

Мадінов М.Л.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Ігнатенко П.А.

Товариство з обмеженою відповідальністю «АЙТЕХ»

Галаган Н.В.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

ОГЛЯД СУЧАСНИХ СТАНДАРТІВ ТА ТЕНДЕНЦІЙ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ: ДОСЯГНЕННЯ 2025 РОКУ

У статті здійснено комплексний огляд сучасних стандартів і тенденцій розвитку локальних мереж станом на 2025 рік. Розкрито ключові чинники, що визначають еволюцію мережевих технологій: зростання швидкостей Ethernet, інтеграцію хмарних обчислень, штучного інтелекту, Інтернету речей, промислової автоматизації та мобільних мереж п'ятого й шостого покоління. Особливу увагу приділено еволюції швидкостей Ethernet – від перших стандартів 10 Мбіт/с у 1980-х роках до сучасних рішень на рівні 200–800 Гбіт/с і перспективних 1,6–3,2 Тбіт/с, які визначатимуть розвиток глобальної цифрової інфраструктури у найближчі десятиліття. Показано, що ключовими напрямками розвитку є впровадження оптоволоконних систем, технологій Single Pair Ethernet (SPE), які відкривають нові можливості для промисловості та автомобільного транспорту, а також Power over Ethernet (PoE++), що забезпечує живлення пристроїв у «розумних» будівлях та IP-мережах. У статті проаналізовано дорожню мапу Ethernet, яка демонструє послідовну інтеграцію різних швидкісних рівнів у єдину технологічну екосистему, що охоплює сенсорні системи, корпоративні мережі, дата-центри та інфраструктуру штучного інтелекту. Окремо висвітлено стан та перспективи розвитку ключових проєктів IEEE P802.3 (dj, dk, da, dg, dm), які формують універсальну платформу Ethernet для різних сфер застосування. Розглянуто технічні та організаційні виклики, серед яких: складність реалізації інтерфейсів зі швидкостями понад 400 Гбіт/с, високе енергоспоживання обладнання, потреба у гармонізації міжнародних і національних стандартів, забезпечення кібербезпеки та економічна доцільність модернізації. Зроблено висновок, що Ethernet у 2025 році виступає не лише базовою технологією локальних мереж, але й універсальною основою для розвитку глобальної цифрової інфраструктури, здатною інтегрувати різні галузеві рішення та підтримувати подальшу цифрову трансформацію суспільства.

Ключові слова: Ethernet, локальні мережі, IEEE 802.3, стандарти, пропускна здатність, оптоволоконні системи.

Постановка проблеми. Сучасні локальні мережі (ЛМ) зазнають стрімкої трансформації під значним впливом цифровізації, розвитку хмарних технологій (ХТ), штучного інтелекту (ШІ), Інтернету речей (ІР) та нових сервісів, які потребують високої пропускної здатності (ПЗ), надійності та енергоефективності. Водночас з цим в сучасному цифровому середовищі ЛМ виступають критично важливою інфраструктурою, яка забезпечує безперервне функціонування інформаційних систем (ІС), центрів обробки даних (ЦОД), телекомунікаційних операторів (ТО), виробничих та транспортних підприємств, через що виникає потреба у масштабованій інфраструктурі [1–2].

Проте швидка динаміка розвитку цифрових технологій породжує низку проблем. Передусім, обмеженість традиційних кабельних систем стає бар'єром для масштабування ПЗ. Перехід мережі Ethernet до швидкостей 200 Гбіт/с, 400 Гбіт/с, 800 Гбіт/с та навіть 1,6 Тбіт/с вимагає не лише модернізації фізичного середовища передавання, а й створення нових стандартів, гармонізованих між IEEE, TIA, ISO/IEC та іншими організаціями. Невідповідність між міжнародними та національними специфікаціями ускладнює інтеграцію інфраструктури, уповільнює впровадження інновацій та підвищує витрати бізнесу [1, 3, 4].

Другий аспект проблеми стосується інтеграції новітніх технологій. Так, Single Pair Ethernet (SPE) розширює можливості промислової автоматизації та автомобільної індустрії, а Power over Ethernet (PoE++) стає ключовим елементом для живлення пристроїв IP та інтелектуальних будівель. Одночасно нові покоління оптоволоконних систем OM5 та пасивні оптичні ЛМ (POL) – змінюють традиційну архітектуру мереж, створюючи потребу в адаптації нормативної бази та практичних рішень [2].

Третя група викликів пов'язана з енергоефективністю та надійністю. Сучасні стандарти повинні враховувати не лише ПЗ, а й оптимізацію енергоспоживання, довговічність інфраструктури та сумісність обладнання різних виробників. Зростання використання технологій автоматизації, транспортних систем та додатків на основі ШІ формує попит на спеціалізовані Ethernet-рішення (зокрема для автомобільної або промислової індустрії), які вимагають швидкої стандартизації [5].

З наукової точки зору, виникає необхідність системного аналізу процесів стандартизації ЛМ, прогнозування їхнього впливу на архітектуру ІС та вивчення взаємозв'язку зі суміжними напрямками – ХТ та обчисленнями, кібербезпекою, промисловим IP тощо. З практичного боку організації стикаються з проблемою адаптації до нових вимог, що включає модернізацію кабельної інфраструктури, скорочення експлуатаційних витрат, підвищення масштабованості та енергоефективності.

