

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Розроблення системи автоматизації

з використанням мережевих технологій в кіберфізичному виробництві

(тема)

Виконала:

здобувач 2 року навчання,

групи КІТПВЗм-24-1

Євсюкова Олена Олексіївна

Спеціальності 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва

Керівник доц. Фролов А. В.

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2025р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

ННЦ Заочної форми навчання

Кафедра _____ КІТАР _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка _____

(код і повна назва)

Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і
виробництва _____

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Євсюковій Олені Олексіївні _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації з використанням
мережевих технологій в кіберфізичному виробництві _____

Затверджена наказом по університету від 03.11.2025 р. № 192 Стз _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 24.12.2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи: 3.1. Дотримання вимог до систем автоматизації
кіберфізичного виробництва; _____

3.2. Використання методу аналізу ієрархій; _____

3.3. Використання мережевих технологій та принципу побудови
ІоТ-орієнтованих архітектур; _____

3.4 Міжнародний стандарт ISA-95 _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; _____

4.2 Аналіз предметної області автоматизації кіберфізичних виробництв; _____

4.3 Аналіз архітектурних підходів до побудови системи автоматизації та вибір
ефективного архітектурного рішення на основі методу аналізу ієрархій; _____

4.4 Проектування системи автоматизації на основі стандарту ISA-95 та ІоТ-
архітектурного підходу; _____

4.5 Питання пов'язані з охороною праці; _____

4.6 Висновки та перелік джерел посилань. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.pptx). 12 – с. Формату А4.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	03.11.2025	Виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	03.11.2025	Виконано
3	Аналіз предметної області	10.11.2025	Виконано
4	Дослідження архітектурних підходів до побудови системи автоматизації	14.11.2025	Виконано
5	Проектування системи на основі обраного підходу	17.11.2025	Виконано
6	Оцінка ефективності проектованої системи	22.11.2025	Виконано
7	Дослідження питання охорони праці	25.11.2025	Виконано
8	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	17.12.2025	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки	18.12.2025	Виконано
10	Подання роботи на рецензію	19.12.2025	Виконано
11	Подання роботи на підпис зав. кафедри	20.12.2025	Виконано
12	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	24.12.2025	Виконано

Дата видачі завдання 03.11.2025 р.

Здобувач _____ Свсюкова О. О.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Фролов А. В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, Євсюкова Олена Олексіївна, як студентка ХНУРЕ, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

24 грудня 2025 р.



Євсюкова О. О.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 59 с., 5 рис., 3 формули, 19 табл., 3 дод., 31 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, АРХІТЕКТУРА, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МЕРЕЖЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ПРОЄКТУВАННЯ

Мета роботи – розроблення системи автоматизації для кіберфізичного виробництва з використанням сучасних мережевих технологій з метою підвищення ефективності обміну даними, надійності та адаптивності виробничих процесів.

Об'єкт дослідження – процес функціонування кіберфізичного виробництва, у якому здійснюється взаємодія між фізичними та обчислювальними компонентами за допомогою мережевих технологій.

Предмет дослідження – архітектура та принципи побудови системи автоматизації кіберфізичного виробництва, а також методи інтеграції дротових і бездротових мережевих технологій для забезпечення ефективної комунікації між елементами системи управління.

У першому розділі було досліджено поняття та завдання автоматизації кіберфізичних систем, проведено аналіз дротових та бездротових технологій у сучасних системах автоматизації. Було визначено вимоги до системи, які сформовано у групи, із використанням яких у наступних розділах було обрано архітектурний підхід до побудови системи автоматизації.

У другому розділі було проаналізовано чинні архітектурні підходи та стандарти проєктування систем автоматизації у кіберфізичному виробництві. Було визначено критерії оцінювання на підставі вимог до системи автоматизації. Із використанням критеріїв та методу аналізу ієрархій було визначено, який саме архітектурний підхід доцільно обрати для проєктування.

У третьому розділі було розроблено структурну схему системи автоматизації кіберфізичного виробництва, побудовану згідно зі стандартом ISA-95 , який визначає ієрархічну модель управління виробничими процесами. У схемі показано взаємозв'язки між рівнями системи – від фізичних пристроїв до корпоративного управління – та визначено, на яких рівнях доцільно впроваджувати відповідні мережеві технології. Також було розроблено програмну реалізацію обміну повідомленнями з використанням MQTT-протоколу, відповідно до обраного архітектурного підходу.

У четвертому розділі надано загальну характеристику пропонованої системи та надано експертну оцінку, у порівнянні з чинними системами автоматизації та досліджено питання охорони праці.

Результати досліджень оформлено у вигляді пояснювальної записки кваліфікаційної роботи відповідно до вимог [1-2] згідно з вказівками до підготовки та захисту роботи [3].

ABSTRACT

Explanatory note: 59 pp, 5 fig., 3 formulas, 19 tabl., 3 app., 31 references.

**AUTOMATION, ARCHITECTURE, CYBER-PHYSICAL SYSTEM,
NETWORK TECHNOLOGIES, DESIGN**

Purpose of the work is the development of an automation system for cyber-physical manufacturing using modern network technologies in order to improve data exchange efficiency, reliability, and adaptability of production processes.

Object of the study is the functioning process of cyber-physical manufacturing, in which interaction between physical and computational components is carried out using network technologies.

Subject of the study is the architecture and principles of building an automation system for cyber-physical manufacturing, as well as methods for integrating wired and wireless network technologies to ensure efficient communication between elements of the control system.

In the first chapter, the concept and objectives of automation in cyber-physical systems were studied, and an analysis of wired and wireless technologies used in modern automation systems was conducted. System requirements were defined and grouped, which were later used to select an appropriate architectural approach for system design.

In the second chapter, existing architectural approaches and design standards for automation systems in cyber-physical manufacturing were analyzed. Evaluation criteria were defined based on system requirements. Using these criteria and the Analytic Hierarchy Process (AHP), the most appropriate architectural approach for system design was determined.

In the third chapter, a structural diagram of the cyber-physical manufacturing automation system was developed in accordance with the ISA-95 standard, which defines a hierarchical model for manufacturing process control. The diagram illustrates the relationships between system levels – from physical devices to enterprise management – and identifies the network technologies appropriate for each level. In addition, a software implementation of message exchange using the MQTT protocol was developed in accordance with the selected architectural approach.

