

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ І СТАНДАРТІВ: ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА 2024 РІК

Madinov M.L., Rudenko N.V. Current trends in the development of network technologies and standards: an overview of research for 2024. This study is aimed at analysing the current capabilities of information and communication (fibre optics technology consortium and telecommunications industry associations for the development, implementation and improvement of standards) and networking technologies, with a particular focus on the study and research of Ethernet and 5G networks. The relevance of this study lies in the need to review the study of technology integration, development of relevant standards and ensuring their widespread implementation, which requires a detailed study of current trends, trends and innovations, as well as possible ways to address existing challenges.

Based on the review of research for 2024, it was found that IEEE 802.3 standards are constantly being used, implemented and improved. The paper considers the Ethernet standards IEEE 802.3bt, IEEE 802.3bz, IEEE P802.3cw, IEEE P802.3df, and IEEE P802.3dj.

Based on the analysed material, the main trends in the development and implementation of Wi-Fi technologies for 2024 were studied, where the main issues related to achievements, comparison of Wi-Fi, 5G and 6G technologies and networks, as well as the possibility of using network technologies in combination with smart technologies were investigated. After analysing the research materials, special attention was paid to the main challenges and problems of Wi-Fi development in 2024 (frequency spectrum congestion, security, energy consumption and infrastructure costs), which remains relevant today. The study suggests that, given global trends and forecasts, Ukraine should embark on the development and implementation of 5G networks, which is more rational, as 4G networks require significant financial investments and may take a long time to roll out, and once 5G networks are in place in Ukraine, 6G networks will start to gain popularity globally.

Keywords: standard, IEEE 802.3, consortium, Wi-Fi, Internet of Things, Ethernet, 5G and 6G

Мадінов М.Л., Руденко Н.В. Сучасні тенденції розвитку мережеских технологій і стандартів: огляд досліджень за 2024 рік. Дане дослідження спрямоване на проведення аналізу сучасних можливостей інформаційно-комунікаційних (консорціум технологій волоконної оптики та асоціації телекомунікаційної галузі з метою розвитку, впровадження та вдосконалення стандартів) та мережеских технологій, де особливу увагу було сконцентровано на вивченні та дослідженні Ethernet та 5G-мереж. Актуальність даного дослідження полягає в необхідності проведення огляду вивчення питань інтеграції технологій, розробки відповідних стандартів та забезпечення їх широкого впровадження, що потребує детального дослідження сучасних тенденцій, трендів та інновацій, а також можливих шляхів вирішення існуючих викликів.

На основі проведеного огляду досліджень за 2024 рік було з'ясовано, що стандарти IEEE 802.3 невинно використовуються, впроваджуються та вдосконалюються. В роботі розглядалися стандарти Ethernet IEEE 802.3bt, IEEE 802.3bz, IEEE P802.3cw, IEEE P802.3df та IEEE P802.3dj.

На основі проаналізованого матеріалу було досліджено основні тенденції розвитку та впровадження технологій Wi-Fi за 2024 рік, де було досліджено основні питання, які стосуються досягнень, порівняння технологій та мереж Wi-Fi, 5G та 6G, а також можливості застосування мережеских технологій в поєднанні з розумними технологіями. Проаналізувавши матеріали наукових досліджень особливої уваги було приділено основним викликам та проблемам розвитку Wi-Fi у 2024 році (перевантаження частотного спектру, безпека, енергоспоживання та інфраструктурні витрати), що залишається досі актуальним на сьогодні. В якості результатів дослідження було зроблене припущення, що з огляду на світові тенденції та прогнози Україні варто взяти курс на розвиток та впровадження 5G-мереж, що є більш раціональним, так як 4G-мережі потребують значних фінансових вкладень, а на поширення даних мереж може знадобитися доволі довгий час, а коли в Україні з'явиться 5G-мережі, то в світі почне набувати популярності мережі 6G.

Ключові слова: стандарт, IEEE 802.3, консорціум, Wi-Fi, Інтернет речей, Ethernet, 5G та 6G

Вступ

Сучасні мережескі технології стають фундаментом для розвитку цифрової інфраструктури, забезпечуючи швидку, надійну та безперебійну передачу даних, де одним з ключових напрямків цього розвитку є оптичні технології, які забезпечують високу швидкість, надійність та масштабованість мереж. Проте, стрімкий розвиток технологій передачі даних вимагає

постійного вдосконалення мережевої інфраструктури для задоволення зростаючих потреб користувачів і бізнесу [1].

Водночас з цим зростання обсягу інформації, яку передають через глобальні мережі, поширення Інтернету речей, впровадження технологій 5G та підготовка до 6G ставлять перед галуззю нові виклики. У цьому контексті особливого значення набуває робота ТІА (Telecommunication Industry Association) консорціуму технологій волоконної оптики (КТВО), який сприяє розробці стандартів і впровадженню передових оптичних технологій. Впровадження нових стандартів і технологій в контексті роботи ТІА КТВО стикається на своєму шляху з деякими проблемами, які в свою чергу потребують детального аналізу [2]. До таких проблем можна віднести наступні 3 основні фактори [2-4].

1. Зростання потреб у пропускній здатності, де сучасні телекомунікаційні мережі повинні справлятися з колосальними обсягами даних, що передаються в режимі реального часу. Зі зростанням обсягів переданих даних та збільшенням кількості підключених пристроїв (зокрема, в рамках Інтернету речей та мобільних мереж, таких як 5G та наступне покоління 6G) виникає необхідність у вдосконаленні існуючих стандартів для забезпечення більшої пропускної здатності та стабільності з'єднань, що є особливо актуальним для великих дата-центрів та телекомунікаційних компаній, які стикаються зі зростаючим навантаженням на інфраструктуру.

2. Впровадження нових оптичних мереж вимагає значних інвестицій, що може бути складним для багатьох операторів і підприємств. Оптичні мережі можуть потребувати значних інвестицій у впровадження та підтримку, що створює додаткові бар'єри для широкого розповсюдження новітніх технологій, де в умовах обмеженого бюджету та економічної невизначеності оператори часто можуть стикатися з труднощами у виборі оптимальних рішень для модернізації своїх мереж.

3. Інтеграція нових технологій з існуючими мережами, де розвиток 5G, Інтернету речей та периферійних обчислень може потребувати ефективної взаємодії між різними типами мереж. Тому сучасні тенденції, зокрема інтеграція оптичних мереж з іншими типами інфраструктури можуть вимагати нових стандартів, які дозволять забезпечити сумісність та синхронізацію різних технологій. Однак процес інтеграції новітніх оптичних стандартів з іншими технологіями стикається з проблемами сумісності та оптимізації інфраструктури. Розробка таких стандартів, а також гарантування їхньої безпеки та енергоефективності є складним процесом, який потребує узгодженості між учасниками ринку, зокрема такими організаціями, як ТІА КТВО.