Тому проблема розвитку сучасних стандартів ЛМ у 2025 році має комплексний і міждисциплінарний характер, оскільки її вирішення є критичною умовою для побудови надійної, гнучкої та безпечної інформаційної інфраструктури, яка відповідатиме сучасним викликам і стане основою для подальшого технологічного прогресу. Водночас з цим виникає потреби у системному аналізі та узагальненні досягнень в сфері стандартизації ЛМ, що дозволить оцінити поточні тенденції та досягнення, виявити ключові напрями розвитку, а також визначити виклики, які стоять перед галуззю у 2025 році.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні роки характеризуються зростаючим інтересом науковців і практиків щодо проблем розвитку ЛМ та мережевих технологій, що пов'язано як з цифровізацією, так і з поширенням ХТ та зростанням обсягів передачі даних. В минулорічному огляді [6] авторами було з'ясовано, що стандарти щорічно розвиваються та вдосконалюються, зокрема і IEEE 802.3 також. Водночас

з цим авторами в роботі [7] зазначено, що наземні комунікаційні технології стануть основою для розвитку та впровадження майбутніх мереж 6 покоління (6G), де в якості дослідження авторами проводилося порівняння ПЗ каналу Шеннона для різних багаторівневих сценаріїв супутникової лінії зв'язку, де зокрема увага була зосереджена на досягненні ПЗ 100 Гбіт/с.

Окрім того, значна увага приділяється проблемі оптимізації витрат під час проєктування та будівництва комп'ютерних мереж, а також структурованих кабельних систем. Автором в роботі [8] з'ясовано, що кабельні підсистеми та системи підтримки кабелів становлять вагомий частину витрат при створенні мережевої інфраструктури, а нерациональний вибір матеріалів і рішень призводить до перевитрат, ускладненої інсталяції та зниження надійності. Тому сучасні кабельні системи повинні забезпечувати модульність, масштабованість, гнучкість і відповідність стандартам безпеки, що дозволяє оптимізувати витрати протягом усього життєвого циклу мережі.

З цієї метою важливого значення набуває реєстрація нових промислових зразків, які безпосередньо стосуються елементів кабельних систем. Так, у Європейському Союзі зареєстровано промисловий зразок №015113993-0001 (EUIPO, 2025) [9], що охоплює вироби класів Локарнської класифікації 13-03 та 08-08, а саме: кабельні затискачі, кріпильні затискачі для кабелів і монтажні кронштейни. Врахування таких елементів до офіційного реєстру забезпечує не лише правовий захист, але й сприяє стандартизації та уніфікації рішень у сфері підтримки кабельної інфраструктури. Це, у свою чергу, створює передумови для підвищення надійності, безпеки та економічної ефективності при експлуатації мережевих систем. Встановлення таких кабельних затискачів, кріпильних затискачів для кабелів і монтажних кронштейнів описано в [10]

Метою дослідження є системний аналіз сучасних стандартів локальних мереж та тенденцій їх розвитку станом на 2025 рік з акцентом на еволюцію Ethernet, визначення ключових досягнень IEEE 802.3 і виявлення перспективних напрямів подальшої стандартизації та впровадження у цифрову інфраструктуру. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити еволюцію швидкостей Ethernet та їхній вплив на архітектуру локальних мереж;
- проаналізувати дорожню карту розвитку Ethernet та визначити сфери застосування різних швидкісних рівнів;

– охарактеризувати сучасні проекти IEEE P802.3 (dj, dk, da, dg, dm) та оцінити їхнє значення для галузі;

– виявити основні виклики впровадження нових стандартів, зокрема технічні, енергетичні, організаційні та економічні;

– з'ясувати перспективи розвитку локальних мереж з урахуванням потреб хмарних технологій, штучного інтелекту, 5G/6G, промислового Інтернету речей та інтелектуальних систем.

Виклад основного матеріалу.

Еволюція швидкостей Ethernet як основний рушій розвитку стандартів ЛМ. Одним з ключових чинників розвитку ЛМ є постійне зростання швидкостей передачі даних, оскільки історичний розвиток охоплює собою тенденцію зростання швидкостей починаючи від 10 Мбіт/с в 1980-х роках до очікуваних 3,2 Тбіт/с після 2030 року. На рис. 1 показано швидкості Ethernet, а також основні етапи цього розвитку – історичний розвиток (1980-2025 роки) та майбутні тенденції (2030-2040 років) [11].

Історичний розвиток охоплює собою наступні аспекти:

– період 1980-их років, в якому з'явився перший в світі стандарт 10 Мбіт/с Ethernet, який заклав основу для ЛМ у бізнес-середовищі;

– період 1990-их років, в якому широкого розповсюдження набули швидкості 100 Мбіт/с (Fast

Ethernet) та 1 Гбіт/с, що дало змогу розширити та масштабувати можливості для корпоративних мереж;

– період 2000-их років, в якому відбувся перехід до 10 Гбіт/с, а також охоплює стандартизацію 40 Гбіт/с та 100 Гбіт/с Ethernet;

– період 2010-их років, в якому набули широкого розповсюдження швидкості 2,5, 5, 25 та 50 Гбіт/с, орієнтованих на потреби дата-центрів, підприємств та Wi-Fi-мереж;

– період 2020-2025 років, який обумовлюється активною розробкою та впровадженням 200, 400 та 800 Гбіт/с Ethernet.