In the fourth chapter, a general description of the proposed system is provided, along with an expert evaluation in comparison with existing automation systems.

The research results are presented in the form of an explanatory note of the qualification work in accordance with the requirements [2] and the guidelines for preparation and defense of the work [3].

ЗМІСТ

Перелік скорочень	11
Вступ	12
1 Аналіз предметної області	14
1.1 Поняття та завдання автоматизації кіберфізичних систем	14
1.2 Аналіз мережевих технологій у системах автоматизації	15
1.3 Визначення вимог до системи автоматизації.....	20
1.4 Висновки до першого розділу	22
2 Архітектура та стандарти проєктування систем автоматизації в кіберфізичному виробництві	23
2.1 Архітектурні підходи до побудови систем автоматизації з використанням мережевих технологій	23
2.2 Методи та критерії оцінювання архітектурних підходів	25
2.3 Оцінка та вибір архітектурного підходу	28
2.4 Висновки до другого розділу	36
3 Проєктування системи автоматизації кіберфізичного виробництва на основі ІоТ-архітектури	38
3.1 Вибір мережевих технологій у проєктованій системі	38
3.2 Побудова структурної схеми системи.....	39
3.3 Програмна реалізація обміну даними в ІоТ-архітектурі.....	42
3.4 Висновки до третього розділу.....	45
4 Оцінка ефективності запропонованої системи автоматизації	45
4.1 Загальна характеристика системи.....	45

4.2 Порівняльний аналіз з традиційними системами автоматизації	46
4.3 Охорона праці при проектування системи автоматизації.....	48
4.4 Висновки до четвертого розділу	50
Висновки.....	51
Перелік джерел посилання.....	53
Додаток А Програмний код реалізації сенсору для відправки повідомлень	56
Додаток Б Програмний код реалізації отримувача повідомлень.....	57
Додаток В Демонстраційний матеріал	58

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

КФС – кіберфізична система;

MAI – метод аналізу ієрархій;

5G – Fifth Generation;

DCS – Distributed Control System;

IIoT – Industrial Internet of Things;

LoRaWAN – Long Range Wide Area Network;

MU-MIMO – Multi-User Multiple Input Multiple Output;

OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access;

PLC – Programmable Logic Controllers;

QoS – Quality of Service;

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition;

SDN – Software-Defined Networking;

TWT – Target Wake Time.

ВСТУП

Автоматизація – це використання технічних, програмних та математичних інструментів для вирішення завдань, виконання процесів або функцій за мінімального або повного виключення участі людини.

Автоматизація реалізується за допомогою застосування робототехніки, програмного забезпечення, систем управління, засобів зв'язку та мережевих технологій, які забезпечують інтеграцію процесів та обмін даними між компонентами системи.

Дедалі більше промислових сценаріїв переходять від провідних рішень до бездротових чи гібридних. Це особливо важливо для автоматизації в умовах, де доти неможливі, наприклад, для дистанційного керування важким обладнанням або мобільними платформами.

Використання мережевих технологій у процесах автоматизації забезпечує швидкий та надійний обмін даними, гнучку інтеграцію обладнання та програмних систем, централізоване керування процесами, масштабованість та віддалений доступ.

Кіберфізичні системи – це системи, в яких фізичні елементи та інформаційні елементи тісно пов'язані та взаємодіють один з одним. Такі системи використовуються в галузях промисловості, виробництва, енергетики, транспорті та охороні здоров'я.

Застосування автоматизації з використанням мережевих технологій у кіберфізичному виробництві дозволяє досягати високої швидкості передачі інформації між обладнанням та програмними комплексами, що сприяє оперативному контролю та управлінню процесами. Це підвищує ефективність виробництва, знижує витрати ресурсів та мінімізує ймовірність помилок. Крім того, інтеграція мережевих рішень створює умови для гнучкого масштабування системи та впровадження інноваційних підходів до організації виробничих процесів.

Важливим аспектом застосування мережевих технологій у кіберфізичному

виробництві є забезпечення надійності та безпеки системи. Сучасні рішення дозволяють захищати дані від несанкціонованого доступу, підтримувати стабільність інформаційного обміну та забезпечувати безперебійність виробничих процесів за умов помилок чи зовнішніх впливів. Це формує основу для довгострокової та безпечної експлуатації автоматизованих комплексів.

Результати роботи доцільно використовувати при проєктуванні та модернізації систем автоматизації в кіберфізичному виробництві. Запропонована структурна схема та програмна реалізація можуть бути використані як практична модель для інженерних та навчальних цілей.

Також, отримані результати роботи можна віднести до цілей сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме до пункту 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування» [4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Поняття та завдання автоматизації кіберфізичних систем

Кіберфізичні системи (КФС) – це інженерні системи, які поєднують обчислювальні елементи з фізичними процесами. КФС використовують складні алгоритми та аналіз даних у реальному часі для моніторингу та управління фізичними процесами. Завдяки вбудованим інтелектуальним функціям у фізичних об'єктах та середовищах, КФС дозволяють машинам приймати автономні рішення, адаптуватися до змінних умов та оптимізувати продуктивність різними способами.

КФС мають великий потенціал для інновацій та перетворень у різних секторах. Вони забезпечують взаємодію між цифровими та фізичними компонентами, що сприяє прогресу у виробництві, транспорті, охороні здоров'я, енергетиці та інших галузях [4].

Кіберфізичні системи мають ряд унікальних характеристик, які відрізняють їх від традиційних комп'ютерних систем і вбудованих пристроїв і визначають їхню перетворюючу роль у різних сферах діяльності. Насамперед, вони являють собою інтеграцію цифрових та фізичних компонентів, що забезпечує тісну взаємодію та обмін зворотним зв'язком між віртуальним та реальним середовищем. Важливою властивістю є робота в режимі реального часу: такі системи здатні миттєво реагувати на зміни навколишнього середовища, що критично важливо для автономного транспорту, промислових установок та інших додатків, що вимагають високої швидкості реакції.