Теоретична значущість дослідження полягає в узагальненні та систематизації новітніх знань про розвиток мережевих технологій та стандартів у 2024 році. У статті аналізуються сучасні підходи до побудови мережевих інфраструктур, включаючи стандарти Ethernet, Wi-Fi, Інтернет речей, а також новітні рішення у сфері мережевої безпеки. Це дослідження сприятиме поглибленню розуміння процесів, які впливають на сучасні мережеві рішення, і може слугувати базою для подальших наукових досліджень у галузі інформаційних технологій та комунікацій.

Практична значущість роботи полягає в можливості застосування результатів дослідження для планування та модернізації мережевих інфраструктур у різних галузях, таких як телекомунікації, ІТ-сфера, промисловість та розумні міста. Виявлені тенденції розвитку стандартів Ethernet, Wi-Fi, Інтернет речей, а також нові підходи до забезпечення безпеки можуть бути корисними для інженерів, адміністраторів мереж та ІТ-спеціалістів під час проектування та впровадження сучасних мережевих рішень. Крім того, робота надає рекомендації щодо підвищення ефективності та надійності мережевих технологій, що є важливим для забезпечення сталого розвитку цифрової інфраструктури.

Актуальність даного дослідження полягає в необхідності проведення огляду вивчення питань інтеграції технологій, розробки відповідних стандартів та забезпечення їх широкого впровадження, що потребує детального дослідження сучасних тенденцій, трендів та інновацій, а також можливих шляхів вирішення існуючих викликів.

Аналіз останніх досліджень. Сучасний розвиток інформаційних технологій вимагає постійного вдосконалення мережевої інфраструктури, зокрема локальних обчислювальних мереж (LAN), безпроводних локальних мереж (WLAN) та технології безпроводного зв'язку, які є ключовими елементами цифрових середовищ. Основними рушіями змін стали зростання обсягу даних, поширення Інтернету речей, розгортання мереж 5G та розвиток хмарних обчислень [4-5]. Завдяки останнім досягненням мережа WLAN та технологій Wi-Fi були успішно використані для реалізації функцій зондування, таких як виявлення, локалізація та розпізнавання. Однак стандарти WLAN розроблені виключно з метою зв'язку, через що не можуть повністю відповідати сучасним вимогам для нових програм зондування [3, 6].

Локальні мережі продовжують розвиватися підлаштовуючись під вимоги сучасного цифрового середовища та інтеграції з новими технологіями, наприклад, адаптація до нових технологічних викликів, таких як Інтернет речей, хмарні обчислення та зростаючі обсяги даних. Стандарти, що визначають локальні мережі відіграють ключову роль у забезпеченні сумісності, надійності та безпеки цих систем. [7].

У 2024 році розвиток мережевих технологій і стандартів набув значного прискорення завдяки стрімкому поширенню таких тенденцій, як впровадження 5G і 6G, розширення мереж Інтернету речей, а також вдосконалення оптичних технологій для передачі даних. Аналіз літератури за 2024 рік дозволяє продемонструвати, як стандарти локальних мереж продовжують адаптуватися до нових технологій та вимог. Інтернет, 5G та 6G залишаються ключовими технологіями, що забезпечують високошвидкісну передачу даних. Зростання кількості «розумних» пристроїв вимагає нових рішень для оптимізації передачі даних і управління великомасштабними мережами. Тому новітні дослідження в галузі мережевих технологій демонструють значний прогрес у підвищенні швидкості, ефективності та надійності інфраструктури передачі даних [8-9].

Мережі 5G стають основою для таких інноваційних технологій, як автономний транспорт, доповнена реальність, розумні міста тощо. В окремих дослідженнях висвітлено основні досягнення розвитку мережі 5G з різними комбінаціями, наприклад, роботах [10-12] висвітлено мережі 5G у поєднанні з безпілотними літальними апаратами, а також з Інтернетом речей в медицині та автономним транспортом. Основними напрямками досліджень у 2024 році є оптимізація інфраструктури 5G для більшої енергоефективності [13], зменшення впливу на навколишнє середовище [14] та інтеграція з технологіями Інтернет речей [11].

Проаналізувавши глобальну тенденцію та прогнози, Україні варто тримати курс на розвинення мережевих технологій та проектування 5G мереж, так як проектування 5G мережі є більш раціональним на відміну від 4G. В роботі [15] авторами зазначено наступне порівняння: 4G мережі можуть потребувати значних фінансових вкладень порівняно з 5G; на поширення даних мереж може знадобитися багато років та часу; затрати часу можуть безпосередньо вплинути на відсталість передових технологій, наприклад, коли будуть спроектовані та поширені 4G мережі в Україні, то водночас з цим виявиться, що у світі більшої популярності почне набувати 5G мережі.

Зростання кількості підключених пристроїв Інтернет речей продовжує впливати на розвиток мережевих технологій. У 2024 році очікується понад 50 мільярдів підключених пристроїв, що потребують надійного та швидкого обміну даними. Основними викликами є безпека, стандартизація та оптимізація управління мережею для екосистем Інтернету речей [16].

Одним із найбільш вагомих напрямків розвитку мережевих технологій у 2024 році стало вдосконалення оптичних мереж. Оптичні технології відіграють важливу роль у забезпеченні високошвидкісного інтернету, особливо для центрів обробки даних та магістральних мереж. Стандарти IEEE 802.3bs та IEEE 802.3cd, що підтримують швидкості передачі 200 Гбіт/с та 400 Гбіт/с, стали основою для розвитку оптоволоконних мереж, що забезпечують швидку та надійну передачу великих обсягів даних [6].

Безпека мереж стає одним із ключових питань у 2024 році через збільшення кількості підключених пристроїв та зростаючий обсяг даних, що передаються. Одним із головних

підходів до забезпечення безпеки мереж є впровадження Zero Trust Architecture (ZTA), що передбачає перевірку кожного пристрою чи користувача на всіх рівнях доступу до мережі [4, 17].

Окрім того, розвиток стандартів IEEE 802.1X для автентифікації на рівні мережі та протоколів захисту даних у Wi-Fi (наприклад, WPA3) стали важливими кроками у посиленні захисту мережевих екосистем від кіберзагроз [18].

Тому 2024 рік знаменується розвитком та вдосконаленням мережевих технологій, що демонструє інтеграцію інновацій, які дозволяють не тільки підвищити швидкість та надійність передачі даних, але й забезпечити енергоефективність, безпеку та гнучкість мережевих систем. Широке впровадження 5G, розвиток технологій Інтернету речей та оптичних мереж, а також новітні підходи до забезпечення безпеки стають рушійними силами для глобальних телекомунікаційних рішень.

Постановка завдання. Завданням дослідження є наступне: проведення огляду літератури з дослідженням діяльності консорціуму технологій волоконної оптики (КТВО) та Асоціації телекомунікаційної промисловості (ТІА); проаналізувати основні тенденції розвитку та аналіз стану сучасних стандартів Ethernet; проаналізувати основні тенденції розвитку та впровадження технології Wi-Fi у 2024 році з дослідженням основних питань, які стосуються досягнень, порівняння технологій та мереж, а також можливості застосування мережевих технологій в поєднанні з розумними технологіями.