Майбутні тенденції розвитку ЛМ безпосередньо пов'язані зі зростанням швидкостей Ethernet, що охоплює собою наступні аспекти:

– до 2030 року очікується, що стандартизація 1,6 Тбіт/с Ethernet стане основою для надмасштабних дата-центрів, інфраструктури та систем III, високопродуктивних обчислень та телекомунікаційних гіга-мереж;

– після 2035 року прогнозується поява 3,2 Тбіт/с Ethernet, що наразі перебуває на стадії концепції й набуває неабиякого інтересу серед науковців, оскільки стане наступним етапом еволюції глобальних телекомунікаційних систем, коли активно розвиватимуться оптоволоконні рішення, Single Pair Ethernet (SPE), Power over Ethernet (PoE++), а також “зелені” стандарти, орієнтовані на енергоефективність та стійкий розвиток.

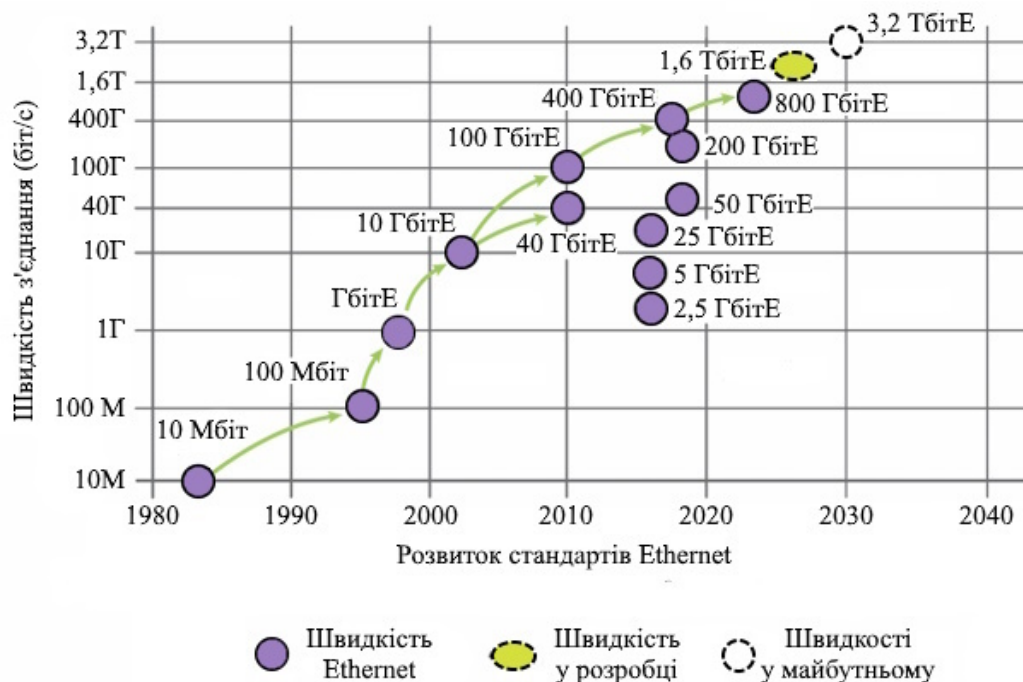


Рис. 1. Етапи розвитку швидкості з'єднання стандартів Ethernet

Джерело: сформовано авторами на основі [11].

Далі розглянемо ключові аспекти еволюції швидкостей Ethernet та вплив для ЛМ, оскільки зростання швидкостей має прямий вплив на розвиток стандартів.

1. Перехід до оптоволоконних систем, де зі зростанням швидкостей передачі даних мідні кабельні системи поступаються волоконно-оптичним технологіям, особливо в магістральних сегментах. Це пояснюється двома аспектами: 1) необхідність у великій ПЗ та мінімальній затримці; 2) оптоволоконні системи забезпечують значно вищу продуктивність, довші дистанції передачі сигналу без втрат і кращу стійкість до електромагнітних завад. У зв'язку з цим вони стають базовим рішенням для дата-центрів, ТО та корпоративних мереж, які прагнуть до масштабованості, надійності та готовності до впровадження нових стандартів Ethernet на рівні сотень Гбіт/с і навіть Тбіт/с/

2. Підтримка нових сервісів і технологій, які неможливо реалізувати без високошвидкісного Ethernet. Сучасна інфраструктура має забезпечувати не лише традиційний обмін даними, але й роботу складних систем, таких як ХТ та обчислення, платформи на основі ШІ, мобільні мережі 5G та майбутнього покоління 6G, а також ІР та інтелектуальних систем. Ці технології в свою чергу також потребують надзвичайно високої ПЗ, мінімальних затримок та стабільності з'єднання, що обумовлює необхідність впровадження нових стандартів Ethernet на швидкостях у сотні Гбіт та Тбіт за секунду. Зрештою такі ЛМ перетворюються на критично важливу інфраструктуру для економіки та суспільства, адже саме вони забезпечують основу для розвитку цифрових сервісів, автоматизації виробництва, інтелектуальних транспортних систем і глобальної взаємодії.

