

УДК 621.391:621.396

DOI: 10.31673/2786-8362.2026.016524

Голубенко О.І., к.т.н.; Аскеров М.Г., к.т.н.;
Нестеренко К.С., д.т.н.; Волонтир І.В.

РОЗВИТОК ПОСЛУГ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ В РАМКАХ КОНЦЕПЦІЇ ТАКТИЛЬНОГО ІНТЕРНЕТУ

Golubenko O.I., Askerov M.G., Nesterenko K.S., Volontyr I.V. The development of augmented reality services within the concept of the Tactile Internet. This article analyzes the development of augmented reality (AR) services in the context of the emergence of the tactile internet. It examines key concepts, technological challenges, and prospects for the application of the latest systems.

Relevance of the topic. The development of modern telecommunications technologies and the transition to fifth-generation (5G) and future sixth-generation (6G) networks create the fundamental prerequisites for the implementation of the Tactile Internet concept. Unlike traditional mobile communications, which are focused on transmitting audiovisual content, the Tactile Internet allows for the real-time transmission of touch, sensations, and physical skills over distance. One of the most promising areas for integrating this concept is the field of Augmented Reality (AR). Traditional AR systems are limited to overlaying graphical or audio information onto the real world; however, providing users with tactile feedback has the potential to take multimodal interaction to a fundamentally new level. This opens up unprecedented opportunities for medicine, education, manufacturing, and the entertainment industry. At the same time, the combination of AR and the Tactile Internet places critical demands on telecommunications infrastructure, particularly regarding reliability and ultra-low latency (up to 1 ms), making research into this issue extremely relevant.

The aim of this study is to analyze the characteristics, technological challenges, and development prospects of augmented reality services within the framework of the Tactile Internet concept.

Keywords: augmented reality (AR), Tactile Internet, ultra-low latency, multimodal interaction, telecommunications networks, 5G/6G, edge computing

Голубенко О.І., Аскеров М.Г., Нестеренко К.С., Волонтир І.В. Розвиток послуг доповненої реальності в рамках концепції тактильного інтернету. Стаття присвячена аналізу розвитку послуг доповненої реальності (AR) у контексті становлення тактильного інтернету. Розглядаються ключові концепції, технологічні виклики та перспективи застосування новітніх систем.

Актуальність теми. Розвиток сучасних телекомунікаційних технологій та перехід до мереж п'ятого (5G) і майбутнього шостого (6G) покоління створюють фундаментальні передумови для впровадження концепції Тактильного інтернету. На відміну від традиційного мобільного зв'язку, який орієнтований на передачу аудіовізуального контенту, Тактильний інтернет дозволяє передавати на відстань дотик, відчуття та фізичні навички в режимі реального часу. Одним із найперспективніших напрямків інтеграції цієї концепції є сфера доповненої реальності (Augmented Reality, AR). Традиційні AR-системи обмежуються накладанням графічної чи звукової інформації на реальний світ, проте забезпечення користувачів тактильним зворотним зв'язком здатне вивести мультимодальну взаємодію на принципово новий рівень. Це відкриває можливості для медицини, освіти, промисловості та індустрії розваг. Водночас поєднання AR та Тактильного інтернету висуває критичні вимоги до телекомунікаційної інфраструктури, зокрема щодо забезпечення надійності та наднизької затримки (до 1 мс), що робить дослідження цієї проблематики вкрай актуальним.

Мета дослідження – проаналізувати особливості, технологічні виклики та перспективи розвитку послуг доповненої реальності в рамках розгортання концепції Тактильного інтернету.