Метою роботи є аналіз сучасних тенденцій розвитку мережевих технологій та стандартів у 2024 році, де стаття покликана систематизувати останні дослідження у сфері мережевих рішень, зокрема розглянути нові та існуючі стандарти Ethernet, Wi-Fi, програмно-визначених мереж, а також вплив Інтернету речей на мережеві інфраструктури.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У даному огляді досліджуються сучасні тенденції, тренди та стандарти мережевих технологій, зокрема розвиток Ethernet та 5G-мереж, які є ключовими компонентами інфраструктури для забезпечення високошвидкісного зв'язку. Особлива увага приділяється вивченню та аналізу діяльності Консорціуму технологій волоконної оптики (КТВО) у співпраці з Асоціацією телекомунікаційної індустрії (ТІА). Відповідно до актуальних викликів і вимог 2024 року, дослідження охоплює стандарти, які є критично важливими для подальшого впровадження інновацій у галузі мережевих технологій, зокрема в контексті масштабування можливостей Ethernet та інтеграції з 5G-мережами.

Основним об'єктом дослідження виступає діяльність КТВО, яке в поєднанні з ТІА відіграє вирішальну роль у розробці специфікацій для новітніх технологій. Окремо розглянуто внесок цих організацій у створення технічних стандартів, що впливають на розвиток інфраструктури як для локальних мереж, так і для широкомасштабних глобальних систем зв'язку.

Дослідження виконано на основі систематичного підходу, який включає кілька основних етапів: аналіз діяльності КТВО (де розглядаються механізми розробки специфікацій і стандартів для волоконно-оптичних систем, їхнього застосування у забезпеченні високошвидкісного інтернету та мережевих рішень); співпраця КТВО та ТІА (де досліджується взаємодія між двома організаціями з метою оптимізації існуючих стандартів і розробки нових для мережевої інфраструктури, зокрема для підтримки розширених можливостей Ethernet та 5G); аналіз сучасних стандартів Ethernet та 5G (де особливий акцент зроблено на вивченні технічних специфікацій, таких як IEEE 802.3 для Ethernet та рекомендації для розгортання 5G-мереж, що забезпечують ефективність і стабільність передачі даних у високонавантажених середовищах).

Діяльність КТВО та співпраця КТВО з ТІА. Центр мережевих інновацій разом з діяльністю КТВО є провідною організацією в рамках Асоціації телекомунікаційної промисловості (ТІА), яка займається розвитком волоконно-оптичних технологій та їх застосуванням в мережах, що служить платформою для лідерів галузі, дослідників та технологій для співпраці, обміну знаннями, а також стимулювання інновацій в галузі

волоконної оптики. Завдяки підтримці таких технологій, як Ethernet і 5G TIA КТВО забезпечує безперервний розвиток високошвидкісних мереж для різних галузей [19]. Розглянемо основні напрямки, види діяльності КТВО, а також сучасні тенденції та стандарти в табл.1, де КТВО бере активну участь у вирішенні сучасних тенденцій та проблем у волоконно-оптичній галузі [20-21].

Таблиця 1

Характеристика основних напрямків, видів діяльності КТВО, тенденцій та стандартів

Основні напрямки та види діяльності КТВО	Сучасні тенденції та стандарти
Розробка стандартів. Консорціум відіграє важливе значення для розробки та підтримки галузевих стандартів для волоконно-оптичних компонентів кабелів і систем. Ці стандарти повинні забезпечувати сумісність, надійність і продуктивність волоконно-оптичних мереж.	Об'єднання центрів обробки даних (DCI). Зростаючий попит на високошвидкісні з'єднання з низькою затримкою між центрами обробки даних посприяв розробці спеціалізованих волоконно-оптичних рішень. FOTC працює над стандартами і керівними принципами для підтримки розгортання DCI.
Наукові та технічні дослідження. Консорціум підтримує науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, спрямовані на вивчення нових волоконно-оптичних технологій та застосувань. Це в свою чергу включає дослідження нових тенденцій, таких як багатомодове волокно, одномодове волокно, мультиплексування з поділом по довжині хвилі і когерентна оптична передача.	Мережі 5G. Волоконна оптика має важливе значення для забезпечення високошвидкісної транспортної інфраструктури, необхідної для мереж 5G. Консорціум бере участь у визначенні вимог до волоконної оптики і специфікацій для розгортання мереж 5G. Окрім того консорціум співпрацює з провідними гравцями галузі для встановлення специфікацій і стандартів, необхідних для розбудови надійної інфраструктури для 5G.
Освіта та навчання. Консорціум пропонує освітні ресурси, навчальні програми та сертифікаційні ініціативи для покращення знань та навичок фахівців, які працюють у галузі волоконної оптики.	Оптичні мережі. Консорціум досліджує передові технології оптичних мереж, такі як когерентна оптична передача і програмовані оптичні мережі, щоб задовольнити зростаючі вимоги до пропускної здатності додатків з інтенсивним використанням даних.
Галузева співпраця. Консорціум сприяє співпраці між зацікавленими сторонами галузі, включаючи виробників, постачальників послуг і кінцевих користувачів. Співпраця сприяє вирішенню спільних проблем, визначенню ринкових можливостей та прискоренню впровадження волоконно-оптичних технологій.	

TIA в поєднанні з КТВО містять 5 основних напрямків роботи, а саме:

1) розвиток оптоволоконних стандартів, де TIA КТВО активно працює над створенням стандартів для оптоволоконних технологій, які відіграють важливе значення для швидкої передачі даних на довгі відстані (ці стандарти допомагають оптимізувати побудову інфраструктури для підтримки високих швидкостей передачі даних, таких як 100 Гбіт/с, 400 Гбіт/с, і навіть більше;

2) підтримка Ethernet стандартів, де TIA активно бере участь у розробці стандартів для Ethernet, зокрема таких як IEEE 802.3, що дозволяє підтримувати високі та швидкісні з'єднання для мережевих додатків (останні розробки включають стандарти для 400 Гбіт/с

Ethernet та 800 Гбіт/с Ethernet, що відповідає зростаючим вимогам дата-центрів і корпоративних мереж);

3) інфраструктура для 5G, що є одним з найважливіших напрямків для підтримки стандартів і технологій для 5G-мереж, що вимагають високої пропускної здатності та мінімальних затримок (оптоволокну є ключовим компонентом інфраструктури для 5G, оскільки забезпечується надійне та швидке підключення для великих обсягів даних);

4) розвиток стандартів для центрів обробки даних (ЦОД), де ТІА КТВО розробляє стандарти, які забезпечують ефективне підключення між серверами, системами зберігання та мережевими інтерфейсами, дозволяючи мінімізувати затримки та збільшити швидкість обробки даних;

5) стандарти для інтелектуальних будівель, де окрім телекомунікацій ТІА КТВО займається стандартами для інтелектуальних будівель, що інтегрують оптоволоконні мережі для різних автоматизованих систем, таких як енергетика, безпека та управління.