3. Оптимізація архітектури ЛМ та поява проміжних швидкісних стандартів 2,5, 5, 25 та 50 Гбіт/с Ethernet. Ці рішення заповнили проміжок між традиційними швидкостями 1 та 10 Гбіт/с з одного боку, і високошвидкісними стандартами на сотні гігабіт з іншого. Для корпоративних мереж ЦОД це надає можливість будувати більш гнучкі та економічно вигідні інфраструктури, які відповідають реальним потребам бізнесу. Проміжні швидкості дозволяють поступово масштабувати мережеві ресурси без радикальних змін усієї інфраструктури, що забезпечує зниженню витрат на обладнання та обслуговування, а також кращий баланс між продуктивністю та ефективністю інвестицій.

4. Зростання швидкостей передачі даних у ЛМ супроводжується новими викликами, серед яких

особливої ваги набувають енергоефективність та масштабованість інфраструктури. Високошвидкісні мережеві рішення потребують значних енергетичних ресурсів, що впливає як на витрати підприємств, так і на екологічні показники. Саме тому нові стандарти Ethernet розробляються з урахуванням оптимізації енергоспоживання та впровадження «зелених» технологій. Водночас масштабованість мереж стає критичним фактором для дата-центрів та корпоративних систем, де необхідно забезпечити можливість швидкого нарощування ПЗ без повної заміни інфраструктури. Поєднання енергоефективності та гнучкої масштабованості визначає стратегічні напрями розвитку сучасних стандартів ЛМ і забезпечує їхню стійкість до зростаючих вимог майбутнього.

Тому розвиток швидкостей Ethernet, застосування нових можливостей та технологій є основоположним рушієм еволюції стандартів ЛМ, визначаючи їхню архітектуру, технологічну базу та перспективи впровадження у найближче десятиліття.

Аналіз сучасних стандартів та можливостей за допомогою дорожньої мапи Ethernet. Дорожня мапа об'єднує в собі сучасні технології та тенденції розвитку за 2025 рік, що складається з: постачальників ХТ та послуг; автомобільної промисловості, Wi-Fi, підприємств та 5G; постачальників послуг та підприємств; автоматизації, 5G, автомобільної промисловості та підприємств. На рис. 2 показано дорожню мапу Ethernet, на якій зображено структурну мапу розвитку стандартів IEEE та їхнє застосування у різних сферах, що складається з трьох рівнів.

Зв'язок між рівнями на схемі демонструє послідовну еволюцію ПЗ, яка починається з низьких швидкостей для сенсорних мереж та промислової автоматизації (10–100 Мбіт/с) і сягає надшвидкісних інтерфейсів, що обслуговують хмарні дата-центри та глобальні платформи (до 1,6 Тбіт/с). Така градація швидкостей підкреслює різні вимоги користувачів та галузей, але водночас показує, що всі вони залишаються в межах єдиної технологічної парадигми Ethernet. Інтеграція різних рівнів в єдину екосистему Ethernet забезпечує сумісність, масштабованість та уніфікацію інфраструктури. Завдяки цьому від сенсорів у «розумних» будівлях та автомобільних мереж до магістральних каналів зв'язку й хмарних обчислювальних систем використовується спільна основа стандартів. Це дозволяє зменшити витрати на розробку обладнання, спростити інтеграцію нових сервісів та забезпечити єдиний підхід до управління мережею на всіх рівнях.

1) На верхньому рівні схеми зображені постачальники ХТ та послуг, які є ключовими споживачами високошвидкісних мережесих рішень. Сюди належать глобальні дата-центри, оператори хмарних платформ та компанії, що надають сервіси зберігання, аналітики й обробки даних у масштабах мільйонів користувачів.

Для забезпечення стабільної роботи таких систем необхідна інфраструктура з надвисокою ПЗ. Саме тому на цьому рівні застосовуються інтерфейси Ethernet зі швидкостями 200 Гбіт/с, 400 Гбіт/с, 800 Гбіт/с і навіть 1,6 Тбіт/с. Вони розробляються у рамках проекту IEEE P802.3dj, який має завершитися у 2026 році. Такі швидкості дозволяють підтримувати роботу хмарних сервісів, ІІІ, машинного навчання та інфраструктури для великих моделей даних (Big Data).

Важливою особливістю є те, що для цього рівня використовуються переважно одномодові оптичні канали (SMF), здатні забезпечити передачу даних на великі відстані з мінімальною затримкою. Це дає змогу об'єднувати десятки й сотні дата-центрів у глобальну мережесу екосистему та створювати основи для масштабованих і географічно розподілених хмарних обчислень. Тому верхній рівень відповідає за стратегічний напрям розвитку Ethernet, а саме – інтеграцію з ХТ та тех-

нологіями майбутнього, де критичними стають показники швидкості, масштабованості та енергоефективності.

2) Середній рівень відповідає за постачальників послуг та підприємств, які забезпечують роботу корпоративних мереж, операторських платформ і вузлів обміну трафіком. Саме тут формується значна частина навантаження, пов'язаного з передачею даних між організаціями, мобільними операторами та інтернет-провайдерами.

Для цього рівня характерне використання швидкостей від 100 до 400 Гбіт/с, що дозволяє підтримувати сучасні сервіси відеоконференцій, хмарні обчислення, корпоративні додатки та послуги 5G. Такі швидкості забезпечують баланс між високою пропускнуою здатністю і відносною економічністю впровадження у порівнянні з найвищими (хмарними) рівнями.