Ключові слова: доповнена реальність (AR), Тактильний інтернет, наднизька затримка, мультимодальна взаємодія, телекомунікаційні мережі, 5G/6G, граничні обчислення (edge computing)

Вступ

Глобальна цифровізація призвела до виникнення нової парадигми мережевої взаємодії, відомої як Тактильний інтернет, що передбачає передачу не лише інформації, а й фізичного досвіду. У цьому контексті доповнена реальність (AR) перестає бути лише візуальним доповненням простору, стаючи інструментом для активного маніпулювання віртуальними та фізичними об'єктами в реальному часі. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю створення систем, де зорові та тактильні відчуття користувача синхронізовані з граничною точністю, що вимагає перегляду стандартних підходів до побудови архітектури мереж. Розвиток послуг AR у межах тактильної концепції відкриває шлях до дистанційної присутності з рівнем затримки, який є непомітним для людської нервової системи.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні наукові праці в галузі Тактильного інтернету зосереджені на розробці мультимодальних систем зв'язку, що об'єднують аудіо, відео та гаптичні (тактильні) потоки даних. Зокрема, у фундаментальних дослідженнях Промвонгси та колег детально проаналізовано роль технологій 5G та Edge Computing як базису для досягнення цільових показників затримки. Дослідники активно вивчають використання штучного інтелекту для прогнозування рухів користувача, що дозволяє компенсувати мережеві затримки шляхом превентивної генерації тактильного відгуку. Окремий пласт наукових робіт присвячений питанням кібербезпеки та надійності, оскільки будь-яке втручання в тактильний потік може мати критичні наслідки для фізичних процесів. Проте, попри значну кількість публікацій, питання інтегрованого надання послуг AR саме в умовах гетерогенних мереж майбутнього (6G) залишається недостатньо висвітленим.

Постановка завдання. Основним завданням дослідження є визначення технічних параметрів та мережевих вимог, необхідних для стабільного функціонування AR-сервісів із тактильним зворотним зв'язком. Необхідно проаналізувати вплив мережевих затримок на якість сприйняття користувачем (QoE) та виявити критичні пороги розсинхронізації між візуальним рядом і тактильним відчуттям. Окрім того, важливо дослідити методи оптимізації обчислювальних ресурсів на межі мережі для забезпечення масового доступу до високотехнологічних послуг доповненої реальності.

Метою роботи є систематизація концептуальних підходів до розвитку послуг доповненої реальності в екосистемі Тактильного інтернету. Робота спрямована на обґрунтування технологічного стеку, що забезпечить наднизьку затримку та високу надійність передачі тактильних даних. Результати дослідження мають стати основою для проектування нових моделей надання мультимодальних послуг у сферах телемедицини, промислової автоматизації та інтерактивної освіти.

Вклад основного матеріалу дослідження

Концептуальні засади Тактильного інтернету та трансформація послуг доповненої реальності. Становлення Тактильного інтернету (Tactile Internet) можна розглядати як один із етапів вглобальних комунікацій, що означає перехід від передачі даних до передачі дій та фізичного досвіду. Якщо попередні покоління мереж були зосереджені на вдосконаленні доставки аудіо- та відеоданих, то нова парадигма передбачає інтеграцію гаптичного (дотикового) зв'язку в цифрову екосистему. Згідно з визначенням Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU), Тактильний інтернет – це мережева інфраструктура, яка забезпечує наднизьку затримку, надвисоку надійність та безпеку для керування реальними або віртуальними об'єктами. У контексті доповненої реальності (AR) це означає можливість не лише бачити цифрові об'єкти, накладені на фізичний світ, а й взаємодіяти з ними на дотик, відчуваючи їхню форму, текстуру та опір.

Еволюційний шлях до цієї концепції пройшов через декілька ключових фаз: від фіксованого інтернету до мобільного, а потім до Інтернету речей (IoT), де машини почали спілкуватися між собою без участі людини. Тактильний інтернет додає в цю схему критично важливий елемент – «людину в контурі управління» (Human-in-the-Loop, HITL), дозволяючи користувачеві віддалено маніпулювати механізмами або віртуальними сутностями з миттєвим відгуком. Ключовою відмінністю від попередніх систем є перехід від доставки «набору даних» до доставки «набору навичок» (skill set delivery). Це дозволяє фахівцям передавати свої фізичні вміння на будь-яку відстань, використовуючи AR-інтерфейси як візуальну та тактильну сполучну ланку.