Значну роль грає мережна зв'язаність, що дозволяє обмінюватися даними, координувати дії та масштабувати можливості рахунок взаємодії між елементами. Завдяки цьому досягаються гнучкість, адаптивність і часткова автономність: системи здатні приймати рішення на основі аналізу інформації, що надходить, коригувати свою поведінку та оптимізувати процеси.

Окремою важливою властивістю є різноманітність архітектури: в одній

системі поєднуються різні за призначенням елементи – датчики, які фіксують параметри середовища, приводи, що виконують фізичні дії, обчислювальні блоки для обробки інформації та засоби зв'язку, які відповідають за обмін даними. Така комбінація пристроїв називається гетерогенною архітектурою, і її ефективного функціонування потрібні спеціальні механізми узгодження і управління.

До КФС належать інтелектуальні виробничі підприємства з колаборативними роботами, автономні транспортні засоби, що використовують датчики та штучний інтелект для навігації, інтелектуальні мережі, що оптимізують розподіл енергії, імплантовані медичні пристрої, такі як кардіостимулятори, що забезпечують автоматичне коригування терапії, а також системи вентиляції, кондиціонування повітря, освітлення та безпекою для підвищення ефективності [5].

Проектування та експлуатація КФС стикаються з серйозними проблемами, пов'язаними з постійно зростаючою шкалою та функціональною складністю системи, впровадженням розподілених та мережевих архітектурних платформ з тісною взаємодією з динамічним фізичним середовищем та людською діяльністю. Основна мета автоматизації – подолати такі проблеми. Також автоматизація повинна забезпечити високі вимоги щодо продуктивності, безпеки, надійності, толерантності до відмови, розширення та енергоефективності.

Сьогодні найважливішим завданням є розробка автоматизації проектування кіберфізичних систем для створення нових методологій, алгоритмів та інструментів, що покращують якість, масштабованість, надійність та продуктивність систем [6].

1.2 Аналіз мережевих технологій у системах автоматизації

Мережеві технології – це системи та протоколи, які забезпечують зв'язок та обмін даними в дротових та бездротових мережах, включаючи такі технології, як методи Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, мобільний зв'язок п'ятого покоління (5G), промислові протоколи [7]. Розвиток сучасних систем автоматизації неможливий

без використання мережевих технологій: перехід до бездротових технологій дозволяє розширити можливості зв'язку в сценаріях, де провідні рішення є недоцільними, таких як дистанційне керування важким обладнанням та інші сценарії, пов'язані з мобільністю в промислових умовах.

Наприклад, сегментування мережі 5G дозволяє створювати декілька мереж, розгорнутих на загальній фізичній інфраструктурі, кожна з яких адаптована до різних програм з конкретними вимогами щодо якості обслуговування (Quality of Service, QoS). Зокрема, мережа 5G може бути розгорнута як локальна мережа, що з'єднує промислові пристрої, такі як роботи, камери або датчики. Типові комунікаційні дії у цьому сценарії включають операційні сигнали низхідного каналу для дистанційного керування із зовнішніх мереж, відеопотоки висхідного каналу для моніторингу або спостереження, а також міжмашинну комунікацію з датчиками [8].

Переваги таких розгортань включають гнучкість і масштабованість, оскільки програмна мережа 5G і модульна архітектура дозволяють адаптуватися до різних сценаріїв та експериментувати з конфігураціями. Крім того, випробувальна платформа дозволяє проводити реалістичні оцінки у промислових умовах, де наявність зварювання, металевих конструкцій та електромагнітних перешкод дає більш точні результати порівняно з чистими симуляціями. Ще однією перевагою є те, що системи 5G можуть бути налаштовані для підтримки моделей трафіку з інтенсивним висхідним потоком, які типові для завдань промислового моніторингу та управління.

Проте, промислові середовища за своєю природою динамічні, і радіочастотні канали страждають від таких факторів, як відстань, перешкоди, багатопроменевість та радіочастотні перешкоди. Ці фактори можуть значно погіршити продуктивність бездротової мережі. Більш того, експериментальні результати показали, що хоча програмна мережа 5G є прийнятним рішенням для промислових бездротових розгортань, для випадків використання з інтенсивним трафіком висхідного каналу, як і раніше, необхідна оптимізація системних параметрів при розподілі ресурсів [9].

Отже, технологія 5G є однією з фундаментальних для побудови систем автоматизації. Її застосовують для координації роботизованих комплексів та виробничих ліній, у логістиці для управління автономними мобільними платформами, у транспортній сфері для організації взаємодії між транспортними засобами та інфраструктурою, а також у сфері енергетики для віддаленого моніторингу та керування розподіленими енергетичними об'єктами.

Наприклад, південнокорейська компанія CJ Logistics запровадила приватну 5G-мережу всередині складських приміщень, що дозволило реалізувати точне позиціонування всередині приміщень, управляти автономними роботами, координувати флот мобільних платформ та покращити взаємодію між пристроями та системами управління. Для CJ Logistics це рішення не тільки скоротило вимоги до точності переміщення матеріалів, підвищивши тим самим стандарти безпеки та контролю, але й забезпечило вражаюче зростання продуктивності на 20% та економію капітальних витрат приблизно на 15%. Використовуючи бездротовий зв'язок лише через 5G, CJ Logistics досягає значного підвищення ефективності [10].

При аналізі мережевих технологій, які можна використати для автоматизації виробництва, доцільно розглянути і такі технології як Wi-Fi 6 та LoRaWAN (Long Range Wide Area Network).

Wi-Fi 6 – це останній стандарт бездротового зв'язку, призначений для підвищення швидкості, ефективності та надійності Wi-Fi мереж, особливо в умовах великої кількості підключених пристроїв. Його застосування у системах автоматизації пояснюється потребою промисловості у мобільності, гнучкості та швидкому підключенні великої кількості пристроїв без втрати якості зв'язку [11].