Ключову роль у розвитку цього сегмента відіграють стандарти IEEE P802.3dk та IEEE P802.3dg. Перший орієнтований на створення двонаправлених оптичних каналів доступу з ПЗ понад 50 Гбіт/с по одному волокну на відстані до 10 км, що особливо актуально для операторських мереж і мобільної мережі 5G. Другий визначає параметри для SPE зі швидкістю 100 Мбіт/с та підтримкою живлення по одному кабельному сегменту,



Рис. 2. Дорожня карта розвитку Ethernet до 2025 року з відображенням сфер застосування та швидкісних рівнів
Джерело: сформовано авторами на основі [11].

що робить його затребуваним у промисловій автоматизації та системах розумних будівель. Тому середній рівень відповідає за інтеграцію Ethernet для корпоративних та операторських рішень, де поєднуються високошвидкісні оптичні канали для магістралей і більш гнучкі технології для спеціалізованих застосувань. Це формує основу для стійких та масштабованих ІС, які обслуговують як бізнес, так і телекомунікаційних провайдерів.

3) Нижній рівень відображає сферу автоматизації, автомобільної промисловості, 5G та підприємств, де потреби у швидкості передачі даних значно відрізняються від хмарних сервісів і магістральних операторських рішень. Тут використовуються швидкості від 10 Мбіт/с до 25 Гбіт/с, яких достатньо для роботи сенсорних мереж, систем управління та інтегрованих промислових додатків.

Ключове значення на цьому рівні має SPE, стандартизований у проєктах IEEE P802.3da та IEEE P802.3dg. SPE, що дозволяє передавати дані та живлення одночасно по одному кабельному провіднику, що суттєво знижує вартість і складність інфраструктури. Ця технологія особливо затребувана у промисловій автоматизації, будівельних системах керування, транспорті та мережах IP, де важлива не стільки максимальна ПЗ, скільки простота, надійність та енергоефективність.

Окрему нішу займає асиметричний Ethernet для автомобільних застосувань (IEEE P802.3dm), який передбачає передачу до 10 Гбіт/с в одному напрямку з нижчою швидкістю у зворотному. Це рішення орієнтоване на камери, сенсори та системи допомоги водієві, де критичним є великий потік даних від датчиків до обчислювальних модулів.

На рис. 2 цей рівень представлений прикладами «розумних» будівель, заводів з інтегрованими системами управління, транспортної інфраструктури та вузлів 5G-зв'язку, що підтверджує його прикладну спрямованість. Тому нижній рівень відповідає більше за розвиток Ethernet у напрямку спеціалізованих галузевих рішень, де в пріоритеті сумісність, оптимізація вартості та інтеграція з новими технологіями.

Отже, проаналізувавши схему можна зробити висновок, що Ethernet стає універсальною технологією, яка охоплює широкий спектр застосувань, наприклад, IP та промисловість (завдяки SPE), 5G і корпоративні мережі (через рішення на 100-400 Гбіт/с), ХТ та ІІІ (завдяки інтерфейсам у діапазоні 800 Гбіт/с – 1,6 Тбіт/с). Тому дорожня мапа демонструє стратегічний напрям: від масш-

табованих, енергоефективних локальних рішень до глобальних високошвидкісних магістралей, що об'єднують усі рівні цифрової інфраструктури.

Далі розглянемо сучасні можливості сімейства стандарту IEEE P802.3 та проаналізуємо ключові характеристики, сфери застосування та значення, а також орієнтований статус в табл. 1.

Аналіз актуальних проєктів IEEE 802.3 свідчить, що розвиток Ethernet у 2025 році відбувається у кількох взаємопов'язаних напрямках. По-перше, значна увага приділяється створенню надшвидкісних інтерфейсів (200 Гбіт/с – 1,6 Тбіт/с), які визначають майбутнє дата-центрів, хмарних платформ та високопродуктивних обчислень. Проєкт IEEE P802.3dj у цьому контексті є стратегічним, оскільки закладає основи масштабованої глобальної інфраструктури для ІІІ та Big Data.

По-друге, активно розвиваються стандарти, орієнтовані на мережі доступу та промислові застосування. Це, зокрема, IEEE P802.3dk, який забезпечує двох направлений оптичний доступ на швидкостях понад 50 Гбіт/с, а також IEEE P802.3da та P802.3dg, що оптимізовані для SPE з низькою вартістю і можливістю передавання живлення. Вони відкривають шлях до масштабного впровадження технологій IP, «розумних» будівель і промислової автоматизації.

По-третє, важливим напрямом є спеціалізовані рішення для автомобільної промисловості та живлення по Ethernet. Так, IEEE P802.3dm формує стандарт для асиметричного автомобільного Ethernet, що задовольняє потреби сенсорних систем, тоді як IEEE 802.3 PDCC Ad Hoc працює над гармонізацією стандартів PoE з міжнародними нормами. У свою чергу, IEEE 802.3 NEA Ad Hoc демонструє всебічний активний пошук нових сфер застосування Ethernet, зокрема інтерконектів у сфері ІІІ.