Сучасні тенденції розвитку мережевих технологій і стандартів. Телекомунікаційна галузь зазнає стрімких змін завдяки швидкому розвитку технологій передачі даних, де одним з таких рушіїв цих змін є ТІА КТВО, який відіграє провідну роль у розробці стандартів та впровадженні інновацій в оптичних мережах. У 2024 році консорціум зосередився на розвитку нових мережевих технологій, які забезпечують підвищену продуктивність, надійність та масштабованість оптичних систем. Для того, щоб краще зрозуміти основні тенденції та стандарти, що впливають на розвиток мережевих технологій розглянемо табл. 2, в якій наведено характеристику основних критеріїв, які повинні відповідати сучасним вимогам.

Таблиця 2

Характеристика основних тенденцій та стандартів мережевих технологій за 2024 рік

Критерії	Характеристика та пояснення
Підвищення швидкості передачі даних в оптичних мережах	Одним із головних трендів у 2024 році є впровадження високошвидкісних оптичних мереж, які здатні забезпечувати пропускну здатність на рівні 400 Gbps і вище. Завдяки розробкам ТІА КТВО, новітні стандарти, такі як IEEE 802.3bs і IEEE 802.3cd, стали фундаментом для високошвидкісних Ethernet-мереж. Ці стандарти забезпечують передачу даних із використанням вдосконалених методів модуляції, таких як PAM4 (4-рівнева амплітудна модуляція), що дозволяє ефективніше використовувати пропускну здатність і зменшити втрати сигналу.
Поширення пасивних оптичних мереж	У 2024 році пасивні оптичні мережі (PON) продовжують набирати популярність завдяки їхній здатності забезпечувати високошвидкісний доступ до інтернету без активних компонентів на маршруті передачі даних. Серед новітніх стандартів виділяються 10G-PON і 25G-PON, які дозволяють значно підвищити швидкість передачі даних до кінцевих користувачів, що особливо важливо для комерційних та житлових зон з високою щільністю населення. ТІА КТВО активно підтримує розвиток цих стандартів, що забезпечує ефективне розгортання широкосмугових послуг на рівні як операторів зв'язку, так і постачальників послуг доступу до інтернету.
Інновації в конструкції оптичних кабелів	Одним із ключових напрямів роботи ТІА КТВО у 2024 році є розробка нових типів оптичних волокон, які мають покращені характеристики передачі сигналу. Основними нововведеннями є створення оптичних волокон зі зниженою чутливістю до вигинів, які дозволяють зменшити втрати сигналу навіть в умовах складних трас кабелів у міських та промислових зонах. Ці нові типи кабелів відкривають можливості для більш гнучких та економічно вигідних рішень, що дозволяють операторам мереж підвищувати якість зв'язку навіть у найскладніших умовах.

Продовження таблиці 2

Характеристика основних тенденцій та стандартів мережевих технологій за 2024 рік

Критерії	Характеристика та пояснення
Стандартизація для Інтернету речей та 5G	У 2024 році ТІА активно працює над гармонізацією стандартів для оптоволоконних мереж, які підтримують технології 5G та Інтернету речей. Розширення 5G-інфраструктури вимагає від мереж високої швидкості та низьких затримок, що сприяє ще більшій залежності від оптичних мереж для забезпечення стабільної та швидкої передачі даних. Оптичні технології також стають невід'ємною частиною мережевої інфраструктури для Інтернету речей, де необхідна передача великих обсягів даних між пристроями з мінімальними затримками. Тому стандарти, розроблені консорціумом, сприяють більш ефективному розгортанню інтелектуальних міських мереж, систем моніторингу та автономних транспортних рішень.
Оптичні мережі для дата-центрів	Зростання попиту на хмарні обчислення та великі обсяги даних у 2024 році стимулює розвиток оптичних технологій у центрах обробки даних. Стандарти, розроблені ТІА, дозволяють оптимізувати внутрішні мережі дата-центрів, забезпечуючи швидку та ефективну передачу даних між серверами та зменшуючи затримки. Технології OM5 (багатомодові волокна для передачі кількох хвиль) стали новітнім рішенням для дата-центрів, дозволяючи значно збільшити пропускну здатність без необхідності використання значно більших кількостей кабелів.
Безпека та енергоефективність мереж	У 2024 році безпека мереж стає одним із ключових аспектів розвитку оптичних технологій. ТІА КТВО приділяє велику увагу розробці стандартів, що забезпечують захист даних, які передаються через оптичні мережі. Окрім того, важливим напрямом є підвищення енергоефективності мереж, зокрема за рахунок впровадження технологій Energy Efficient Ethernet (EEE), які знижують соживання енергії за умов низького навантаження.

Тенденції розвитку та аналіз стану сучасних стандартів Ethernet. Останні оновлення стандартів Ethernet у 2024 році значно впливають на продуктивність локальних мереж, де в центрі уваги опинилися нові стандарти, такі як IEEE 802.3bt для Power over Ethernet (PoE), що підтримує передачу до 100 Вт енергії по мережевому кабелю. Це в свою чергу значно розширює можливості підключення для великої кількості пристроїв Інтернет речей, зокрема камер спостереження, точок доступу Wi-Fi, а також інших пристроїв, які потребують одночасної передачі даних і енергії. Іншим стандартом є також IEEE 802.3bz, який пропонує швидкості передачі даних 2.5G та 5G Ethernet для існуючих мідних кабелів, що дозволяє організаціям збільшити швидкість передачі даних без необхідності модернізації всієї інфраструктури.

IEEE 802.3bt: Розширений стандарт Power over Ethernet (PoE). Цей стандарт, розроблений для значного збільшення можливостей технології PoE, дозволяючи передавати більше енергії через кабель Ethernet одночасно з даними. Він призначений для підтримки живлення більш потужних пристроїв без необхідності в додаткових джерелах живлення, що робить його важливим у розвитку інтелектуальних мереж та Інтернет речей. До основних характеристик стандарту можна віднести наступне: збільшення потужності, де стандарт дозволяє передавати до 60 Вт (тип 3, PoE++) та 100 Вт (тип 4, PoE++) потужності на кожен порт, що є значно більше порівняно з попередніми стандартами IEEE 802.3af (15,4 Вт) і IEEE 802.3at (30 Вт); використання чотирьох пар проводів (IEEE 802.3bt використовує всі чотири пари проводів у стандартному кабелі Ethernet, наприклад, категорії Cat5e і вище для передачі

електроенергії, тоді як попередні версії використовували лише дві пари); зворотна сумісність, де пристрої, що підтримують IEEE 802.3bt, залишаються сумісними з попередніми стандартами PoE та PoE+ (IEEE 802.3af і IEEE 802.3at) для використання нових рішень з наявною інфраструктурою; нові класи потужності, де введені класи 5-8 для точнішого контролю споживання електроенергії, які покривають потужності понад 30 Вт для пристроїв, що потребують більше живлення [21].