Однією з ключових переваг Wi-Fi 6 є підтримка технологій OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) та MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output), які дозволяють передавати дані одночасно між декількома пристроями та мінімізувати затримки в умовах високого мережевого навантаження. Сам собою OFDMA не вирішує завдання виконання критично важливих завдань автоматизації. Однак, розробивши механізм опитування на

основі OFDMA, промислові програми зможуть досягати постійно низької затримки на точці доступу в чистому середовищі Wi-Fi 6 [12]. Завдяки цьому Wi-Fi 6 є ефективним для промислових застосувань, де одночасно працюють десятки датчиків, контролерів та мобільних терміналів.

Wi-Fi 6 також підтримує режим Target Wake Time (TWT), який оптимізує енергоспоживання пристроїв і збільшує час автономної роботи бездротових сенсорів. TWT дозволяє здійснювати передачу даних тригеру. Клієнти можуть «засинати» між відправкою та прийомом даних та прокидатися лише у погоджений час, можливо через багато годин, щоб відновити передачу даних. Це забезпечує більш тривалий час роботи пристроїв на батареї та відсутність перешкод завдяки запланованому доступу клієнтів до каналу зв'язку [13].

Отже, Wi-Fi 6 є доцільною технологією для систем автоматизації, де необхідно забезпечити високу швидкість обміну даними, підтримку мобільності та підключення великої кількості пристроїв у локальних виробничих середовищах. Його застосування є оптимальним у гнучких та комбінованих архітектурах кіберфізичних систем.

LoRaWAN – це мережова технологія для бездротового зв'язку великої дальності з низьким енергоспоживанням. Вона орієнтована на передавання невеликих обсягів даних від великої кількості пристроїв у розподілених системах моніторингу та автоматизації. На відміну від технологій, орієнтованих на високу пропускну здатність (таких як Wi-Fi 6 або 5G), LoRaWAN використовується для організації енергоефективних сенсорних мереж, де важливішими є дальність зв'язку та тривалість автономної роботи пристроїв [14].

У промисловості LoRaWAN використовується для контролю витрати енергії та ресурсів, моніторингу стану обладнання та умов навколишнього середовища, віддаленого збору телеметрії.

LoRaWAN використовується компанією Bosch для моніторингу вібрацій станків та прогнозування їх зносу на заводах металургійної промисловості. Це дозволило знизити кількість аварійних простоїв на 27% та оптимізувати витрати на сервісне обслуговування. Як зазначає сама компанія, LoRaWAN

використовується завдяки регулюванню смуги пропускання та адаптивної швидкості передачі даних, можливості об'єднання приватних та публічних мереж. Також завдяки тому, що LoRaWAN є бездротовим, безпечним та надійним рішенням для зв'язку на великих відстанях [15].

У системах автоматизації важливу роль відіграють і дротові мережі, зокрема технологія Industrial Ethernet. Industrial Ethernet – це назва стандартизованого варіанту мережевого протоколу Ethernet, адаптованого з метою застосування у промислових умовах для автоматизації та керування технологічними процесами. Industrial Ethernet забезпечує детерміновану (передбачувану) передачу даних, що особливо важливо для процесів, де затримка сигналу може призвести до порушення технологічного циклу. Industrial Ethernet характеризується високою надійністю, стабільною швидкістю обміну (до 1 Гбіт/с і вище), а також стійкістю до зовнішніх електромагнітних впливів завдяки використанню екранованих кабелів та промислових роз'ємів [16].

У таблиці 1.1 наведено порівняльну характеристику проаналізованих мережевих технологій.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика мережевих технологій

Технологія	Тип зв'язку	Переваги	Недоліки	Область застосування
Wi-Fi 6	бездротовий	швидкість, низька затримка, підтримка великої кількості пристроїв	менша стабільність у промислових умовах	мобільні вузли, склади, лабораторії
5G	бездротовий	низька затримка, пропускна здатність, сегментація трафіку	висока вартість впровадження	кіберфізичні системи

Продовження таблиці 1.1

LoRaWAN	бездротовий	дальність зв'язку, низьке енергоспоживання	низька швидкість затримки	моніторинг стану обладнання
Industrial Ethernet	дротовий	висока надійність, низька затримка, сумісність зі стандартами промислової автоматизації	обмежена мобільність	критичні процеси, зв'язок між контролерами

1.3 Визначення вимог до системи автоматизації

Визначення вимог є одним із ключових етапів проектування, оскільки, в залежності від них, формується основа для вибору архітектури, технологій та реалізації. Правильно сформульовані вимоги дозволяють забезпечити відповідність системи виробничим, технічним та експлуатаційним потребам, а також мінімізувати ризики невідповідності між очікуваннями користувачів і фактичними можливостями системи [17].

Загалом, перед визначенням вимог доцільно провести дослідження об'єкта та визначити необхідність впровадження систем автоматизації. Для цього проводиться збір даних про об'єкт та наявні види діяльності. Отже, вимоги до системи автоматизації залежать від місця її потенційного впровадження [18].

Проте, завданням будь-якої системи автоматизації є звільнення людини від безпосереднього виконання функцій управління виробничими процесами та передачею цих функцій автоматичним пристроям [19].

При проектування систем автоматизації кіберфізичного виробництва доцільно визначити функціональні, технічні та програмні (мережеві) вимоги.

До функціональних вимог належать:

- моніторинг параметрів технологічного процесу: система повинна забезпечити безперервний збір даних від датчиків;
- управління технологічним обладнанням: система має забезпечувати автоматичне керування роботою обладнання відповідно до заданих параметрів;
- обмін даними між рівнями системи: забезпечення передачі даних між пристроями та сервером управління;
- візуалізація процесів і сигналізація відхилень;
- віддалений доступ і контроль.

До технічних вимог належать:

- відмовостійкість: резервування серверів;
- масштабованість: можливість підключення додаткових пристроїв;
- робота в режимі реального часу: затримка обробки сигналів не повинна перевищувати заданий інтервал часу;
- безпека експлуатації: відповідність міжнародним стандартам безпеки.

До програмних та мережевих вимог належать:

- використання сучасних технологій бездротового зв'язку: для забезпечення високої пропускної здатності;
- підтримка сегментації мережі та застосування технологій SDN (Software-Defined Networking) для гнучкого керування потоками даних;
- обмін даними між рівнями системи: забезпечення передачі даних між пристроями та сервером управління;
- підтримка стандартних протоколів промислового обміну даними для забезпечення сумісності обладнання різних виробників;
- реалізація механізмів кіберзахисту: для шифрування трафіку, аутентифікації користувачів, багаторівневого контролю доступу [20].