Проаналізувавши вище зазначене можна зробити висновок, що сучасна стратегія IEEE 802.3 відображає прагнення зробити Ethernet універсальною платформою, яка охоплює весь спектр потреб – від низьких швидкостей IP-рішень до високошвидкісних магістралей для глобальних обчислювальних систем. Це забезпечує не лише технічну еволюцію стандартів, але й формує основу для інтеграції цифрової інфраструктури наступного десятиліття.

Майбутні перспективи ЛМ на основі IEEE 802.3. Розвиток стандартів Ethernet у найближчому майбутньому визначається тенденцією до істотного збільшення швидкостей передавання даних. Згідно з IEEE 802.3dj, основними віхами

стануть стандартизація швидкостей 200 Гбіт/с, 400 Гбіт/с, 800 Гбіт/с та 1.6 Тбіт/с, а у подальшій перспективі – досягнення рівня 3.2 Тбіт/с. Це відповідає потребам у високій продуктивності дата-центрів, суперкомп'ютерів і телекомунікаційних систем нового покоління.

Важливим аспектом є поступовий перехід від послідовних швидкостей до паралельних архітектур, таких як подвійна швидкість, чотирьох кратна швидкість та висока паралельна швидкість, як показано на рис. 3. Такий підхід забезпечує можливість масштабування ПЗ за рахунок використання кількох паралельних каналів, що особливо актуально для високонавантажених корпоративних мереж і систем хмарної обробки даних.

Подальша стандартизація охоплює як мідні кабельні рішення, так і одномодові оптичні волокна, що дозволяє реалізовувати швидкісні з'єднання як на короткі, так і на довгі відстані. Передбачається, що впровадження швидкостей 800 Гбіт/с та 1.6 Тбіт/с буде можливим одночасно для обох типів середовищ передачі даних.

Очікується, що завершення робіт зі стандартизації за проектом IEEE 802.3dj відбудеться до

кінця 2026 року, що відкриє новий етап розвитку локальних мереж. Подальші кроки у стандартизації будуть спрямовані на досягнення 3.2 Тбіт/с Ethernet, що стане ключовим етапом еволюції мережевих технологій у найближчі десятиліття.

Розглянемо далі перспективи та виклики розвитку ЛМ в табл. 2.

Аналіз перспектив та викликів розвитку ЛМ свідчить про те, що подальша стандартизація буде визначатися балансом між зростанням швидкостей передачі даних, енергоефективністю, безпекою та економічною доцільністю впровадження нових технологій. З одного боку, розробка стандартів Ethernet на рівні 200–3200 Гбіт/с відкриває широкі можливості для масштабування інформаційних систем, розвитку дата-центрів і телекомунікаційної інфраструктури. З іншого боку, досягнення цих показників супроводжується суттєвими технічними, енергетичними та економічними обмеженнями.

Отже, майбутній розвиток локальних мереж визначатиметься не лише технологічними інноваціями, але й здатністю забезпечити їхню інтеграцію у вже існуючу інфраструктуру. Це зумовлює

Таблиця 1

Порівняння та аналіз стандартів сімейства IEEE P802.3 для ЛМ

Назва проєкту	Ключові характеристики	Сфера застосування та значення	Орієнтований статус
IEEE P802.3dj (200, 400, 800 Гбіт/с, 1,6 Тбіт/с Ethernet)	Розробка стандартів для надшвидкісного Ethernet. Електричні та оптичні методи, мідь і SMF. Швидкість до 1,6 Тбіт/с.	Дата-центри, хмарні сервіси, НРС (високопродуктивні обчислення).	Очікуване завершення – 2026 р.
IEEE P802.3dk (>50 Гбіт/с двох напрямків оптичні PHY)	Передача >50 Гбіт/с по одному SMF. Відстань ≥ 10 км.	Мережі доступу наступного покоління, 5G, високошвидкісний інтернет.	Проєкт 2.0, етап узгодження
IEEE P802.3da (10 Мбіт/с Single Pair Multidrop Enhancements)	Ethernet по одній парі з підтримкою кількох пристроїв. Синхронізація + передача живлення (PoDL).	Промисловість, транспорт, «розумні» будівлі, дешеві та надійні мережі на довгі відстані.	На розробці, пов'язано з TIA-568.6
IEEE P802.3dg (100 Мбіт/с Long-Reach SPE)	Ethernet по одній парі на 100 Мбіт/с. Можливість живлення. Орієнтований на довгі відстані.	Автоматизація будівель, промисловість, автомобільна індустрія.	Проєкт у процесі розробки
IEEE P802.3dm (Asymmetrical Electrical Automotive Ethernet)	До 10 Гбіт/с в одному напрямку, нижча швидкість у зворотному. Оптимізований для камер і сенсорів.	Автомобільна промисловість (ADAS, камери, сенсори). Можливі застосування поза авто	Планується стандарт у 4 кварталі 2026 року
IEEE 802.3 NEA Ad Hoc (New Ethernet Applications)	Аналіз нових застосувань Ethernet. У 2025 р. схвалено «Ethernet Interconnect for AI». Акцент на швидкості >200 Гбіт/с.	Штучний інтелект, інтерконекти для великих обчислювальних систем.	Активна фаза оцінки потреб
IEEE 802.3 PDCC Ad Hoc (Power Delivery Coordinating Committee)	Узгодження стандартів живлення (PoE) з IEC, NFPA, ITU-T. Розвиток категорії C стандартів Ethernet.	PoE та енергоефективність, підтримка IP та інтелектуальних будівель.	Щотижневі засідання, постійний розвиток