До переваг застосування IEEE 802.3bt можна віднести наступні критерії.

1. Підтримка більш потужних пристроїв, де стандарт забезпечує достатньо потужності для живлення таких пристроїв, як:

- точки доступу Wi-Fi 6 та Wi-Fi 6E;
- IP камери високої роздільної здатності з панорамним оглядом та функціями аналізу відео;
- інтерактивні дисплеї, монітори та електронні вивіски;
- інтелектуальні освітлювальні системи та системи автоматизації будівель;
- телекомунікаційне обладнання та пристрої для розподілених мереж.

2. Сприяє розвитку Інтернет речей (IEEE 802.3bt дозволяє жити більше датчиків та підключених пристроїв через мережу Ethernet, що значно спрощує розгортання інтелектуальних систем у рамках смарт-будівель, виробництв і міст).

3. Економічність і зменшення складності, оскільки PoE+ і PoE ++ живлять пристрої через той самий кабель, що і передають дані й зменшує витрати на додаткові кабелі живлення та прискорює розгортання мережі.

4. Енергоефективність, де IEEE 802.3bt передбачає інтелектуальне управління енергією, що дозволяє знижувати енергоспоживання, коли пристрої не використовуються, або перемикається на нижчі рівні енергоспоживання за необхідності.

Тому IEEE 802.3bt може значною мірою розширювати можливості Power over Ethernet, дозволяючи живлення більш енергоємних пристроїв через звичайний Ethernet кабель. Це робить стандарт ключовим для розвитку сучасних мереж і впровадження технологій Інтернет речей, Wi-Fi 6, відеоспостереження, автоматизації будівель та інших інноваційних рішень, які вимагають високої потужності.

IEEE 802.3bz: Стандарт для підвищення швидкості Ethernet на базі крученої пари.

Цей стандарт визначає нові швидкісні режими Ethernet для мереж на основі крученої пари, де основною метою стандарту є збільшення швидкості передачі даних для існуючих кабельних інфраструктур Cat5e і Cat6 до 2.5 Гбіт/с та 5 Гбіт/с без необхідності модернізації до більш дорогих оптоволоконних або 10G-інфраструктур. Основні характеристики стандарту містять наступне: швидкість передачі даних (2.5GBASE-T – передача даних на швидкості до 2.5 Гбіт/с на кабелях Cat5e та 5GBASE-T – передача даних на швидкості до 5 Гбіт/с на кабелях Cat6); переваги стандарту (зворотна сумісність з існуючими мережами Ethernet, де мережеві пристрої, які підтримують IEEE 802.3bz можуть використовувати наявну кабельну інфраструктуру Cat5e/Cat6 зменшуючи витрати на оновлення мереж); збільшення пропускної здатності (стандарт дає змогу користувачам досягати вищої швидкості без зміни кабелів, що підходить для мережевих інфраструктур в офісах, університетах і корпоративних середовищах); широке застосування для таких задач, як швидкісне підключення до точок доступу Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) та Wi-Fi 6 (802.11ax), що вимагають більшої пропускної здатності. До технічних особливостей стандарту відноситься використання мультиплексування сигналу та спеціальні технології модуляції, які дозволяють збільшити швидкість передачі даних по звичайних мідних кабелях, що були традиційно обмежені швидкістю до 1Гбіт/с [22].

Введення стандарту IEEE 802.3bz відповідає сучасним вимогам до збільшення швидкості передачі даних у корпоративних та комерційних мережах. Більшість організацій не можуть дозволити собі негайний перехід на оптоволокно або дорогі рішення 10G Ethernet, тому можливість підвищення швидкості до 2.5 і Гбіт/с на існуючих кабелях, що є економічно вигідним рішенням. Стандарт також стає важливим для забезпечення швидкого з'єднання в

мережах, де відбувається інтенсивне зростання трафіку, включаючи використання Wi-Fi, Інтернет речей та інших додатків, що вимагають вищої продуктивності.

Тому проаналізувавши стандарт можна зробити висновок, що IEEE 802.3bz є вирішальним етапом у розвитку Ethernet-технологій, оскільки він забезпечує економічно вигідний шлях до збільшення пропускної здатності для багатьох організацій. Цей стандарт допомагає подолати обмеження Gigabit Ethernet, зберігаючи при цьому сумісність з наявною інфраструктурою, що дозволяє підприємствам максимально ефективно використовувати свої інвестиції в мережеві рішення.

Розглянемо та проаналізуємо деякі стандарти Ethernet проєктів IEEE 802.3 в табл. 3, де наведена коротка характеристика для кожного стандарту, які мають швидкість передачі даних від 200 Гбіт/с до 1,6 Тбіт/с. Цей аналіз допоможе з'ясувати, які з існуючих стандартів є чинними та актуальними для досліджень на 2024 рік [23-25].

Таблиця 3

Аналіз мережевих технологій на основі стандартів Ethernet IEEE 802.3

Проєкти IEEE 802.3	Характеристика
IEEE P802.3cw: 400 Гбіт/с в системах DWDM	<p>Проєкт стандарту, який стосується підтримки передачі Ethernet на швидкості 400 Гбіт/с через Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) системи. Робота робочої групи IEEE P802.3cw 400 Гбіт/с по DWDM-системам завершилася відкликанням IEEE P802.3cw PAR 22 травня 2024 року. Основною метою IEEE P802.3cw є забезпечення ефективної передачі Ethernet по DWDM-лініях, що дозволяє передавати кілька каналів даних через одне оптичне волокно, використовуючи різні довжини хвиль для кожного каналу. Це значно збільшує пропускну здатність без необхідності прокладати нові кабелі, що знижує вартість і підвищує ефективність використання існуючої інфраструктури.</p> <p>Основні аспекти та завдання робочої групи стандарту: підтримка 400 GbE (400 Gigabit Ethernet) призначена для оптимізації передачі даних на таких швидкостях з урахуванням специфіки DWDM-систем; зниження інтерференції, де стандарт передбачає використання технологій, які мінімізують інтерференцію між каналами різних довжин хвиль; оптимізація для довгих відстаней, де DWDM-системи зазвичай використовуються для передачі даних на великі відстані (сотні або тисячі кілометрів), тому в IEEE P802.3cw враховуються специфічні вимоги до стабільності сигналу і зменшення втрат під час передачі даних; підтримка сумісності з існуючими мережевими інфраструктурами, де стандарт передбачає високу сумісність із наявними технологіями і пристроями.</p>
IEEE P802.3df: 400 Гбіт/с і 800 Гбіт/с (лютий 2024 р.)	<p>Проєкт стандарту, розроблений для Ethernet зі швидкістю 400 Гбіт/с та 800 Гбіт/с й спрямований на задоволення потреб у високошвидкісній передачі даних у сучасних мережах, особливо у дата-центрах та телекомунікаційних мережах. Цільова група, яка працює над цим проєктом, розробляє рішення для підтримки передачі даних на таких швидкостях у різних інфраструктурах.</p> <p>Основні аспекти та завдання робочої групи стандарту: розробка специфікацій для 400 Гбіт/с та 800 Гбіт/с Ethernet для підтримки нових високошвидкісних рівнів, що необхідні для обробки зростаючих обсягів трафіку в глобальних мережах; оптичні та електричні інтерфейси, де проєкт охоплює підтримку як оптоволоконних, так і електричних (мідних) кабельних рішень, з урахуванням вимог до передачі на короткі (в межах дата-центрів) та довгі відстані (для глобальних мереж); ефективність та масштабованість, де стандарт може надати нові можливості для побудови масштабованих мереж, здатних обробляти</p>

