

АНАЛІЗ ПРОМИСЛОВИХ ПРОТОКОЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ІНДУСТРІАЛЬНИХ МЕРЕЖ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено аналіз та порівняння сучасних індустріальних протоколів зв'язку, здатних об'єднувати велику кількість пристроїв у межах концепції четвертої індустріальної революції. На основі шести принципів «Industrie 4.0» розглянуто ключові характеристики Industrial Ethernet, Fieldbus та бездротових технологій. Проаналізовано динаміку ринку та архітектурні особливості протоколів Modbus TCP, EtherNet/IP, PROFINET та EtherCAT. Визначено, що для завдань із високою синхронізацією в реальному часі найбільш ефективним є EtherCAT, тоді як PROFINET та EtherNet/IP є оптимальними для масштабної автоматизації завдяки сумісності з IT-інфраструктурою.

Ключові слова: Індустрія 4.0, промислові протоколи зв'язку, Industrial Ethernet, Fieldbus, EtherCAT, PROFINET, реальний час, автоматизація виробництва.

Abstract

The paper provides an analysis and comparison of modern industrial communication protocols capable of integrating a large number of devices within the Industry 4.0 concept. Based on the six principles of "Industrie 4.0", the key characteristics of Industrial Ethernet, Fieldbus, and wireless technologies are examined. Market dynamics and architectural features of Modbus TCP, EtherNet/IP, PROFINET, and EtherCAT protocols are analyzed. It is determined that EtherCAT is the most effective for high-synchronization real-time tasks, while PROFINET and EtherNet/IP are optimal for large-scale automation due to their compatibility with IT infrastructure.

Keywords: Industry 4.0, industrial communication protocols, Industrial Ethernet, Fieldbus, EtherCAT, PROFINET, real-time, industrial automation.

Вступ

Людство за останні три століття прожило вже три індустріальні революції, пройшовши шлях від парових двигунів до конвеєрів і моторів, а потім і до автоматизації з використанням комп'ютерних технологій. Проте розвиток технологій за останні 50 років досяг великих результатів, тому в 2011 році на Ганноверському ярмарку в Німеччині вперше прозвучала ідея про четверту індустріальну революцію.

У роботі Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios [1] було зазначено шість основних принципів, яких потрібно дотримуватись, а саме спільна діяльність різних виробничих систем, можливість кіберфізичної системи спостерігати за фізичними процесами, планування та керування виробничим процесом без втручання центру, збір й аналіз виробничих даних у режимі реального часу, створення продукту, виходячи із побажань кожного окремого клієнта, а також пристосування до зміни вимог через забирання чи додавання окремих виробничих модулів. Ці принципи будуть використовуватись для аналізу і порівняння протоколів.

Основна частина

Традиційні широко використані протоколи зв'язку [2], засновані на стандартному Ethernet, працюють за принципом передачі пакетів з можливими колізіями та затримками, що задовольняє всі потреби звичайного користувача, але для промисловості є неприпустимим.

Зараз на ринку присутні три основні типи індустріальних комунікаційних протоколів, кожен з яких має свої особливості та динаміку розвитку. Їх характеристики наведено в Таблиці 1.

За даними звіту компанії HNS [3] від 2025 року, близько 76% рішень на ринку зараз використовують протоколи, які базуються на загальному протоколі Ethernet, такі як Profinet, Ethercat, Ethernet/IP та Modbus TCP [4]. Порівняно з іншими рішеннями вони виділяються високою пропускну здатністю,

можливістю інтеграції в глобальні мережі та підтримкою великої кількості вузлів, що забезпечило їх ріст з 71% до 76% за останній рік.

Таблиця 1 – Характеристика видів індустріальних протоколів зв'язку

Параметри	Industrial Ethernet	Fieldbus	Бездротові
Швидкість передачі	1000 Мбіт/с	12 Мбіт/с	54-600 Мбіт/с
Пропускна здатність	Висока	Низька	Середня
Надійність	Висока	Висока	Середня
Відстань без ретрансляції	до 100 м	до 1200 м	до 50-100 м
Масштабованість	Легка	Складна	Дуже легка
Затримки	Дуже низькі	Низькі	Високі

Другим за популярністю видом є Fieldbus (польова шина), що займає 17% ринку з реалізаціями Profibus, DeviceNet, CC-Link та Modbus RTU. Ці рішення відрізняються низькою вартістю та простотою фізичного підключення, але вони не забезпечують сучасних потреб щодо швидкості передачі великих масивів даних, що демонструє їх спад з 22% до 17%.