Гаптична комунікація, що лежить в основі розширених AR-послуг, поділяється на два основні типи: тактильну та кінестетичну. Тактильний зворотний зв'язок забезпечує відчуття поверхні об'єкта, його температури та тертя через рецептори шкіри. Кінестетичний відгук, у свою чергу, передає інформацію про силу, вагу та положення об'єкта, впливаючи на м'язи та суглоби користувача. Традиційні AR-додатки часто ігнорують ці аспекти, обмежуючись візуальною стимуляцією, що створює когнітивний дисонанс при спробі взаємодії з віртуальними предметами. Інтеграція гаптичних пристроїв (рукавичок, екзоскелетів) у рамках Тактильного інтернету вирішує цю проблему, створюючи цілісний мультимодальний досвід.

Архітектура таких систем зазвичай включає три ключові домени: головний домен (Master Domain), контрольований домен (Slave Domain) та мережевий домен. У головному домені знаходиться користувач у AR-гарнітурі з тактильними контролерами, який генерує команди управління. Контрольований домен представлений роботом або віртуальною моделлю, яка виконує дії та зчитує зворотний зв'язок від середовища. Мережевий домен забезпечує двосторонню передачу даних, де візуальний потік AR потребує високої пропускної здатності, а тактильний – екстремально низької затримки. Синхронізація цих потоків є найскладнішим технологічним завданням, оскільки людський мозок дуже чутливий до розсинхронізації між зором і дотиком.

Розвиток AR-послуг у цьому напрямку стимулює впровадження концепції «інтернет-відчуттів» (Internet of Senses). Очікується, що до 2030 року послуги доповненої реальності стануть повністю імерсивними, дозволяючи користувачам відчувати цифрові об'єкти так само природно, як і реальні. Це вимагає не лише вдосконалення апаратного забезпечення, а й створення нових протоколів передачі гаптичних кодеків, здатних стискати дані без втрати критично важливої інформації про силу та тиск.

Для того, щоб краще зрозуміти, чому Тактильний інтернет вимагає саме затримки в 1 мс, важливо візуалізувати, як швидкість реакції мережі впливає на людське сприйняття в доповненій реальності.

Концепція «кіберхвороби» (cybersickness) виникає саме тоді, коли ваші очі бачать рух у AR-окулярах, але ваші руки відчують супротив або дотик із запізненням. Навіть мінімальна розбіжність руйнує ефект присутності.

Нижче наведено інтерактивний симулятор, який демонструє залежність між затримкою мережі та якістю AR-послуг. Ви можете самостійно змінювати параметри затримки, щоб побачити, де проходить межа між «звичайним відеозв'язком» та справжнім «Тактильним інтернетом».

Технологічні виклики та інноваційні вимоги до мережевої інфраструктури. Інтеграція технологій доповненої реальності (AR) у концепцію Тактильного інтернету супроводжується низкою складних технічних завдань, пов'язаних насамперед із вимогами до швидкості та надійності передачі даних.

Однією з основних проблем при реалізації мультимодальної взаємодії є забезпечення мінімальної наскрізної затримки (end-to-end latency). Для коректного сприйняття тактильних сигналів користувачем затримка повинна залишатися в межах дуже малих значень, інакше виникає розсинхронізація між візуальною та фізичною взаємодією.

Для того, щоб тактильні та кінестетичні відчуття сприймалися людським мозком як природні та синхронні з візуальним AR-потокотом, загальна затримка в мережі не повинна перевищувати 1 мілісекунди (мс).