1.4 Висновки до першого розділу

У результаті аналізу сучасних мережевих технологій, що застосовуються у системах автоматизації, встановлено, що їх ефективність визначається вимогами конкретного виробничого середовища та рівнем взаємодії між фізичними та обчислювальними компонентами.

Проведений аналіз показав, що дротові технології, зокрема Industrial Ethernet, забезпечують високу швидкість, стабільність і мінімальну затримку, необхідну для критичних технологічних процесів. Водночас бездротові рішення (Wi-Fi 6, 5G, LoRaWAN) надають гнучкість, мобільність і можливість розгортання розподілених систем моніторингу та керування.

Таким чином, доцільним є поєднання дротових і бездротових технологій у межах єдиної мережевої інфраструктури кіберфізичного виробництва. Такий підхід дозволяє досягти оптимального балансу між швидкістю, надійністю та масштабованістю системи автоматизації, забезпечуючи ефективний обмін даними між усіма рівнями виробничої архітектури.

2 АРХІТЕКТУРА ТА СТАНДАРТИ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ У КІБЕРФІЗИЧНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

2.1 Архітектурні підходи до побудови систем автоматизації з використанням мережевих технологій

При побудові сучасних системах автоматизації кіберфізичного виробництва використовуються різні архітектурні підходи для визначення принципів організації взаємодії між пристроями, модулями керування, інформаційними системами та інтерфейсами користувача. Від вибору архітектурного підходу залежить надійність, масштабованість, швидкість та ефективність системи.

До найбільш використовуваних підходів, які визначають принципи побудови та функціонування сучасних систем автоматизації кіберфізичних виробництв, належать SCADA-архітектура, DCS-архітектура, клієнт-серверна архітектура, IoT-орієнтована архітектура (Industrial Internet of Things), edge-архітектура. Зазначені архітектури використовують мережеві технології як базовий механізм комунікації та є певними підходами до розподілу функцій збору, передачі, аналізу та візуалізації даних у системах.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – архітектура автоматизованої системи управління, що містить обчислювальні пристрої, програмні засоби, мережеві засоби передачі даних та графічний інтерфейс користувача для керування та моніторингу [21]. SCADA- архітектура забезпечує взаємодію датчиків та контролерів з центральним сервером, що дозволяє здійснювати диспетчерський контроль та аналіз у режимі реального часу. Отже, такий архітектурний підхід характеризується центральною обробкою даних. Основними перевагами є стабільність та простота застосування. Проте, такий підход є низько масштабованим, залежним від центрального вузла та може мати високу затримку при великій кількості даних.

DCS (Distributed Control System) – архітектурна модель, в якій задача

управління системами розподілена між локальними автономними контролерами, на відміну від централізованої SCADA архітектури. Це приводить до зниження навантаження на центральний сервер та підвищує стійкість та швидкість системи. Проте, такі системи не є гнучкими.

Клієнт-серверна архітектура – це розподілена система, в якій клієнтські пристрої забезпечують взаємодію з користувачем та запитують послуги у серверів. Обмін даними відбувається через мережі. Часто клієнти та сервери обмінюються даними через комп'ютерну мережу на окремому обладнанні, але і клієнт, і сервер можуть знаходитись на одному пристрої [22]. Отже, при такому архітектурному підході є залежність від центрального сервера.

ІоТ-орієнтована архітектура містить взаємопов'язані датчики, прилади та інші пристрої, об'єднані в мережу з промисловими комп'ютерними додатками, включаючи виробництво та управління енергоспоживанням. Цей зв'язок дозволяє збирати, обмінюватися та аналізувати дані, що потенційно сприяє підвищенню продуктивності та ефективності. ІоТ – це еволюція розподіленої системи управління, яка забезпечує більш високий рівень автоматизації за рахунок використання хмарних обчислень для вдосконалення та оптимізації управління процесами [23].

Edge-архітектура – це модель розподілених обчислень, яка наближає обчислення та зберігання даних до джерел даних, щоб скоротити затримку в порівнянні з роботою додатка в централізованому центрі обробки даних.

Загалом, архітектура систем автоматизації є складовою загальної архітектури кіберфізичної системи, оскільки саме вона забезпечує зв'язок між фізичними процесами та обчислювальними компонентами. Організація ефективної взаємодії між сенсорами, контролерами, виконавчими пристроями та програмними системами управління є основною метою системи автоматизації.

В основі побудови архітектури таких систем лежать міжнародний стандарт ISA-95, який визначає взаємозв'язок між рівнями управління виробництвом – від фізичних процесів і контролерів до корпоративних систем управління підприємством.

Стандарт ISA-95 надає чітку ієрархічну модель підприємства з рівнями, які охоплюють весь цикл: від бізнес-планування до фізичного рівня обладнання. До таких рівней належать:

- рівень 0 (фізичні процеси): фактичні машини, датчики та виконавчі механізми у виробничому середовищі;
- рівень 1 (автоматизоване управління): контролери або розподілені системи управління, які керують фізичними процесами;
- рівень 2 (диспетчерське управління): системи, які контролюють та наглядають за виробничими процесами;
- рівень 3 (виробничі операції та управління): системи управління виробництвом, які керують виробничими процесами та операціями в режимі реального часу;
- рівень 4: системи бізнес-планування та логістики [24].

Для кіберфізичних систем така модель є базовою, оскільки дозволяє організувати обмін даними між фізичними об'єктами та цифровими сервісами. Кожен рівень взаємодіє з іншими через мережеві технології, які забезпечують узгоджену роботу елементів системи автоматизації.

2.2 Методи та критерії оцінювання архітектурних підходів

Перед розробкою системи автоматизації доцільно провести повний аналіз чинних підходів з оцінкою їхньої ефективності. З урахуванням визначених вимог до систем автоматизації (функціональні, мережеві, програмні, технічні) критерії оцінювання архітектурних підходів проектування системи автоматизації доцільно також поділити на відповідні групи. Кожна група критеріїв має відображати відповідність оцінюваного архітектурного підходу ключовим вимогам та завданням системи автоматизації.