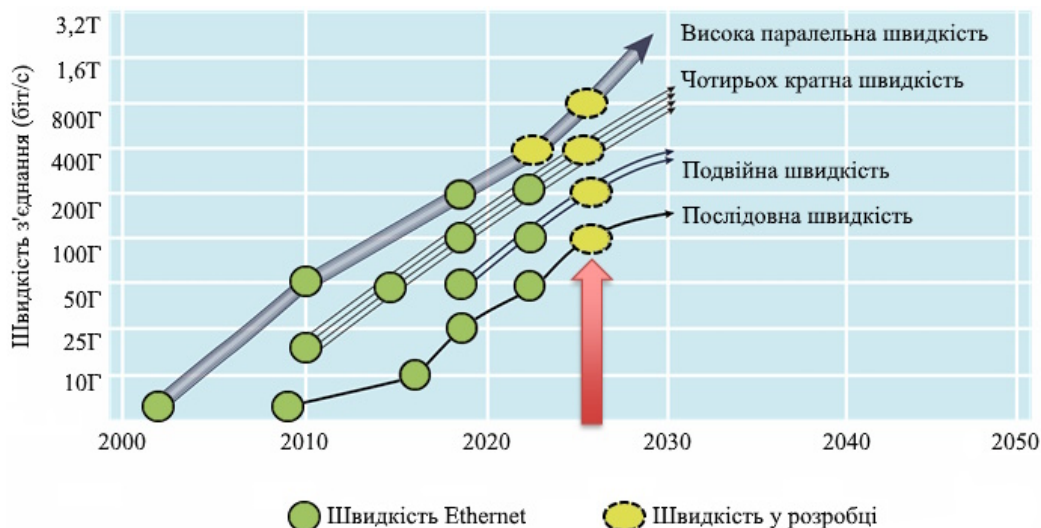


Рис. 3. Етапи розвитку та перехід від послідовних швидкостей до паралельних архітектур

Джерело: сформовано авторами на основі [11].

Таблиця 2

Перспективи та виклики розвитку ЛМ

Напрямок	Перспективи	Виклики
Збільшення швидкостей передачі даних	Розробка стандартів Ethernet на 200, 400, 800 Гбіт/с, 1,6 та 3,2 Тбіт/с для дата центрів і суперкомп'ютерів	Складність фізичної реалізації високошвидкісних інтерфейсів, потреба у нових оптичних технологіях і вдосконаленні схем обробки сигналів.
Масштабованість архітектури	Перехід від послідовних до паралельних швидкостей та інтерфейсів для підвищення ПЗ.	Забезпечення сумісності різних поколінь Ethernet та узгодженість роботи багатошвидкісних систем.
Фізичні середовища передавання	Удосконалення мідних кабельних систем та широке впровадження одномодових оптичних волокон.	Зростання вартості обладнання та потреба у стандартизації нових роз'ємів і технологій монтажу.
Енергоефективність	Розробка стандартів для зменшення енергоспоживання без зниження продуктивності.	Високе енергоспоживання обладнання при швидкостях понад 400 Гбіт/с, проблеми охолодження дата-центрів.
Кібербезпека	Впровадження стандартизованих механізмів захисту, автентифікації та шифрування у високошвидкісних мережах.	Зростання ризику масштабних кібератак при збільшенні пропускної здатності та кількості підключених пристроїв.
Економічні аспекти	Формування глобального ринку обладнання нового покоління та стимулювання цифрової трансформації.	Висока вартість модернізації мережевої інфраструктури та недостатня готовність підприємств до швидкого оновлення.

необхідність комплексного підходу до стандартизації, що охоплюватиме швидкісні характеристики, фізичні середовища передавання, питання сумісності та безпеки, а також економічну ефективність модернізації мереж.

Висновки. В ході дослідження з'ясовано, що розвиток ЛМ у 2025 році безпосередньо визначається еволюцією стандартів Ethernet, які забезпечують перехід від традиційних швидкостей 10–100 Мбіт/с до надшвидкісних інтерфейсів на рівні 200–800 Гбіт/с та перспективних 1,6–3,2 Тбіт/с. Досліджено, що дорожня мапа

IEEE 802.3 демонструє універсальність Ethernet як платформи, яка охоплює широкий спектр застосувань: від сенсорних мереж та промислової автоматизації до хмарних дата-центрів і глобальних телекомунікаційних систем.

Проаналізовано сучасні проекти IEEE P802.3 (dj, dk, da, dg, dm), що спрямовані на забезпечення масштабованості, енергоефективності та спеціалізованих рішень для автомобільної промисловості, промислового IP та «розумних» будівель. Виявлено, що ключовими викликами залишаються складність фізичної реалізації інтерфейсів

на швидкостях понад 400 Гбіт/с, потреба у вдосконаленні оптичних технологій, високе енергоспоживання обладнання, необхідність гармонізації міжнародних і національних стандартів, а також забезпечення кіберстійкості мережевої інфраструктури.

Таким чином, узагальнено, що Ethernet у 2025 році перетворюється на стратегічну основу цифрової трансформації, забезпечуючи інтеграцію ХТ, ІІІ, ІР, мобільних мереж 5G/6G та промислових систем у єдину глобальну інфраструктуру.