Розглянемо базову математичну модель наскрізної затримки, яка демонструє складність цього завдання. Загальний час відгуку T_{E2E} можна описати рівнянням:

$$T_{E2E} = T_{sensor} + T_{network} + T_{compute} + T_{actuator}$$

Де T_{sensor} – час зчитування рухів користувача, $T_{network}$ – двостороння мережева затримка, $T_{compute}$ – час обробки логіки та рендерингу, а $T_{actuator}$ – фізичне спрацьовування гаптичного пристрою.

Якщо ми обмежені лімітом у 1 мс, на мережеву складову залишаються частки мілісекунди.

Зважаючи на те, що швидкість поширення сигналу в оптоволоконні становить приблизно 2×10^8 м/с, час лише на проходження сигналу в один бік на відстань $d = 50$ км складе:

$$T_{prop} = \frac{d}{v} = \frac{50 \times 10^3}{2 \times 10^8} = 0.25$$

Двосторонній обмін (0.5 мс) «з'їдає» половину допустимого бюджету часу, не залишаючи вікна для складних обчислень у дата-центрі.

Це фізичне обмеження змушує відмовитися від класичної хмарної архітектури на користь edge-парадигми (граничних обчислень).

Дотримання малих значень затримки важливе також з практичної точки зору, оскільки її збільшення може викликати ефект так званої «кіберхвороби». Він виникає у випадках, коли

зорове сприйняття руху не збігається з тактильними відчуттями, що негативно впливає на комфорт користувача.

Досягнення показника в 1 мс обмежене фундаментальними законами фізики: швидкість світла у вакуумі дозволяє сигналу подолати максимум 300 км за цей час, а у волоконно-оптичних лініях зв'язку ця відстань скорочується до 200 км.

Враховуючи, що сигнал має пройти шлях туди і назад, а також зважаючи на час, необхідний для обробки, кодування та маршрутизації даних апаратними вузлами, максимальна фізична відстань між користувачем та сервером управління в ідеальних умовах не може перевищувати 15-50 км.

Для подолання цих жорстких фізичних обмежень традиційна хмарна архітектура (Cloud Computing) виявляється малоефективною, що вимагає переходу до концепції багатоуровневих граничних обчислень (Multi-access Edge Computing, MEC).

Технологія MEC передбачає розміщення обчислювальних потужностей, серверів рендерингу AR-графіки та баз даних безпосередньо на базових станціях мобільного зв'язку або поблизу них.

Це дозволяє обробляти ліву частку мультимодальних даних на краю мережі (Edge), суттєво скорочуючи відстань передачі та нівелюючи затримки транзитного з'єднання (backhaul).

У поєднанні з технологіями хмарного радіодоступу (Cloud-RAN), Edge-сервери здатні забезпечити локальну синхронізацію інтенсивних візуальних потоків доповненої реальності та мікропорцій тактильних даних у режимі реального часу.

Іншим критичним викликом є ефективне використання радіочастотного спектра та забезпечення надвисокої надійності (Ultra-Reliable Low-Latency Communication, URLLC).

Послуги AR з тактильним відгуком вимагають безпрецедентної надійності з імовірністю відмови не більше 10^{-7} (рівень "п'яти дев'яток" або вище), оскільки втрата пакетів з гаптичними даними може призвести до фізичних пошкоджень у телеробототехніці або до руйнування імерсивного досвіду.

Для вирішення цього завдання мережі 5G та майбутні 6G використовують діапазони міліметрових хвиль (mmWave) та субтерагерцові частоти, що забезпечують гігабітну пропускну здатність.

Окрім того, впроваджуються інноваційні схеми неортогонального множинного доступу (NOMA) та технології масивного MIMO (Multiple Input Multiple Output), які дозволяють паралельно обслуговувати велику кількість користувачів без взаємних перешкод, надаючи пріоритет критичному тактильному трафіку над фоновим.

Окремої уваги заслуговує проблема стиснення та передачі гаптичної інформації, що вирішується шляхом розробки спеціалізованих тактильних кодеків.