У таблиці 2.1 наведено функціональні критерії оцінювання.

Таблиця 2.1 – Функціональні критерії оцінювання архітектурного підходу

Назва	Характеристика
моніторинг	здатність оперативно отримувати актуальні дані
управління обладнанням	здатність реалізовувати алгоритми автоматизованого впливу
обмін даними	здатність підтримувати узгоджену передачу даних без втрат
візуалізація	здатність підтримувати інтерфейси відображення у зрозумілому форматі
віддалений доступ	здатність організовувати та підтримувати віддалений доступ до даних

У таблиці 2.2 наведено технічні критерії оцінювання.

Таблиця 2.2 – Технічні критерії оцінювання архітектурного підходу

Назва	Характеристика
відмовостійкість	здатність підтримувати безперервність роботи у разі відмови компонентів системи
масштабованість	здатність підтримувати збільшену кількість пристроїв
робота в режимі реального часу	здатність підтримувати роботу з мінімальною затримкою
безпека експлуатації	здатність підтримувати надійне функціонування обладнання

У таблиці 2.3 наведено мережеві критерії оцінювання. У таблиці 2.4 наведено програмні критерії оцінювання.

Таблиця 2.3 – Мережеві критерії оцінювання архітектурного підходу

Назва	Характеристика
затримка	здатність швидко передавати дані між елементами системи
пропускна здатність	здатність оброблювати дані без перенавантаження
сегментація мережі	здатність підтримувати розподіл трафіка
кіберзахист	здатність підтримувати механізми захисту даних
втрата даних	визначення частки втрачених даних

Таблиця 2.4 – Програмні критерії оцінювання архітектурного підходу

Назва	Характеристика
підтримка програмних інтерфейсів	здатність використовувати стандартизовані інтерфейси для розширення функціональності
зміна конфігурації	здатність легко налаштовувати логіку роботи системи без додаткових змін
масштабованість	здатність збільшувати та підтримувати додаткові програмні модулі
модульність	здатність розподіляти роботу між програмними модулями

Отже, вибір архітектурного підходу розробки системи автоматизації з використанням мережевих технологій в кіберфізичному виробництві є багатокритеріальною задачею, з метою вирішення якої, доцільно використовувати теорію прийняття рішень. Теорія прийняття рішень вивчає процес, у результаті чого обирається оптимальне рішення з кількох альтернатив, допомагає структурувати проблеми, аналізувати інформацію, оцінювати ризики та вибирати найкращий варіант дій. В теорії математики доведено, що для вирішення багатокритеріальних задач доцільно використовувати метод аналізу ієрархій Томаса Сааті.

Метод аналізу ієрархій (МАІ) – математичний інструмент системного підходу до вирішення складних проблем прийняття рішень [25]. Загальна ідея цього методу полягає в декомпозиції проблеми вибору на більш прості складові та обробку суджень особою, яка приймає рішення. Через міркування визначається відносна значимість досліджуваних альтернатив за всіма критеріями, що є у ієрархії. Згідно з цим методом вибір пріоритетних рішень здійснюється за допомогою парних порівнянь у термінах домінування однієї альтернативи над іншою.

2.3 Оцінка та вибір архітектурного підходу

Відповідно до методу аналізу ієрархій, першим кроком є формулювання мети – визначення ефективного архітектурного підходу для розробки системи автоматизації з використанням мережевих технологій. Наступний крок – визначення критеріїв узгодження, за якими буде здійснюватися порівняння альтернатив. У попередньому пункті були сформовані критерії оцінювання архітектурних підходів, які будуть використовуватися для методу аналізу ієрархій.

На основі даних декомпозиції завдання було побудовано загальну схему з відображенням мети, групи критеріїв та альтернатив. Схему представлено на рисунку 2.1.

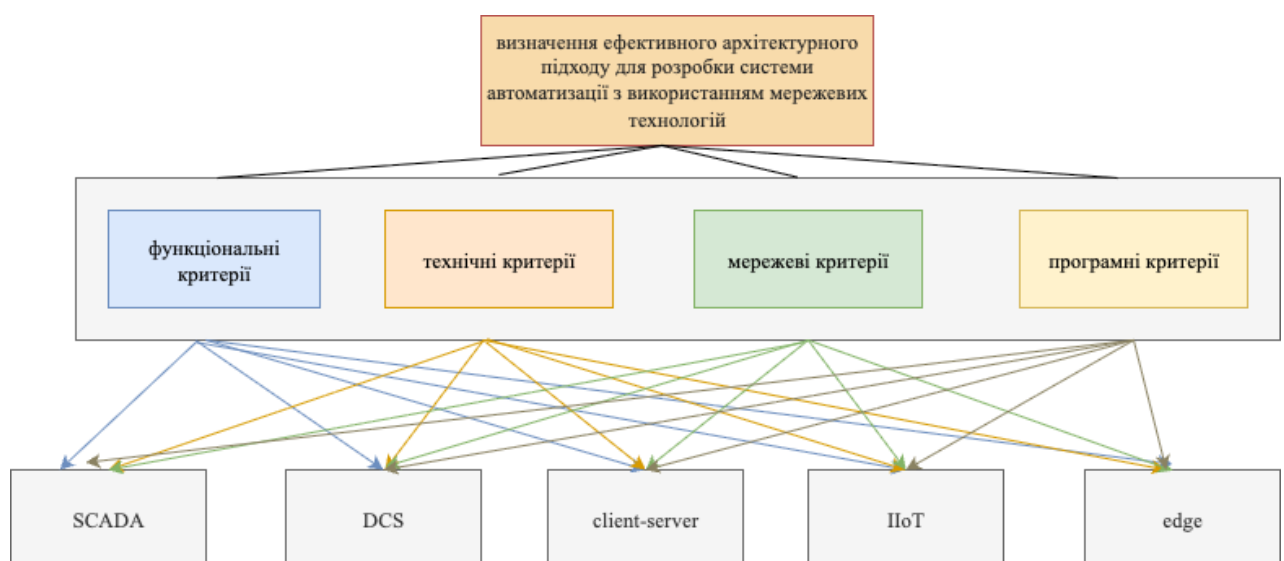


Рисунок 2.1 – Схематичне представлення декомпозиції задачі

Відповідно до методу аналізу ієрархій, запровадженого Т. Сааті, передбачається попарне порівняння критеріїв щодо їхнього впливу на загальну мету за дев'ятибальною шкалою. Переваги саме цієї шкали якісних оцінок відзначають багато дослідників, так як вона дозволяє найкраще врахувати ступінь відмінності. Наступним кроком формується матриця парних порівнянь, на головній діагоналі якої знаходяться одиниці.

