язку

П'яте покоління (5G) заклало необхідну основу для наступного покоління 6G, оскільки архітектура та інфраструктура будуть розроблені на основі 5G з удосконаленнями та доповненнями, щоб впоратися з інтенсивними вимогами 6G. Таким чином, серед різних архітектурних та інфраструктурних компонентів попередніх поколінь, архітектура 5G xHaul також буде збережена в 6G, оскільки гнучкість, необхідна для B5G, буде забезпечена включенням. xHaul розглядається як об'єднання переднього зв'язку (FH) і зворотного зв'язку (BH) у мобільних мережах наступного покоління до загальних і спільних або спільних транспортних мереж. [57] Він увімкне та оснастить 6G гнучкою та програмно визначеною реконфігурацією інтегрованих елементів мережі. Архітектура xHaul також забезпечить сервіс-орієнтоване та уніфіковане середовище керування. Це сприятиме тому, щоб функції мережі були повсюдно доступними, і, отже, вони могли ефективно надавати доступ до крайових та хмарних обчислювальних ресурсів [58]. Ця архітектура принесе користь 6G з точки зору досягнення високої швидкості передачі даних і економічності.

Мережа 6G повністю реалізує революцію Індустрії 4.0, розпочату ще з 5G, тобто цифрову трансформацію виробництва за допомогою кіберфізичних систем і послуг IoT. Подолання кордонів між реальним заводом і кіберобчислювальним простором дозволить здійснювати Інтернет-діагностику, технічне обслуговування, експлуатацію та прямі комунікації між машинами економічно ефективним, гнучким і ефективним способом [59]. Автоматизація має власний набір вимог щодо надійного та ізохронного зв'язку [60], які 6G позиціонується задовольнити за допомогою революційного набору технологій. Наприклад, для промислового

керування потрібні операції в режимі реального часу з гарантованим джиттером затримки в мкс і піковою швидкістю передачі даних у Гбіт/с для промислових додатків AR/VR (наприклад, для навчання, перевірки).

Крім того, літаючі транспортні засоби (наприклад, дрони) представляють величезний потенціал для різних сценаріїв (наприклад, будівництво, швидке реагування). Рої дронів потребуватимуть покращених можливостей для розширення підключення до Інтернету. У цій перспективі 6G прокладе шлях для підключених транспортних засобів завдяки прогресу в апаратному забезпеченні, програмному забезпеченні та нових рішеннях підключення.

Це широке розмаїття варіантів використання є унікальною характеристикою парадигми 6G, потенціал якої можна буде повністю розкрити

лише завдяки проривним технологічним досягненням і новим дизайнам мереж.

Передбачається, що технологія бездротової мережі шостого покоління (6G) запропонує ширше покриття, менше споживання енергії, повний спектр і економічну ефективність із покращеною безпекою. Мережі 6G задовольнять ці потреби шляхом розгортання нових технологій, таких як множинний доступ, дизайн сигналів, схеми кодування каналів, нарізка мережі, численні технології антен і хмарні периферійні обчислення. 6G впливає на чотири важливі майбутні зміни [70]. По-перше, він пропонує інтегровану комунікаційну мережу повітря–земля–космос–море шляхом розгортання наземних і неземних мереж, як показано на рис. 2 [71].