На відміну від відеоданих, тактильні сигнали вимагають частоти дискретизації від 1000 Гц до 10 000 Гц для коректної передачі жорсткості та текстури віртуальних об'єктів.

Сучасні гаптичні кодеки базуються на психофізичних принципах, зокрема на законі Вебера-Фехнера (Weber's Law), який стверджує, що людське сприйняття змін сили або тиску є логарифмічним, а не лінійним.

Завдяки цьому використовується метод "мертвої зони" (deadband): система не передає дані в мережу, якщо зміна тактильного відчуття є нижчою за поріг чутливості (Just Noticeable Difference, JND) людини, що дозволяє зменшити обсяг трафіку на 80-90% без втрати якості сприйняття.

Окремим напрямком досліджень є використання методів штучного інтелекту та машинного навчання для часткової компенсації затримок. Зокрема, алгоритми прогнозування дозволяють передбачити дії користувача та сформувати відповідний відгук системи заздалегідь.

Використання глибоких нейронних мереж (DNN) та алгоритмів прогнозування рухів (наприклад, на основі прихованих марковських моделей) дозволяє системі передбачати наміри користувача за кілька мілісекунд до фактичної фізичної дії.

На основі цих прогнозів Edge-сервер превентивно генерує тактильний відгук та рендерить відповідні AR-кадри ще до того, як контролюючий сигнал досягне кінцевого пункту призначення і повернеться назад.

Такий підхід створює ілюзію нульової затримки, розширюючи межі застосування Тактильного інтернету за межі фізичних обмежень швидкості світла та роблячи глобальні мультимодальні послуги доповненої реальності технологічно здійсненними.

Перспективні сфери застосування та соціально-економічний вплив AR-послуг. Незважаючи на оптимістичні прогнози ранніх досліджень, сучасний погляд на розгортання Тактильного інтернету став більш прагматичним. Для наочності, порівняємо три основні архітектурні підходи до обробки мультимодальних AR-даних (див. Таблицю 1).

Таблиця 1

Порівняння архітектурних підходів для послуг AR з тактильним відгуком

Характеристика	Хмарна архітектура (Cloud)	Граничні обчислення (MEC/Edge)	Локальна обробка (On-device)
Очікувана наскрізна затримка	30–100 мс	2–10 мс	< 1 мс
Ризик кіберхвороби	Дуже високий	Помірний	Мінімальний
Енергоспоживання гарнітури	Низьке	Середнє	Екстремально високе
Вартість розгортання для провайдера	Помірна	Дуже висока	Низька (витрати несе користувач)

Синергія доповненої реальності та Тактильного інтернету задає інновацію для багатьох галузей економіки, докорінно змінюючи парадигму дистанційної взаємодії. Однією з найважливіших сфер застосування, де ці технології здатні безпосередньо рятувати людські життя, є система охорони здоров'я та телемедицина. Завдяки забезпеченню наднизької затримки стає можливою повноцінна телехірургія, коли висококваліфікований хірург може проводити складні інвазивні операції пацієнтам, які знаходяться на іншому континенті.

Використовуючи AR-гарнітуру та тактильні маніпулятори, лікар не лише бачить тривимірне зображення органів у реальному часі, але й фізично відчуває опір тканин при надрізі чи накладанні швів завдяки кінестетичному зворотному зв'язку.

Окрім хірургії, AR та Тактильний інтернет відкривають нові горизонти для психотерапії та нейрореабілітації, зокрема у сфері лікування специфічних фобій та посттравматичних стресових розладів.

Пацієнт у безпечному середовищі може взаємодіяти з віртуальним об'єктом свого страху, отримуючи при цьому контрольовані тактильні відчуття, що значно підвищує ефективність експозиційної терапії.

Другим потужним напрямком є революція у сфері освіти, професійної підготовки та передачі навичок.