Подальші дослідження у сфері розвитку локальних будуть зосереджені на вдосконаленні високошвидкісних інтерфейсів Ethernet (800 Гбіт/с – 3,2 Тбіт/с), підвищенні їх енергоефективності та масштабованості, а також на гармонізації міжнародних і національних стандартів. Особливої уваги потребує аналіз технічних обмежень впровадження нових рішень у вже існуючу інфраструктуру та розробка методів зниження вартості модернізації мережевого обладнання.

Список літератури:

1. Afolalu O., Tsoeu M. S. Enterprise networking optimization: a review of challenges, solutions, and technological interventions. *Future Internet*. 2025. №17(4). P. 133. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi17040133>
2. Van Hoang T. Impact of integrated artificial intelligence and internet of things technologies on smart city transformation. *Journal of technical education science*. 2024. №19 (Special Issue 01). P. 64-73. DOI: <https://doi.org/10.54644/jte.2024.1532>
3. Решевська К. С. Комп'ютерні мережі та Web-програмування : навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 014 «Середня освіта» освітньо-професійної програми «Середня освіта (Інформатика)». Запоріжжя : Запорізький національний університет. 2025. 113 с. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/25744> (дата звернення 10.09.2025)
4. Мадінов М., Руденко Н. Стандарти як основа інформаційно-комунікаційних технологій: дослідження міжнародних стандартів комунікаційних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. №. 4 (30). С. 153–164. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.153>
5. Coronado E., Gómez B., Cebrián-Márquez G. AI-driven network automation. In *Explainable AI for Communications and Networking*. 2025. Pp. 1-21. Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-44-329135-7.00011-4>
6. Мадінов М. Л., Руденко Н. В. Сучасні тенденції розвитку мережевих технологій і стандартів: огляд досліджень за 2024 рік. *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2024. №. 2. С. 48-62. DOI: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2024.026142>
7. Kremenetska Y., Makarenko A., Bereznyuk A., Lazebnyi S., Rudenko N., Vlasov O. High-Altitude Configuration of Non-Terrestrial Telecommunication Network using Optical Wireless Technologies. *International Journal of Communication Networks and Information Security*. 2021. №13(3). Pp. 394–400. DOI: <https://doi.org/10.17762/ijcnis.v13i3.5263>
8. Ihnatenko P. Optimization of costs in the construction of computer networks and structured cabling systems. *International scientific journal «Grail of Science»*. 2025. №52. Pp. 692–694. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.05.2025>
9. Euipo European Intellectual Property Office. Ihnatenko P. Cable clips [electricity], Fastening clips for cables, Mounting brackets. Registration date 18-08-2025. URL: <https://euipo.europa.eu/eSearch/#details/designs/015113993-0001/eRegister> (дата звернення: 10.09.2025)
10. Ron Tellas Installing J-hooks? Avoid these mistakes to maintain network uptime. 2025. URL: <https://www.belden.com/blog/installing-j-hooks-avoid-these-mistakes-to-maintain-network-uptime> (дата звернення: 10.09.2025)
11. Montstream C. LAN Standards, News & Trends: 2025 Update. (May 20, 2025). URL: <https://www.brighttalk.com/webcast/727/639426?q=FOTC> (дата звернення: 10.09.2025)

Madinov M.L., Ihnatenko P.A., Halahan N.V. OVERVIEW OF CURRENT STANDARDS AND TRENDS IN LOCAL AREA NETWORKS: ACHIEVEMENTS BY 2025

The article provides a comprehensive overview of current standards and trends in the development of local area networks as of 2025. It reveals the key factors that determine the evolution of network technologies: the growth of Ethernet speeds, the integration of cloud computing, artificial intelligence, the Internet of Things, industrial automation, and fifth and sixth generation mobile networks. Particular attention is paid to the evolution of Ethernet speeds – from the first 10 Mbit/s standards in the 1980s to modern solutions at 200–800 Gbit/s and promising 1.6–3.2 Tbit/s, which will determine the development of global digital infrastructure in the coming decades. It shows that the key areas of development are the introduction of fiber

optic systems, Single Pair Ethernet (SPE) technologies, which open up new opportunities for industry and automotive transport, as well as Power over Ethernet (PoE++), which provides power to devices in smart buildings and IP networks. The article analyzes the Ethernet roadmap, which demonstrates the sequential integration of different speed levels into a single technological ecosystem covering sensor systems, corporate networks, data centers, and artificial intelligence infrastructure. The status and prospects of key IEEE P802.3 projects (dj, dk, da, dg, dm), which form a universal Ethernet platform for various applications, are highlighted separately. Technical and organizational challenges are considered, including: the complexity of implementing interfaces with speeds exceeding 400 Gbit/s, high energy consumption of equipment, the need to harmonize international and national standards, ensuring cybersecurity, and the economic feasibility of modernization. It is concluded that in 2025, Ethernet will not only be the basic technology for local networks, but also a universal foundation for the development of global digital infrastructure, capable of integrating various industry solutions and supporting the further digital transformation of society.

Key words: Ethernet, local area networks, IEEE 802.3, standards, bandwidth, fiber optic systems.

Дата надходження статті: 12.09.2025

Дата прийняття статті: 29.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025