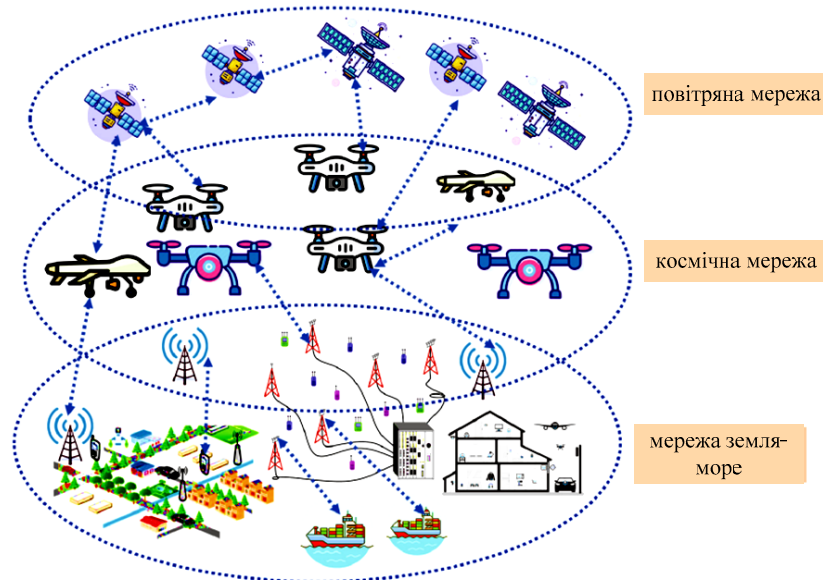


Рис. 2. Очікувана інтегрована мережа 6G земля-море-повітряний простір

По-друге, нові радіодіапазони підвищують пропускну здатність мережі та швидкість передачі даних, включаючи міліметрові хвилі (mmwave), суб-6 ГГц, терагерц (THz) та оптичний зв'язок. По-третє, 6G забезпечить нове покоління інтелектуальних програм і послуг, що використовують технології штучного інтелекту (ШІ) і великих даних у відповідь на масивні набори даних, створені гетерогенними мережами з різними сценаріями зв'язку, широкою смугою пропускання, більшою кількістю антен і новим 6G [72]. По-четверте, мережева безпека та конфіденційність повинні бути зміцнені та покращені для технологій та програм 6G [73].

Варіанти використання 6G висувають суворіші вимоги безпеки, ніж випадки використання 5G [74]. Інтернет усього (IoE) із широким набором можливостей і послуг ускладнить роботу та встановлення розподілених рішень ШІ,

конфіденційності та безпеки. Умови високої мобільності нових підключених пристроїв змушують їх змінювати свої взаємопов'язані мережі та вимагати послуг з інших мереж, що призводить до ускладнень безпеки та проблем конфіденційності [75].

Мережі 6G включають в себе безконтактну мережу та архітектуру керування послугами (ZSM), що забезпечує швидке обслуговування, низькі експлуатаційні витрати та менше людських помилок. Повна автоматизація в поєднанні з самонавчанням дозволяє розширювати атаки в замкнених системах [76].

Очікується, що штучний інтелект стане основою багатьох послуг і технологій 6G, які, як очікується, будуть настільки розвиненими, що людям взагалі не доведеться втручатися в роботу мережі. Штучний інтелект на найвищому рівні зможе аналізувати людські почуття для різних

цілей, таких як кращий вибір онлайн-контенту та реклами, які будуть доставлені окремим користувачам на основі відгуків на їх обличчя [77], і запропонує кращий досвід користувача під час роботи – чати з ботами, які стають все більш поширеними. Передбачається, що змішана реальність (XR) стане новим способом взаємодії з навколишнім середовищем. Обидві його форми, AR і VR, є дуже перспективними для багатьох застосувань. Наприклад, VR використовувалася для навчання медичного персоналу та дистанційного лікування пацієнтів під час пандемії COVID-19, наприклад, шляхом виконання послуг фізичної або когнітивної реабілітації та телемедичних послуг на основі VR [78, 79].

Іншим застосуванням XR є надання нових способів керування навколишнім середовищем, таким як розумні будинки та робочі офіси. Очікується, що голографічна комунікація посилить ефект занурення та запропонує нові способи взаємодії з навколишнім середовищем. Наприклад, голографічний зв'язок можна використовувати для додання більшої автентичності розмові між людьми, і це проявляється в сценаріях, пов'язаних із телеприсутністю або перекладом вимовлених слів у описові віртуальні об'єкти [80]. Також очікується, що разом XR і голографічний зв'язок матимуть потужний вплив на майбутнє освіти, і це підтверджується створенням навчальних закладів, які повністю базуються на віртуальному дистанційному навчанні в режимі реального часу. На рис. 3 показуємо приклади та сфери застосувань мережі 6G.