При заповненні матриці парних порівнянь необхідно враховувати наступні принципи [25]:

- якщо порівнювані підходи за аналізованим критерієм однаково кращі, то відповідний елемент матриці дорівнює 1;
- якщо один із підходів має незначну перевагу над іншим за аналізованим критерієм, то відповідний елемент матриці дорівнює 3 або 4;
- якщо один із підходів має значну перевагу над іншим за аналізованим критерієм, то відповідний елемент матриці дорівнює 5 або 6;
- якщо один із підходів має явну перевагу над іншим за аналізованим критерієм, то відповідний елемент матриці дорівнює 7 або 8;
- якщо один із підходів абсолютну перевагу в порівнянні з іншим за аналізованим критерієм, то відповідний елемент матриці дорівнює 9.

Для підходу, з яким проводиться порівняння, записується зворотна величина елементу.

Для повноцінного аналізу та оцінки необхідно провести аналіз для кожної групи критеріїв. Отже, першим кроком шляхом експертного аналізу, порівнявши набір критеріїв, побудовано матрицю пріоритетів функціональних критеріїв, таблиця 2.5.

Таблиця 2.5 – Матриця пріоритетів функціональних критеріїв

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅
	Моніторинг	Управління обладнанням	Обмін даними	Візуалізація	Віддалений доступ
c ₁	1	5	7	3	4
c ₂	$\frac{1}{5}$	1	3	4	3
c ₃	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	1	2	1

Продовження таблиці 2.5

c_4	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$
c_5	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	2	1

Наступним кроком проводиться розрахунок вектору пріоритетів функціональних критеріїв за формулою:

$$P_n = \sqrt[n]{1 \cdot W_{c_2} \cdot W_{c_3} \cdot W_{c_n}}, \quad (2.1)$$

де n – кількість критеріїв;

W_{c_n} – значення пріоритету для кожного з критеріїв.

Наступним кроком розраховується вага кожного критерію за формулою:

$$V_{c_n} = \frac{P_n}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (2.2)$$

де n – кількість критеріїв;

P_n – вектор пріоритету.

Результати розрахунків пріоритетів, вектору пріоритетів та ваги функціональних критеріїв надано в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Результат розрахунку значень пріоритетів функціональних критеріїв

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	Вектор пріоритету	Вага критеріїв
c_1	1	5	7	3	4	3,34	0,52
c_2	$\frac{1}{5}$	1	3	4	3	1,48	0,23
c_3	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	1	2	1	0,63	0,098
c_4	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	0,41	0,064
c_5	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	2	1	0,54	0,084
Сума						6,4	

Відповідним чином було проведено розрахунки для кожної групи критеріїв. Результати розрахунків зведено до таблиці 2.7 – 2.12.

Таблиця 2.7 – Матриця пріоритетів технічних критеріїв

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄
	Відмовостійкість	Масштабованість	Робота в режимі реального часу	Безпека експлуатації
c ₁	1	5	3	4
c ₂	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
c ₃	$\frac{1}{3}$	3	1	2
c ₄	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1

Таблиця 2.8 – Результат розрахунку значень пріоритетів технічних критеріїв

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	Вектор пріоритету	Вага критеріїв
c ₁	1	5	3	4	2,78	0,55
c ₂	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	0,43	0,08
c ₃	$\frac{1}{3}$	3	1	2	1,19	0,23
c ₄	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0,71	0,14
Сума					5,11	

Таблиця 2.9 – Матриця пріоритетів мережевих критеріїв

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅
	Затримка	Пропускна здатність	Сегментація мережі	Кіберзахист	Втрата даних
c ₁	1	3	5	$\frac{1}{3}$	1
c ₂	$\frac{1}{3}$	1	3	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$
c ₃	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$
c ₄	3	5	7	1	3

Продовження таблиці 2.9

c_5	1	3	5	$\frac{1}{3}$	1
-------	---	---	---	---------------	---

Таблиця 2.10 – Результат розрахунку значень пріоритетів мережевих критеріїв

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	Вектор пріоритету	Вага критеріїв
c_1	1	3	5	$\frac{1}{3}$	1	1,38	0,2
c_2	$\frac{1}{3}$	1	3	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	0,58	0,09
c_3	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	0,29	0,04
c_4	3	5	7	1	3	3,16	0,47
c_5	1	3	5	$\frac{1}{3}$	1	1,38	0,2
Сума						6,79	

Таблиця 2.11 – Матриця пріоритетів програмних критеріїв

	c_1	c_2	c_3	c_4
	Підтримка інтерфейсів	Зміна конфігурації	Масштабованість	Модульність
c_1	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$
c_2	3	1	2	1
c_3	3	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$
c_4	5	1	2	1

Таблиця 2.12 – Результат розрахунку значень пріоритетів програмних критеріїв

	c_1	c_2	c_3	c_4	Вектор пріоритету	Вага критеріїв
c_1	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	0,39	0,08
c_2	3	1	2	1	1,57	0,34

Продовження таблиці 2.12

c ₃	3	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	0,93	0,2
c ₄	5	1	2	1	1,78	0,38
Сума					4,67	

Наступним кроком, відповідно до МАІ, проводиться розрахунок ваг альтернативних варіантів за кожним з вибраних критеріїв. Проте, з урахуванням того, що порівняння проводиться за 4 групами критеріїв, кожна з яких містить по 4-5 критеріїв, було прийняте рішення застосувати груповий підхід до розрахунку. Відповідно до класичного підходу, першим кроком здійснюється розрахунок для першого критерію кожної з групи. Відповідно до метода аналізу ієрархій, проводиться попарне порівняння критеріїв – архітектурних підходів. Результати порівняння та обчислень, що здійснювались за формулами 2.1 та 2.2 для розрахунку вектору пріоритету та ваги критерію відповідно з урахуванням групового підходу, представлено в таблиці 2.13. При обчисленні використовувався не кожен критерій з групи окремо, а оцінювалась загальна здатність архітектури забезпечувати весь набір функцій з відповідної групи.