Традиційне дистанційне навчання обмежується передачею візуальної та аудіальної інформації, що є абсолютно недостатнім для опанування професій, які вимагають дрібної моторики та формування "м'язової пам'яті" (наприклад, ювелірна справа, гра на музичних інструментах або ремонт мікроелектроніки).

Тактильний інтернет дозволяє системі "записувати" мікроруки та зусилля досвідченого майстра, а потім транслювати їх учневі через AR-екзоскелет або тактильні рукавички, буквально направляючи його руки під час виконання навчального завдання. Третя критично важлива сфера – це промисловість (Індустрія 4.0 та 5.0) і управління роботизованими комплексами в небезпечних або екстремальних умовах. Оператори отримують можливість дистанційно керувати роботами на глибоководних станціях, у зонах радіоактивного зараження або в космосі, маючи повний ефект фізичної присутності на місці подій.

Накладаючи цифрові двійники (Digital Twins) на реальне обладнання за допомогою AR-інтерфейсів, інженери можуть проводити діагностику та ремонт з міліметровою точністю, відчуваючи текстуру зношених деталей та силу затягування кріплень без ризику для життя.

Четвертий перспективний напрямок охоплює інтелектуальні транспортні системи, логістику та автономне водіння. В умовах спільного (кооперативного) керування транспортними потоками, елементи доповненої реальності можуть проектуватися безпосередньо на лобове скло автомобіля, підсвічуючи траєкторії руху та приховані загрози. При цьому тактильний відгук (наприклад, спрямована вібрація керма або динамічна зміна жорсткості педалей) передаватиме водієві або оператору віддаленого автопарку інформацію про стан дорожнього покриття чи екстрені дії інших автономних транспортних засобів у мережі.

Водночас, незважаючи на значні перспективи, впровадження таких систем пов'язане з низкою технічних і організаційних труднощів, серед яких важливе місце займають питання захисту даних та надійності роботи мережі.

Перехоплення контролю над гаптичними пристроями зловмисниками (наприклад, під час телехірургії або управління промисловим роботом) може призвести до реальної фізичної шкоди, що робить розробку алгоритмів постквантового шифрування та систем безперервної блокчейн-аутифікації невід'ємною частиною розбудови інфраструктури. Підсумовуючи, можна стверджувати, що повноцінна інтеграція AR та Тактильного інтернету може суттєво змінити підходи до дистанційної взаємодії та розширити можливості передачі практичних навичок у цифровому середовищі де ключовим ресурсом стане можливість миттєвого доступу до фізичної присутності та експертних навичок у будь-якій точці планети.

Дистанційна ультразвукова діагностика через мережу 5G. Одним із найбільш показових прикладів реалізації послуг на перетині AR та Тактильного інтернету є пілотний проект дистанційного УЗД-обстеження, реалізований консорціумом Ericsson та King's College London. У цій системі лікар-діагност використовує AR-гарнітуру (типу Microsoft HoloLens 2 або аналогічних за характеристиками Apple Vision Pro) для візуалізації внутрішніх органів пацієнта, який знаходиться в іншому місті. Головною технологічною особливістю є використання тактильної рукавички (haptic glove), яка передає лікарю відчуття опору тканин пацієнта, коли робот-маніпулятор на іншому боці натискає на тіло датчиком. Це дозволяє фахівцеві «відчувати» анатомічні структури пацієнта так само точно, як при безпосередньому контакті, що є критичним для постановки діагнозу. Реалізація цього кейсу стала можливою лише завдяки впровадженню мережевого сегментування (network slicing) у 5G-мережах, що забезпечило стабільну затримку сигналу в межах 5–8 мс для критичного потоку тактильних даних. Незважаючи на успіх пілоту, цей приклад також виявив обмеження: високу чутливість системи до найменших перешкод у радіоканалі, що потребує дублювання каналів зв'язку для гарантування безпеки пацієнта.