Таким чином, завдяки інтеграції зв'язку із зондуванням і штучним інтелектом, 6G стане інтелектуальною мережею, яка відкриє та розблокує декілька нових промислових додатків, таких як інтелектуальний аналіз відео, повсюдні

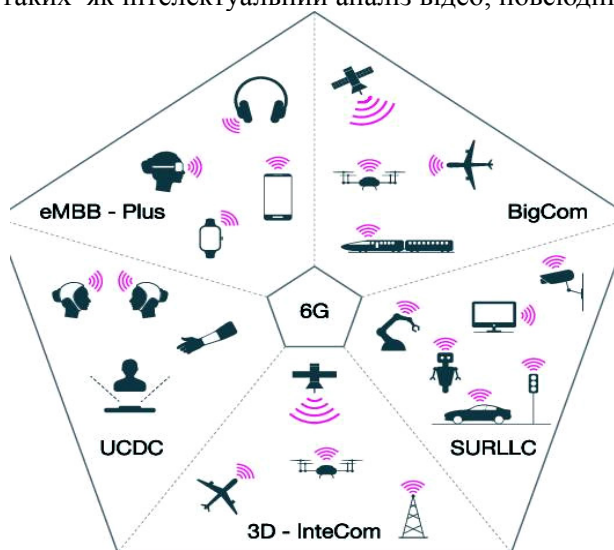


Рис. 3. П'ять прикладів застосування 6G

інтелектуальні системи в режимі реального часу та інтелектуальні служби залучення клієнтів. Нижче наведено деякі з потенційних застосувань 6G [81]:

– Транспорт: автономні транспортні засоби, що взаємодіють з навколишнім середовищем і взаємодіють водіння.

– Роздрібна торгівля: майже в реальному часі та наскрізні транзакції без дотику від виробництва до споживання.

– Виробництво: автономні та динамічно реконфігуровані виробничі лінії на основі попиту майже в реальному часі.

– Охорона здоров'я: керована роботом хірургія, дистанційні хірургічні процедури та розширені хірургічні можливості.

Висновки

Технологія мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) зараз широко доступна в кількох країнах із мільйонами клієнтів 5G. Тому настав час науковцям і бізнесу зосередитися на наступному поколінні. Очікується, що в еру 2030 року відбудеться велика трансформація в бік автоматизації, де мережа шостого покоління відіграватиме життєво важливу роль, як комунікаційна та інформаційна магістраль.

У цій статті розглянута мобільна мережа 6G, включно з мотиваціями, сценаріями використання, вимогами, підтримуваними дослідницькими проектами та технологіями. Було детально проаналізовано еволюцію і розширені функції 5G, щоб передбачити критичні вимоги до 6G і підкреслити їх можливості. Було запропоновано кілька потенційних застосувань, їхні переваги, концепції та напрямки досліджень 6G.

Незважаючи на те, що 5G перебуває на стадії початкового розгортання по всьому світу, обіцяючи багато нових можливостей, дослідження мережі 6G вже розпочато, щоб мати змогу задовольнити ще більш вибагливий попит на бездротові послуги та програми зі значно підвищеним рівнем вимог до них.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] D. Mi, R. Odarchenko et al., "Demonstrating Immersive Media Delivery on 5G Broadcast and Multicast Testing Networks," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, doi: 10.1109/TBC.2020.2977546.
- [2] M. Liyanage, A. Gurtov, and M. Ylianttila, *Software Defined Mobile Networks (SDMN): Beyond LTE Network Architecture*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015. doi.org/10.1002/9781118900253
- [3] S. Wijethilaka and M. Liyanage, "Realizing Internet of Things with network slicing: Opportunities and challenges," in *Proc. IEEE 18th Annu. Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC)*, 2021, pp. 1–6 doi.org/10.1109/CCNC49032.2021.9369637.