Продовження таблиці 3

Аналіз мережевих технологій на основі стандартів Ethernet IEEE 802.3

Проекти IEEE 802.3	Характеристика
IEEE P802.3df: 400 Гбіт/с і 800 Гбіт/с (лютий 2024 р.)	<p>значні обсяги даних без значного ускладнення інфраструктури та додаткових витрат; сумісність з існуючими стандартами, де проєкт враховує сумісність з поточними специфікаціями Ethernet, такими як IEEE 802.3bs (400 Гбіт/с) та IEEE 802.3ck, що забезпечить плавний перехід до нових технологій.</p> <p>Цільова група IEEE P802.3df продовжує свою роботу в лютому 2024 року, спрямовану на розвиток стандартів для мереж із пропускною здатністю 400 Гбіт/с і 800 Гбіт/с. Зростаючий попит на високошвидкісні мережі пояснюється розвитком таких технологій, як штучний інтелект, 5G, хмарні обчислення та Інтернет речей. Для обслуговування цих технологій потрібні надійні та масштабовані рішення, які забезпечують безперебійну передачу великих обсягів даних.</p> <p>У міру того, як компанії стикаються із зростаючою необхідністю у великих швидкостях і пропускній здатності, стандарт IEEE P802.3df стане важливим кроком у забезпеченні розвитку глобальних мереж, дата-центрів і телекомунікаційних систем. Цей стандарт підтримуватиме майбутні вимоги до трафіку і сприятиме швидшому впровадженню нових технологій, таких як 800 Гбіт/с і потенційно 1,6 Тбіт/с, що вже передбачаються для наступного покоління мережевих інфраструктур.</p>
IEEE P802.3dj: 200 Гбіт/с, 800 Гбіт/с та 1,6 Тбіт/с	<p>Ініціатива в рамках стандарту IEEE 802.3, яка спрямована на розробку нових специфікацій для Ethernet із підтримкою високошвидкісних з'єднань, зокрема на 200 Гбіт/с, 400 Гбіт/с, 800 Гбіт/с і 1,6 Тбіт/с. Цей проєкт відповідає на зростаючі потреби в пропускній здатності в умовах розвитку технологій, які вимагають швидкого обміну даними, таких як хмарні обчислення, великі дані та високошвидкісні мережі. Основні цілі стандарту складаються з наступного: розширення швидкостей Ethernet (проєкт має на меті забезпечити підтримку різних швидкостей, включаючи 200 Гбіт/с, 400 Гбіт/с, 800 Гбіт/с і 1,6 Тбіт/с, що дозволить задовольнити зростаючі вимоги до пропускної здатності в дата-центрах, корпоративних мережах і глобальних зв'язках); покращення енергоефективності (однією з ключових задач є розробка енергозберігаючих рішень, що дозволяють знизити витрати на електроенергію без зниження продуктивності мереж); адаптація до нових технологій (стандарт може враховувати нові технології, такі як багатоканальна передача (WDM) та нові методи модуляції, які можуть підтримувати підвищені швидкості передачі даних); оптимізація для різних середовищ (стандарт розроблений для ефективного використання в різних середовищах, включаючи оптичні та електричні інтерфейси, що дозволить використовувати Ethernet в різних застосуваннях, від малих офісів до великих центрів обробки даних).</p> <p>До технічних характеристик стандарту відноситься наступне: підтримка багатошвидкісних з'єднань, де проєкт може дозволити підтримувати широкий спектр можливостей Ethernet, що є критично важливим для масштабованості мереж; покращенні фізичні інтерфейси, де стандарт містить нові фізичні інтерфейси, які зможуть ефективно передавати дані на швидкостях до 1,6 Тбіт/с, включаючи оптичні рішення, що забезпечують високу швидкість передачі на великі відстані; висока надійність, де проєкт стандарту забезпечує високу надійність з'єднань, що критично важливо для додатків та підприємств; підтримка</p>

Продовження таблиці 3

Аналіз мережевих технологій на основі стандартів Ethernet IEEE 802.3

Проекти IEEE 802.3	Характеристика
IEEE P802.3dj: 200 Гбіт/с, 800 Гбіт/с та 1,6 Тбіт/с	<p>оптичних технологій, де стандарт орієнтований на використання нових поколінь оптичних технологій для досягнення високих швидкостей передачі даних на великі відстані без втрат продуктивності.</p> <p>Стандарт може застосовуватися в наступних аспектах: центри обробки даних для підвищення пропускної здатності між серверами та системами зберігання для оптимізації загальної продуктивності; хмарні обчислення з потребою в швидких з'єднаннях, що робить стандарт ідеальним для використання у хмарних обчисленнях; високошвидкісні опорні мережі з підтримкою високих швидкостей з'єднання, що дозволяє будувати мережі магістрального рівня, які можуть задовольнити потреби сучасних провайдерів послуг; мережі наступного покоління, коли стандарт стане важливим елементом в розвитку 5G та майбутніх технологій 6G, забезпечуючи необхідну пропускну здатність для підключення мільйонів пристроїв.</p> <p>Сучасний стан та дослідження за 2024 рік цього стандарту набуває особливої уваги в контексті зростання обсягу даних, які передаються через мережі, а також зростаючої популярності хмарних технологій та Інтернету речей. Цей проект стандарту буде залишатися важливим для формування майбутньої інфраструктури, що забезпечує надійний, швидкий і енергоефективний обмін даними в умовах швидко змінюваного технологічного ландшафту.</p>

Основні тенденції розвитку та впровадження технології Wi-Fi у 2024 році. Значні досягнення 2024 року присвячені наступному поколінню безпроводних мереж, а саме Wi-Fi 7 (стандарт IEEE 802.11be), який обіцяє суттєві покращення у швидкості, стабільності та зниженні затримки передачі даних. У порівнянні з попередником Wi-Fi 6, новий стандарт забезпечує швидкість до 46 Gbit/c, що стає ключовим для високонавантажених середовищ, таких як віртуальна реальність, хмарні обчислення та передача 8K-відео. Wi-Fi 7 також підтримує функцію Multi-link operation (MLO), що дозволяє одночасно використовувати кілька каналів для передачі даних, підвищуючи ефективність мережі та зменшуючи затримки. Тому дослідження та впровадження підтверджує, що Wi-Fi 7 може стати важливим доповненням до локальних мереж, особливо у високопродуктивних корпоративних середовищах [26].