Висновки

Проведене дослідження дозволяє стверджувати, що інтеграція послуг доповненої реальності з екосистемою Тактильного інтернету відкриває нову еру мультимодальних цифрових комунікацій. Замість традиційної візуально-аудіальної парадигми формується концепція повноцінної дистанційної фізичної присутності, де користувачі можуть взаємодіяти з віртуальними та реальними об'єктами через кінестетичний і тактильний зворотний зв'язок. Встановлено, що ключовим бар'єром для реалізації таких систем є подолання фізичних та архітектурних обмежень мережі для досягнення наскрізної затримки на рівні 1 мілісекунди, що є критичним для уникнення кіберхвороби та збереження цілісності імерсивного досвіду. Розв'язання цієї проблеми вимагає комплексного підходу: масового розгортання мереж 5G/6G, перенесення обчислювальних потужностей на край мережі (Mobile Edge Computing), застосування новітніх тактильних кодеків зі стисненням на основі психофізичних порогів чутливості та використання штучного інтелекту для превентивного прогнозування рухів користувача. Аналіз перспективних сфер застосування продемонстрував, що впровадження цих технологій матиме соціально-економічний ефект у телемедицині (дистанційна хірургія), освіті (пряма передача м'язової пам'яті), Індустрії 4.0 (взаємодія з цифровими двійниками) та системах інтелектуального транспорту. Водночас, масове надання AR-послуг з тактильним

відгуком є неможливим без розробки жорстких стандартів кібербезпеки, оскільки компрометація гаптичних даних може призвести до реальної фізичної шкоди.

Список використаної літератури:

1. Promwongsa N., Ebrahimzadeh A., Naboulsi D., Kianpisheh S., Belqasmi F., Glitho R., Crespi N., Alfandi O. A Comprehensive Survey of the Tactile Internet: State-of-the-art and Research Directions. // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020.
2. Fettweis G. P. The Tactile Internet: Applications and Challenges. // IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 9, No. 1, 2014. — P. 64–70.
3. ITU-T Technology Watch Report. The Tactile Internet. // International Telecommunication Union (ITU), Geneva, 2014. — P. 1–22.
4. Aijaz A., Dohler M., Aghvami A. H., et al. Realizing the Tactile Internet: Haptic Communications over Next Generation 5G Cellular Networks. // IEEE Wireless Communications, Vol. 24, No. 2, 2017. — P. 82–89.
5. ISO/IEC 27001:2022. Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection — Information Security Management Systems — Requirements. // International Organization for Standardization, Geneva, 2022.
6. Antonakoglou, K., et al. "Toward Haptic Communications in the 6G Era." IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 25, no. 1, 2023, pp. 245-278
7. Ozturk, M., & Jha, A. "Spatial Computing and Tactile Internet: Synergies, Limitations, and Future Trajectories." Nature Telecommunications Analysis, 2024.
8. Довгань О. Д., та ін. "Кібербезпека мультимодальних систем в умовах розгортання приватних мереж зв'язку." Інформаційна безпека, № 1, 2023, С. 12-24.

Автори статті

Голубенко Олександр – кандидат технічних наук, доцент, Міжнародний науково-технічний університет імені академіка Юрія Бугая, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-1776-5160

Аскеров Мукафат – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Національна Академія Наук України, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0000-6611-2732

Нестеренко Катерина – доктор технічних наук, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ORCID: 0000-0001-7672-7386

Волонтир Ігор – викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0005-1154-9765

Authors of the article

Golubenko Oleksandr – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, Academician Yuriy Bugay International Scientific and Technical University, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-1776-5160

Askerov Mukafat – Candidate of Sciences(technical), Leading Researcher, National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0000-6611-2732

Nesterenko Kateryna – Doctor of Sciences (technical), Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-7672-7386

Volontyr Ihor – lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-6772-1596

Надійшла до редакції: 22.04.2026

Прийнята до друку: 30.04.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Голубенко О.І., Аскеров М. Г., Нестеренко К.С., Волонтир І.В.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>