- [4] Y. Siriwardhana, C. De Alwis, G. Gür, M. Ylianttila, and M. Liyanage, "The fight against the COVID-19 pandemic with 5G technologies," *IEEE Eng. Manag. Rev.*, vol. 48, no. 3, pp. 72–84, Sep. 2020. doi.org/10.1109/EMR.2020.3017451.
- [5] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, May/Jun. 2019. doi.org/10.1109/MNET.001.1900287.
- [6] F. Fang, Y. Xu, Q.-V. Pham, and Z. Ding, "Energy-efficient design of IRS-NOMA networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 11, pp. 14088–14092, Nov. 2020. doi.org/10.1109/TVT.2020.3024005
- [7] Y. Lu and X. Zheng, "6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 19, Art. no. 100158, Sep. 2020. doi.org/10.1016/j.jii.2020.100158.
- [8] Iavich M., Gnatyuk S., Odarchenko R., Bocu R., Simonov S. (2021) The Novel System of Attacks Detection in 5G. In: Barolli L., Woungang I., Enokido T. (eds) *Advanced Information Networking and Applications. AINA 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 226. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75075-6_47 (Scopus)
- [9] A. Zappone, M. Di Renzo and M. Debbah, "Wireless Networks Design in the Era of Deep Learning: Model-Based, AI-Based, or Both?," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 10, pp. 7331–7376, Oct. 2019. doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2924010.
- [10] O. Simeone, "A Very Brief Introduction to Machine Learning with Applications to Communication Systems," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 4, no. 4, pp. 648–664, Dec. 2018. doi.org/10.1109/TCCN.2018.2881442
- [11] M. Chen, U. Challita, W. Saad, C. Yin and M. Debbah, "Artificial Neural Networks-Based Machine Learning for Wireless Networks: A Tutorial," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3039–3071, Fourth-quarter 2019. doi.org/10.1109/COMST.2019.2926625
- [12] 3GPP TR 37.817, "Study on enhancement for data collection for NR and EN-DC," V0.1.0, January 2021.
- [13] RP-213468, "Summary for RAN Rel-18 package," 3GPP RAN#94-e, December 2021. Available at http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_94e/Docs/R_P-213469.zip. Accessed on January 2, 2021, [RP-212708, "New SID on AI/ML for NR Air Interface," 3GPP TSG RAN#94e, December 2021.
- [14] Lane, K. E., & Levy, S. J. (2019). Marketing in the digital age: A moveable feast of information. In A. Rindfleisch & A. J. Malter (Eds.), *Review of marketing research* (Vol. 16). Bingley: Emerald Publishing. doi.org/10.1108/S1548-643520190000016004.
- [15] Hofacker, C. (2019). Notes on the growing importance of software as a driver of value exchange. In A. Rindfleisch & A. J. Malter (Eds.), *Review of marketing research* (Vol. 16, 8596). Bingley: Emerald Publishing. doi.org/10.1108/S1548-643520190000016007.
- [16] Wang, M.; Zhu, T.; Zhang, T.; Zhang, J.; Yu, S.; Zhou, W. Security and privacy in 6G networks: New areas and new challenges. *Digit. Commun. Netw.* 2020, 6, 281–291. doi.org/10.1016/j.dcan.2020.07.003
- [17] M. Katz, M. Matinmikko-Blue, M. Latva-Aho, 6Genesis flagship program: building the bridges towards 6G-enabled wireless smart society and ecosystem, in *Proceedings of IEEE 10th Latin American Conference on Communications (LATINCOM)* (Guadalajara, Mexico, 2018). doi.org/10.1109/LATINCOM.2018.8613209.
- [18] E. Calvanese Strinati, S. Barbarossa, J.L. Gonzalez-Jimenez, D. Ktenas, N. Cassiau, L. Maret, C. Dehos, 6G: the next frontier: from holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 14(3), 42–50 (2019). doi.org/10.1109/MVT.2019.2921162.
- [19] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, J. Wang, 6G technologies: key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 14(3), 18–27 (2019) W. Saad, M. Bennis, M. Chen, A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Netw.* 34(3), 134–142 (2020). doi.org/10.1109/MVT.2019.2921398.
- [20] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, M.-S. Alouini, What should 6G be? *Nat. Electron.* 3(1), 20–29 (2020). doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6.
- [21] N. H. Mahmood, H. Alves, O.L.A. López, M. Shehab, D.P.M. Osorio, M. Latva-aho, Six key enablers for machine type communication in 6G, in *Proceedings 2nd 6G Wireless Summit* (Levi, Finland, 2020). doi.org/10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083794.
- [22] Nawaz, F.; Ibrahim, J.; Awais, M.; Junaid, M.; Kousar, S.; Parveen, T. A review of vision and challenges of 6G technology. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 2020, 11, 643–649. doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110281.
- [23] De Alwis, C.; Kalla, A.; Pham, Q.-V.; Kumar, P.; Dev, K.; Hwang, W.-J.; Liyanage, M. Survey on 6G frontiers: Trends, applications, requirements, technologies and future research. *IEEE Open J. Commun. Soc.* 2021, 2, 836–886. doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3071496.
- [24] Chen, S.; Liang, Y.-C.; Sun, S.; Kang, S.; Cheng, W.; Peng, M. Vision, requirements, and technology

- trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed. *IEEE Wirel. Commun.* 2020, 27, 218–228. doi.org/10.1109/MWC.001.1900333.
- [25] Alsharif, M.H.; Kelechi, A.H.; Albreem, M.A.; Chaudhry, S.A.; Zia, M.S.; Kim, S. Sixth Generation (6G) Wireless Networks: Vision, Research Activities, Challenges and Potential Solutions. *Symmetry* 2020, 12, 676. doi.org/10.3390/sym12040676.
- [26] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, “What should 6G be?” *Nat. Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 20–29, 2020. doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6.
- [27] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, “6G wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 957–975, 2020. doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3010270.
- [28] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, “Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, Apr. 2020. doi.org/10.1109/MWC.001.1900333.
- [29] Z. Zhang et al., “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, Sep. 2019. doi.org/10.1109/MVT.2019.2921208.
- [30] F. Tariq, M. R. Khandaker, K.-K. Wong, M. A. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, “A speculative study on 6G,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 4, pp. 118–125, Aug. 2020. doi.org/10.1109/MWC.001.1900488.
- [31] T. Huang, W. Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang, and D. Zhang, “A survey on green 6G network: Architecture and technologies” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 175758–175768, 2019. doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957648.
- [32] L. U. Khan, I. Yaqoob, M. Imran, Z. Han, and C. S. Hong, “6G wireless systems: A vision, architectural elements, and future directions,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147029–147044, 2020. doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015289.
- [33] C. De Lima et al., “Convergent communication, sensing and localization in 6G systems: An overview of technologies, opportunities and challenges” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26902–26925, 2021. doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053486.
- [34] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y.-J. A. Zhang, “The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 8, pp. 84–90, Aug. 2019. doi.org/10.1109/MCOM.2019.1900271.
- [35] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G networks: Use cases and technologies,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, Mar. 2020. doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411.
- [36] I. F. Akyildiz, A. Kak, and S. Nie, “6G and beyond: The future of wireless communications systems,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 133995–134030, 2020. doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010896.
- [37] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, “Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, Apr. 2020. doi.org/10.1109/MWC.001.1900333.
- [38] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, “6G wireless communications: Vision and potential techniques,” *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 4, pp. 70–75, Jul./Aug. 2019. doi.org/10.1109/MNET.2019.1800418.
- [39] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, and J. Wang, “6G technologies: Key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 18–27, Sep. 2019. doi.org/10.1109/MVT.2019.2921398.
- [40] Z. Zhang et al., “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, Sep. 2019. doi.org/10.1109/MVT.2019.2921208.
- [41] A. Dogra, R. K. Jha, and S. Jain, “A survey on beyond 5G network with the advent of 6G: Architecture and emerging technologies,” *IEEE Access*, early access, Oct. 15, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031234. doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031234.
- [42] Hess, T., Matt, C., Benlian, A., & Wiesböck, F. (2016). Options for formulating a digital transformation strategy. *MIS Quarterly Executive*, 15(2).
- [43] Baiyere, A., Salmela, H., & Tapanainen, T. (2020). Digital transformation and the new logics of business process management. *European Journal of Information Systems*, 29(3), 238–259. doi.org/10.1080/0960085X.2020.1718007.
- [44] Bilgeri, D., Wortmann, F., & Fleisch, E. (2017). How digital transformation affects large manufacturing companies’ organization.
- [45] Vey, K., Fandel-Meyer, T., Zipp, J. S., & Schneider, C. (2017). Learning & development in times of digital transformation: Facilitating a culture of change and innovation. *International Journal of Advanced Corporate Learning*, 10(1). doi.org/10.3991/ijac.v10i1.6334.
- [46] Al-Azzeh, J. S., Odarchenko, R., Abakumova, A. et al. Method for QOE monitoring and increasing in cellular networks based on QOE-to-QOS mapping using spline approximation. *J Wireless Com Network* 2022, 43 (2022). <https://doi.org/10.1186/s13638-022-02125-3>.
- [47] Barikhina, M. (2018). 5 digital workplace technologies to transform business. *Beekeeper Blog*. Retrieved May 14, 2019, from <https://blog.beekeeper.io/top-5-emerging-digital-workplace-technologies-transform-business/>