У 2024 році очікується масове впровадження стандарту Wi-Fi 7, що зможе забезпечити швидкість передачі даних до 30 Гбіт/с, значно перевершуючи попередні покоління (Wi-Fi 6 і Wi-Fi 6E). Основні переваги Wi-Fi 7 містять наступне:

- вищі швидкості передачі даних (завдяки використанню смуги 320 МГц та технології модуляції 4096-QAM)
- зменшення затримок та підвищення ефективності для критично важливих додатків, таких як онлайн-ігри, віртуальна та доповнена реальність (AR/VR).
- покращене управління спектром і багатоканальність, що дозволяє ефективніше використовувати смуги 2,4 ГГц, 5 ГГц та 6 ГГц.

У 2024 році конвергенція Wi-Fi та 5G стає ключовою тенденцією, особливо в корпоративних мережах та індустріальних середовищах. Ці дві технології працюють спільно для забезпечення високої швидкості та низьких затримок. Wi-Fi використовується для покриття внутрішніх приміщень та малих зон, тоді як 5G забезпечує широке покриття на відкритих територіях. Водночас з цим впроваджується розширене використання Wi-Fi 6 і Wi-

Fi 6E, де Wi-Fi 6E (розширення Wi-Fi 6) продовжує впроваджуватися у зв'язку з відкриттям діапазону 6 ГГц для комерційного використання. Це дає можливість підтримувати більше підключених пристроїв і забезпечує більшу пропускну здатність без перевантаження мережі, що стає актуальним для смарт-будівель, Інтернет речей та промислових додатків. Окрім того, також важливим за 2024 рік є зростання ролі Wi-Fi в Інтернеті речей та промислових додатках. Удосконалені стандарти, такі як Wi-Fi HaLow (802.11ah), дозволяють підключати пристрої на низьких частотах для покращення енергоефективності та розширення радіусу дії, що підходить для розумних будинків, виробництв та сільського господарства.

Впровадження Wi-Fi у 2024 році посприяли широкому застосуванню в розумних будівлях, масштабуванні корпоративних та промислових мереж, а також в розвитку публічних Wi-Fi мереж. Наприклад, застосування в розумних будівлях завдяки підвищеній потужності та швидкості Wi-Fi може відігравати ключову роль у розгортанні інтелектуальних будівель, де точки доступу з підтримкою Wi-Fi 6 і Wi-Fi 7 забезпечують стабільний зв'язок для великої кількості сенсорів, пристроїв безпеки, клімат-контролю та інших компонентів будівель. Водночас з цим великі підприємства, виробничі об'єкти та логістичні центри активно переходять на нові стандарти Wi-Fi для забезпечення підключення безпроводних пристроїв, зокрема роботів, датчиків та машин з автоматизованим управлінням. Розвиток публічних мереж у 2024 році продовжує розгортання Wi-Fi мереж у міських зонах, аеропортах, стадіонах та інших місцях скупчення людей. Використання Wi-Fi 6 та Wi-Fi 7 може допомогти підтримувати підключення для великої кількості користувачів без зниження якості зв'язку.

До основних викликів та проблем розвитку Wi-Fi у 2024 році можна віднести виклики та проблеми розвитку, які можуть бути різні за характером. Наприклад, з точки зору перевантаженості частотного спектру (перевантаженість частот залишається проблемою в щільно заселених міських районах, а впровадження нових стандартів допомагає знизити навантаження, але необхідність ефективного управління спектром зростає), безпеки (підключення великої кількості розумних пристроїв через Wi-Fi створює нові загрози для кібербезпеки, зокрема, проблеми можуть виникати з незахищеними пристроями Інтернет речей, які можуть стати вразливими точками в мережі), а також енергоспоживання та інфраструктурних витрат (модернізація інфраструктури для підтримки нових стандартів Wi-Fi, особливо Wi-Fi 7, потребує значних фінансових інвестицій, а витрати на нові точки доступу та обладнання можуть стати бар'єром для масового впровадження, особливо в малих та середніх підприємствах).

З огляду на світові тенденції та прогнози Україні слід орієнтуватися на розвинення 3,5G технології та вже на проектування 5G мереж. Більш раціонально проектувати саме 5G мережі. По-перше, 4G мережі потребують значних фінансових вкладень, по-друге, на поширення даних мереж знадобиться тривалий час, а по-третє, коли все ж таки буде змога спроектувати та поширити 4G-мережі в Україні, виявиться, що у світі популярності набуватиме 5G технологія. До того ж розвинуті технології 3G мереж не надто сильно поступаються технічними характеристиками 4G технології. Таким самим чином буде і впровадження 5G-мережі в Україні, коли в світі набуватиме популярності мережа 6G.

Висновки

В результаті даного дослідження проаналізовано декілька ключових аспектів інформаційно-комунікаційних та мережевих технологій, де в якості комунікацій розглядався зв'язок консорціуму технологій волоконної оптики (КТВО) та Асоціації телекомунікаційної промисловості (ТІА) для розвитку, впровадження та вдосконалення стандартів, де було розглянуто характеристику основних напрямків, видів діяльності КТВО, тенденцій та

стандартів, а також розглянуто та проаналізовано основні напрямки роботи. У 2024 році ТІА КТВО продовжує відігравати провідну роль у розвитку та стандартизації оптичних технологій. Завдяки інноваційним рішенням та новим стандартам, такі напрями, як високошвидкісні оптичні мережі, пасивні оптичні системи та рішення для дата-центрів, забезпечують сталий розвиток сучасних телекомунікаційних інфраструктур.

Проаналізовано сучасні тенденції розвитку мережевих технологій і стандартів, де було з'ясовано, що стандарти IEEE 802.3 невинно використовуються, впроваджуються та вдосконалюються. В роботі розглядалися стандарти Ethernet IEEE 802.3bt, IEEE 802.3bz, IEEE P802.3cw, IEEE P802.3df та IEEE P802.3dj, де серед охарактеризованих стандартів IEEE P802.3cw: 400 Гбіт/с в системах DWDM виявився відкликаним (недіючий стандарт).

Вектор подальших досліджень буде спрямовано на вивченні та дослідженні питань інтеграції мережевих технологій майбутнього покоління, зокрема 6G та Wi-Fi 7 в поєднанні з розумними технологіями. Дане дослідження буде взяте за основу з метою вивчення характерних особливостей комунікаційних та мережевих технологій для майбутніх досліджень, що слугуватиме для розробки та впровадження нових стандартів майбутніх трендів.