Решту 7 відсотків займають бездротові технології, які не можуть бути прямими конкурентами двом вищеописаним типам, але часто використовуються як доповнення завдяки мобільності та можливості збору даних з важкодоступних місць, що дозволяє їм зберігати стабільний відсоток на ринку.

Навіть у групі протоколів на базі технології Ethernet [5] існують відмінності, пов'язані з їх архітектурою та призначенням. Основні відмінності протоколів на базі технології Ethernet наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2 – Порівняння протоколів на базі технології Ethernet

Параметр	Modbus TCP	EtherNet/IP	PROFINET (IRT)	EtherCAT
Метод доступу до мережі	Класичний	Циклічний	Часові слоти	Обробка на льоту
Мінімальний час циклу	10–100 мс	1–10 мс	< 1 мс	< 0.1 мс
Затримки	Високі	Середні	Низькі	Низькі
Використання стеку TCP/IP	Повне	Часткове	Мінімальне	Відсутнє
Топологія мережі	Зірка, Дерево	Будь-яка	Лінія, Зірка, Кільце	Будь-яка
Апаратні вимоги	Стандартна мережева карта	Стандартна / Спеціальна	Спеціальні чіпи	Спеціальні чіпи
Синхронізація осей	Неможлива	Обмежена	Добра	Відмінна

Протокол Modbus TCP вважається класичним і надійним, проте він успадкував всі недоліки протоколу TCP/IP, що створює додаткові витрати часу на обробку кожного пакета і обмежує його застосування в задачах реального часу.

Натомість EtherCAT реалізує унікальну архітектуру обробки не блокуючись на обробці пакетів, де кадри не зупиняються на кожному пристрої для повної розшифровки, а кожен вузол зчитує свої дані та вставляє відповідь прямо в кадр, що рухається крізь нього.

Протокол Profinet пропонує збалансований підхід із використанням особливих часових слотів для критичних даних, що робить його універсальним для великих індустріальних мереж, тоді як Ethernet/IP найкраще підходить для повної сумісності зі стандартною IT-інфраструктурою підприємства.

Висновки

Проведений аналіз демонструє, що перехід до четвертої індустріальної революції змінює вимоги до комунікаційних протоколів. Традиційні польові шини, попри свою надійність, поступово втрачають актуальність через низьку пропускну здатність. Натомість технології на базі Ethernet стають все популярнішими, оскільки вони забезпечують необхідний рівень надійності та швидкодії.

Дослідження архітектурних особливостей Ethernet-протоколів показало, що для завдань, які потребують надвисокої синхронізації в реальному часі, найбільш ефективним є протокол EtherCAT

завдяки унікальній технології обробки кадрів «на льоту». Протоколи PROFINET та Ethernet/IP є оптимальними рішеннями для масштабної автоматизації заводів завдяки їхній гнучкості та сумісності зі стандартною IT-інфраструктурою. Modbus TCP залишається актуальним лише для сегментів, де швидкість не є критичним параметром. Таким чином, вибір конкретного протоколу є стратегічним рішенням, що визначає здатність виробничої системи до масштабування та інтеграції в сучасні системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. IEEE Communications. 2016. P. 3928-3937.
2. Jasperneite J. Real-Time Ethernet: Communication Technologies for Automation. Berlin: Springer, 2024. 320 p.
3. HMS Networks. Industrial network market shares 2025. URL: <https://www.hms-networks.com/network-survey> (дата звернення: 28.02.2026).
4. Smith T. Industrial Automation and Robotics: Communication Protocols in Industry 4.0. TechPress. 2023. 245 p.
5. Промислові протоколи зв'язку: типи та застосування. A2M. 2024. URL: <https://www.a2m.com.ua/ua/post/industrial-protocols> (дата звернення: 28.02.2026).

Біленький Олексій Васильович – студент групи ІПІ-22Б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: olexiubilenkiu@ukr.net

Романюк Оксана Володимирівна – к.т.н., доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: romaniukoksanav@gmail.com

Bilenkyi Oleksii Vasylovych – Faculty of Information Technology and Computer Engineering

Oksana Volodymyrivna Romaniuk – Ph.D., Associate Professor, Department of Software Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: romaniukoksanav@gmail.com