- [48] David, K.; Berndt, H. 6G vision and requirements: Is there any need for beyond 5G? *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2018. doi.org/10.1109/MVT.2018.2848498.
- [49] Tariq, F.; Khandaker, M.; Wong, K. K.; Imran, M.; Bennis, M.; Debbah, M. A speculative study on 6G. *arXiv* 2019. doi.org/10.1109/MWC.001.1900488.
- [50] Zhang, Z.; Xiao, Y.; Ma, Z.; Xiao, M.; Ding, Z.; Lei, X.; Karagiannidis, G.K.; Fan, P. 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2019. doi.org/10.1109/MVT.2019.2921208.
- [51] Xiao, M.; Mumtaz, S.; Huang, Y.; Dai, L.; Li, Y.; Matthaiou, M.; Karagiannidis, G.K.; Björnson, E.; Yang, K.; Chih-Lin, I.; et al. Millimeter wave communications for future mobile networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2017. doi.org/10.1109/JSAC.2017.2698698.
- [52] Samdanis, K.; Taleb, T. The road beyond 5G: A vision and insight of the key technologies. *IEEE Netw.* 2020, 34, 135–141. doi.org/10.1109/MNET.001.1900228.
- [53] Fang, L.; Zhao, B.; Li, Y.; Liu, Z.; Ge, C.; Meng, W. Countermeasure based on smart contracts and AI against DoS/DDoS attack in 5G circumstances. *IEEE Netw.* 2020, 34, 54–61. doi.org/10.1109/MNET.021.1900614.
- [54] Saad, W.; Bennis, M.; Chen, M. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Netw.* 2019, 34, 134–142. doi.org/10.1109/MNET.001.1900287.
- [55] Andrews, J.G.; Buzzi, S.; Choi, W.; Hanly, S.V.; Lozano, A.; Soong, A.C.; Zhang, J.C. What will 5G be? *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2014, 32, 1065–1082. doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098
- [56] Yang, P.; Xiao, Y.; Xiao, M.; Li, S. 6G Wireless communications: Vision and potential techniques. *IEEE Netw.* 2019, 33, 70–75. doi.org/10.1109/MNET.2019.1800418.
- [57] Camps-Mur D.; Gutierrez, J.; Grass, E.; Tzanakaki, A.; Flegkas, P.; Choumas, K.; Giatsios, D.; Beldachi, A.F.; Diallo, T.; Zou, J.; et al. 5G-xHaul: A Novel Wireless-Optical SDN Transport Network to Support Joint 5G Backhaul and Fronthaul Services. *IEEE Commun. Mag.* 2019, 57, 99–105. doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800836.
- [58] Wu, W.; Zhou, C.; Li, M.; Wu, H.; Zhou, H.; Zhang, N.; Shen, X.; Zhuang, W. AI-Native Network Slicing for 6G Networks. *IEEE Wirel. Commun.* 2021, 29, 96–103. doi.org/10.1109/MWC.001.2100338.
- [59] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, “A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems” *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18 – 23, Jan. 2015. doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [60] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite, “The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 11, no. 1, pp. 17–27, Mar. 2017. doi.org/10.1109/MIE.2017.2649104.
- [61] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y.-J. A. Zhang, “The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 8, pp. 84–90, Aug. 2019. doi.org/10.1109/MCOM.2019.1900271.
- [62] Y. Lu and X. Zheng, “6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 19, Art. no. 100158, Sep. 2020. doi.org/10.1016/j.jii.2020.100158.
- [63] Latva-aho, M. & Leppänen, K. (Eds). *Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence*. 6G Flagship White Paper, University of Oulu, September 2019.
- [64] G. Berardinelli, N. H. Mahmood, I. Rodriguez, and P. Mogensen, “Beyond 5G wireless IRT for industry 4.0: Design principles and spectrum aspects” in *IEEE Globecom Workshops*, Dec. 2018. doi.org/10.1109/GLOCOMW.2018.8644245.
- [65] E. C. Strinati et al., “6G: The next frontier”, Jan. 2019.
- [66] K. David and H. Berndt, “6G vision and requirements: Is there any need for beyond 5G?” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 72–80, Sep. 2018. doi.org/10.1109/MVT.2018.2848498.
- [67] S. Mumtaz et al., “Terahertz communication for vehicular networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 7, pp. 5617–5625, July 2017. doi.org/10.1109/TVT.2017.2712878.
- [68] C. de Alwis, A. Kalla, Q. V. Pham, P. Kumar, K. Dev, W. J. Hwang, and M. Liyanage, “Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, pp. 1–1, 2021. doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3071496.
- [69] G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, and F. Adachi, “6G: Opening new horizons for integration of comfort, security and intelligence,” *IEEE Wireless Communications*, 2020. doi.org/10.36227/techrxiv.11634669.v1.
- [70] Yazar, A.; Dogan-Tusha, S.; Arslan, H. 6G vision: An ultra-flexible perspective, *ITU. J. Future Evol. Technol.* 2020, 1, 121–140. doi.org/10.52953/IKVY9186.
- [71] Alwis, C.; Kalla, A.; Pham, Q.-V.; Kumar, P.; Dev, K.; Hwang, W.-J.; Liyanage, M. Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research. *IEEE Open J. Commun. Soc.* 2021, 2, 836–886. doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3071496.
- [72] Ray, P.; Kumar, N.; Guizani, M. A Vision on 6G-Enabled NIB: Requirements, Technologies, Deployments, and Prospects. *IEEE Wirel. Commun.* 2021, 28, 120–127. doi.org/10.1109/MWC.001.2000384.
- [73] Yang, H.; Alphones, A.; Xiong, Z.; Niyato, D.; Zhao, J.; Wu, K. Artificial-Intelligence-Enabled Intelligent 6G Networks. *IEEE Netw.* 2020, 34, 272–280.],