Список використаної літератури:

1. Рижов О. А., Андросов А. І., Іванькова Н. А. Сучасні мережеві технології: Навчально-методичний посібник для студентів-провізорів очної, заочної та дистанційної форм навчання. Запоріжжя: [ЗДМУ], 2018 - 68 с. URL: <http://dspace.zsmu.edu.ua/handle/123456789/13182>
2. Коновал, В. О. Мережеві технології у сучасних умовах суспільного розвитку: філософські концепції // Інвестиції: практика та досвід. – Київ, 2019. – № 2. – С. 138-139. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2019.2.134>
3. Проблеми сучасних мереж та як їх вирішити. HiTech.Expert. URL: <https://expert.com.ua/158892-problemy-suchasnyh-merezh-ta-yak-ih-vyrishyty.html>
4. Беркман Л. Н., Руденко Н. В., Завацький В. О., Стрельников В. І. Методи забезпечення інваріантності параметрів в інфокомунікаційній мережі в надзвичайних ситуаціях до прогнозування та випадкових збурень. *Зв'язок*, (4), 2024, с. 3-9. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.040309>
5. Бурячок В. Л., Аносов А. О., Семко В. В., Соколов В. Ю., Складанний П. М. Технології забезпечення безпеки мережевої інфраструктури. [Підручник]. – К.: КУБГ, 2019. – 218 с. URL: <https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/27191>
6. Aweya J. (2024) Extending the Capacity and Reach of Multirack/Multishelf Network Devices in Data Centers and Telecom Networks using Backplane Ethernet. EBTIC Technical Report, 1-12. URL: <https://www.researchgate.net/publication/380971073>
7. Du, R., Hua H., Xie H., Song X., Lyu Z., Hu M., ... & Xu, J. (2024). An overview on IEEE 802.11 bf: WLAN sensing. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 1-23. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3408899>
8. Adil M., Song H., Khan M. K., Farouk A., & Jin Z. (2024). 5G/6G-enabled metaverse technologies: Taxonomy, applications, and open security challenges with future research directions. *Journal of Network and Computer Applications*, 103828. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103828>
9. Scalise, P., Boeding, M., Hempel, M., Sharif, H., Delloiacovo, J., & Reed, J. (2024). A Systematic Survey on 5G and 6G Security Considerations, Challenges, Trends, and Research Areas. *Future Internet*, 16(3), 1-38. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi16030067>

10. Banafaa, M., Pepeoğlu, Ö., Shayea, I., Alhammadi, A., Shamsan, Z., Razaz, M. A., ... & Al-Sowayan, S. (2024). A comprehensive survey on 5G-and-beyond networks with UAVs: Applications, emerging technologies, regulatory aspects, research trends and challenges. *IEEE Access*, 1-42. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3349208>
11. Singh, B., & Kaunert, C. (2024). Integration of cutting-edge technologies such as Internet of Things (IoT) and 5G in health monitoring systems: a comprehensive legal analysis and futuristic outcomes. *GLS Law Journal*, 6(1), 13-20. DOI: <https://doi.org/10.69974/gslslawjournal.v6i1.123>
12. Kakkavas, G., Diamanti, M., Karyotis, V., Nyarko, K. N., Gabriel, M., Zafeiropoulos, A., ... & Moessner, K. (2024). 5G Perspective of Connected Autonomous Vehicles: Current Landscape and Challenges Toward 6G. *IEEE Wireless Communications*, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.014.2300277>
13. Ezeigweneme, C. A., Umoh, A. A., Pojanyan, V. I., & Adegbite, A. O. (2024). Telecommunications energy efficiency: optimizing network infrastructure for sustainability. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(1), 26-40. DOI: <https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i1.700>
14. Sangeetha, S., Logeshwaran, J., Faheem, M., Kannadasan, R., Sundararaju, S., & Vijayaraja, L. (2024). Smart performance optimization of energy-aware scheduling model for resource sharing in 5G green communication systems. *The Journal of Engineering*, 2024(2), e12358. DOI: <https://doi.org/10.1049/tje2.12358>
15. Олійник, В. М., & Речембей, В. В. (2018). Сучасні тенденції розвитку телекомунікаційних технологій. Математичні методи, моделі та інформаційні технології у економіці. Вип. 14/2018. *Мукачівський Державний університет. Економіка і суспільство. Випуск*, 1016-1022.
16. Kizza, J. M. (2024). Internet of things (IOT): growth, challenges, and security. In *Guide to Computer Network Security*, 557-573. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-47549-8_25
17. Zanasi, C., Russo, S., & Colajanni, M. (2024). Flexible zero trust architecture for the cybersecurity of industrial IoT infrastructures. *Ad Hoc Networks*, 156, 103414, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103414>
18. Mortágua, D., Zúquete, A., & Salvador, P. (2024). Enhancing 802.1 X authentication with identity providers using EAP-OAUTH and OAuth 2.0. *Computer Networks*, 244, 110337, 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110337>
19. Goldsmith E. “FOTC Standards Explorer”. TIA’s Fiber Optics Tech Consortium, 2024. URL: <https://www.tiafotc.org/standards/fotc-standards-explorer/>
20. Valerie M. TIA Family of Standards. TIA’s Fiber Optics Tech Consortium, 2024. URL: <https://www.tiafotc.org/tia-standards-update/>
21. IEEE 802.3bt-2018. IEEE Standard for Ethernet Amendment 2: Physical Layer and Management Parameters for Power over Ethernet over 4 pairs, URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3bt/6749/>
22. IEEE 802.3bz-2016. IEEE Standard for Ethernet Amendment 7: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 2.5 Gb/s and 5 Gb/s Operation, Types 2.5GBASE-T and 5GBASE-T. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3bz/6130/>
23. Valerie M. IEEE P802.3cw 400 Gb/s over DWDM Systems Task Force Update. URL: <https://www.tiafotc.org/ieee-802-3-ethernet-standards-update/ieee-p802-3cw/>
24. Montstream C. LAN Standards, News & Trends: 2024 Update. 2024. URL: https://www.brighttalk.com/webcast/727/614128?utm_source=brighttalk-portal&utm_medium=web&utm_campaign=channel-page&utm_content=recorded

25. IEEE SA Working Groups (2022). IEEE P802.3df™ Defines Architecture Holistically to Achieve 800 Gb/s and 1.6 Tb/s Ethernet. URL: <https://standards.ieee.org/beyond-standards/ieee-p802-3df-defines-a-holistic-architectural-approach/>

26. Murad, S. S., Badeel, R., Abdal, B. B., Rahman, T., & Al-Quraishi, T. (2024). Introduction to Wi-Fi 7: A Review of History, Applications, Challenges, Economical Impact and Research Development. *Mesopotamian Journal of Computer Science*, 2024, 110-121. DOI: <https://doi.org/10.58496/MJCSC/2024/009>

Автори статті

Мадінов Микола – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0005-5910-8774

Руденко Наталія – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-8582-3126

Authors of the article

Madinov Mykola – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0005-5910-8774

Rudenko Nataliia – Candidate of Science (technic), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-8582-3126