- [Gui, G.; Liu, M.; Tang, F.; Kato, N.; Adachi, F. 6G: Opening new horizons for integration of comfort, security, and intelligence. *IEEE Wirel. Commun.* 2020, 27, 126–132. doi.org/10.1109/MNET.011.2000195.
- [74] Huang, T.; Yang, W.; Wu, J.; Ma, J.; Zhang, X.; Zhang, D. A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies. *IEEE Access* 2019, 7, 175758–175768. doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957648.
- [75] Rupperecht, D.; Dabrowski, A.; Holz, T.; Weippl, E.; Popper, C. On security research towards future mobile network generations. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2018, 20, 2518–2542. doi.org/10.1109/COMST.2018.2820728.
- [76] Giordani, M.; Polese, M.; Mezzavilla, M.; Rangan, S.; Zorzi, M. Toward 6g Networks: Use cases and technologies. *IEEE Commun. Mag.* 2020, 58, 55–61. doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411.
- [77] Cambria, E. Affective computing and sentiment analysis. *IEEE Intell. Syst.* 2016, 31, 102–107. doi.org/10.1109/MIS.2016.31.
- [78] Singh, R.P.; Javaid, M.; Kataria, R.; Tyagi, M.; Haleem, A.; Suman, R. Significant applications of virtual reality for COVID-19 pandemic. *Diabetes Metab. Syndr. Clin. Res. Rev.* 2020, 14, 661–664. doi.org/10.1016/j.dsx.2020.05.011.
- [79] Swiatek, P. R.; Weiner, J. A.; Johnson, D. J.; Louie, P. K.; McCarthy, M. H.; Harada, G. K.; Germscheid, N.; Cheung, J. P.; Neva, M. H.; El-Sharkawi, M.; et al. COVID-19 and the rise of virtual medicine in spine surgery: A worldwide study. *Eur. Spine J.* 2021, 1–10. doi.org/10.1007/s00586-020-06714-y.
- [80] Kimura, S.; Aburakawa, Y.; Watanabe, F.; Torashima, S.; Igarashi, S.; Nakamura, T.; Yamaguchi, M. Holographic Video Communication System Realizing Virtual Image Projection and Frontal Image Capture. *ITE Trans. Media Technol. Appl.* 2021, 9, 105–112. doi.org/10.3169/mta.9.105.
- [81] Redshaw, T. The Significance of 5G for Special Operations of the Future; Strategic Latency Unleashed: Livermore, CA, USA, 2021; p. 293.
- [82] 3GPP TSG SA WG3 Security – S3#30 S3-030534 Over-The-Air (OTA) technology. Available at ftp://www.3gpp.org/tsg_sa/WG3_Security/TSGS3_30_Povoa/Docs/PDF/S3-030534.pdf.
- [83] Rich Communication Services (RCS). From https://www.gsma.com/futurenetworks/rcs/.
- [84] RCC.71 – RCS Universal Profile Service Definition. Available at https://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/RCC.71-v2.5-6.pdf.

Одарченко Р. С., Дика Т. В., Жарова О. В., Одарченко М. С., Жога В. М., Слободян О. П. КЛЮЧОВІ НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ НА ШЛЯХУ ДО 6G (ОГЛЯД)

Сучасні стільникові мережі зв'язку розвиваються дуже швидкими темпами. Поява технології мобільного зв'язку 5G вже демонструє ознаки того, що стає основним фактором підвищення продуктивності та, як очікується, стане ключовим фактором для довгоочікуваних, високоінтегрованих та автономних додатків у багатьох секторах. Ця нова хвиля технологій прискорить цифровізацію економіки та суспільства. По всьому світу розпочалось повноцінне розгортання комерційних мереж п'ятого покоління. В цих мережах досягаються дуже високі показники якості обслуговування абонентів. Проте, із розвитком стільникових технологій та і взагалі цифрового суспільства виникають принципово нові випадки використання, які вимагатимуть ще більш покращених показників ефективності функціонування стільникових мереж зв'язку. У зв'язку із цим, прогрес не стоїть на місці і організацією 3GPP було розроблено план по розвитку стільникових мереж, покращенню їх характеристик та введенню в експлуатацію. Наступним поколінням мобільних мереж зв'язку стане 6G. Дослідження на шляху до 6G заплановані на дану декаду і відповідно вже відбуваються, а повноцінний запуск у комерційну експлуатацію заплановано на 2030 роки. Саме тому, у даному дослідженні розглядаються мобільні технології на шляху до 6G. Зокрема, у роботі представлено високорівневе бачення екосистеми 6G, проаналізовані потенційні вимоги, нові виникаючі виклики. Таким чином, основна мета даної роботи полягає у проведенні критичного аналізу останніх удосконалень, зроблених у мобільній системі 5G, визначення їх недоліків та відповідно напрямків покращення. Також було детально проаналізовано еволюцію і розширені функції 5G, щоб передбачити критичні вимоги до 6G і одночасно підкреслити їх нові можливості. Було запропоновано кілька потенційних сценаріїв застосувань 6G, розглянуті їхні переваги, основні концепції. На базі цього, були сформовані основні напрямки досліджень з метою удосконалення стільникових мереж на шляху до 6G. І очевидним є те, що ці ключові напрямки удосконалень стільникових мереж стануть основою побудови цифрового безпроводового світу майбутньому.

Ключові слова: 5G; 6G; мережа; технології; 3GPP.

Odarchenko R., Dyka T., Zharova O., Odarchenko M., Zhoga V., Slobodian O.
KEY DIRECTIONS OF CELLULAR NETWORK RESEARCH ON THE WAY TO 6G (REVIEW)

Modern cellular communication networks are developing at a very fast pace. The advent of 5G mobile technology is already showing signs of becoming a major enabler of productivity and is expected to be a key enabler for highly anticipated, highly integrated and autonomous applications in many sectors. This new wave of technology will accelerate the digitalization of the economy and society. Full deployment of fifth-generation commercial networks has begun around the world. In these networks, very high indicators of the quality of subscriber service are achieved. However, with the development of cellular technologies and the digital society in general, fundamentally new use cases arise that will require even more improved indicators of the effectiveness of the functioning of cellular communication networks. In this regard, progress does not stand still and the 3GPP organization has developed a plan for the development of cellular networks, improving their characteristics and putting them into operation. The next generation of mobile communication networks will be 6G. Research on the way to 6G is planned for this decade and, accordingly, is already taking place, and full launch into commercial operation is planned for 2030. That is why this study examines mobile technologies on the way to 6G. In particular, the work presents a high-level vision of the 6G ecosystem, analyzed potential requirements, and new emerging challenges. Thus, the main goal of this work is to carry out a critical analysis of the latest improvements made in the 5G mobile system, to identify their shortcomings and, accordingly, directions for improvement. The evolution and enhanced features of 5G have also been analyzed in detail to anticipate critical requirements for 6G while highlighting their new capabilities. Several potential scenarios of 6G applications were proposed, their advantages and basic concepts were discussed. Based on this, the main directions of research were formed with the aim of improving cellular networks on the way to 6G. And it is clear that these key areas of improvements in cellular networks will become the basis for building a digital wireless world in the future.

Keywords: 5G; 6G; network; technologies; 3GPP.

Стаття надійшла до редакції 15.08.2022 р.
Прийнято до друку 13.09.2022 р.