У таблицях 2.13-2.16 наведено результати розрахунку ваг альтернативних варіантів для функціональних, технічних, мережевих та програмних критеріїв відповідно.

Таблиця 2.13 – Розрахунок ваг альтернативних варіантів за функціональною групою критеріїв

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	P	V
	SCADA (A)	DCS (B)	Client-server (C)	IoT (D)	Edge (E)	Вектор пріоритету	Вага критеріїв
A	1	3	5	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	1,05	0,15
B	$\frac{1}{3}$	1	3	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	0,55	0,08

Продовження таблиці 2.13

C	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	0,28	0,04
D	4	5	7	1	2	3,09	0,44
E	3	4	6	$\frac{1}{2}$	1	2,05	0,29
Сума						7,02	1

Таблиця 2.14 – Розрахунок ваг альтернативних варіантів за технічною групою критеріїв

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	P	V
	SCADA (A)	DCS (B)	Client-server (C)	ПоТ (D)	Edge (E)	Вектор пріоритету	Вага критеріїв
A	1	$\frac{1}{2}$	2	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0,76	0,14
B	2	1	3	1	1	1,43	0,26
C	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0,45	0,08
D	2	1	3	1	1	1,43	0,26
E	2	1	3	1	1	1,43	0,26
Сума						5,11	1

Таблиця 2.15 – Розрахунок ваг альтернативних варіантів за мережевою групою критеріїв

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	P	V
	SCADA (A)	DCS (B)	Client-server (C)	ПоТ (D)	Edge (E)	Вектор пріоритету	Вага критеріїв
A	1	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0,56	0,1
B	1	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0,66	0,12
C	2	2	1	1	1	0,28	0,04
D	3	2	1	1	1	1,43	0,26

Продовження таблиці 2.15

Е	3	2	1	1	1	1,43	0,26
Сума						7,52	1

Таблиця 2.16 – Розрахунок ваг альтернативних варіантів за програмною групою критеріїв

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	P	V
	SCADA (A)	DCS (B)	Client-server (C)	ПоТ (D)	Edge (E)	Вектор пріоритету	Вага критеріїв
A	1	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0,66	0,13
B	1	1	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0,76	0,15
C	2	1	1	1	1	1,15	0,22
D	2	2	1	1	1	1,32	0,25
E	2	2	1	1	1	1,32	0,25
Сума						4,67	1

Після отриманих результатів проводиться підсумковий розрахунок ваги кожного з альтернативних варіантів. Розрахунок проводиться за формулою:

$$S = \sum_{i=1}^{n=4} V_i \cdot V_{c_i}, \quad (2.3)$$

де V_i – вага критерію при розрахунку значень пріоритетів,

V_{c_i} – вага критерію при розрахунку ваг альтернативних варіантів кожним з критеріїв.

У таблиці 2.17 наведено результати розрахунку підсумкової ваги альтернативних варіантів.

Таблиця 2.17 – Підсумкова вага альтернативних варіантів

	c_1	c_2	c_3	c_4	S
	Функц. група	Техн. група	Мереж. група	Прогр. група	Підсумкова вага варіанту
SCADA	0,15	0,14	0,1	0,13	0,125
DCS	0,08	0,26	0,12	0,15	0,098
Client-Server	0,04	0,08	0,04	0,22	0,058
ПоТ	0,44	0,26	0,26	0,25	0,38
Edge	0,29	0,26	0,26	0,25	0,279

Отже, за результатами підсумкової ваги альтернатив можна зробити висновок, що для розробки системи автоматизації кіберфізичного виробництва з використанням мережевих технологій доцільно використовувати ПоТ-архітектурний підхід, адже саме він має надає гнучкість та масштабованість, забезпечує роботу у режимі реального часу, має кращі мережеві властивості та, загалом, забезпечує найкраще поєднання функціональних можливостей, технічних характеристик, мережевих властивостей та програмної гнучкості. Edge-архітектура може розглядатися як перспективне доповнення до ПоТ-рішення, зокрема для локальної обробки даних на рівні виробничого обладнання.

2.4 Висновки до другого розділу

У другому розділі було проаналізовано архітектурні підходи та стандарти проектування систем автоматизації з використанням мережевих технологій.

До проаналізованих підходів належать: SCADA, DCS, client-server, ПоТ, edge. Для визначення, який саме підхід оптимально використовувати при побудові системи були сформовані критерії оцінювання, відповідно до вимог до системи автоматизації. Із використанням зазначених критеріїв та методу аналізу ієрархій Томаса Сааті було проведено розрахунки, спираючись за експертний аналіз. Результат розрахунків – підсумкова вага варіанту, тобто числовий показник, що відображає, який саме архітектурний підхід задовольняє визначені критерії

оцінювання.

Таким чином, у наступному розділі буде розроблено проєкт системи автоматизації кіберфізичного виробництва з використанням IoT-орієнтованого архітектурного підходу. Це включатиме побудову загальної архітектури системи, вибір обладнання та мережевих технологій, проєктування програмної логіки та моделювання функціонування системи.

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ КІБЕРФІЗИЧНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ПОТ-АРХІТЕКТУРИ

3.1 Вибір мережевих технологій у проєктованій системі

Архітектура системи автоматизації в кіберфізичному виробництві поєднує апаратну та програмну інфраструктуру з використанням як дротових, так і бездротових технологій зв'язку. Такий підхід зумовлений необхідністю забезпечення надійного обміну даними в критичних технологічних процесах, а також гнучкої інтеграції мобільних та розподілених елементів системи.

Як було зазначено вище, стандарт ISA-95 надає чітку ієрархічну модель, яка є базою для побудови системи автоматизації та визначення взаємодії між рівнями управління у кіберфізичному виробництві.

На рівнях 0–1 моделі ISA-95, тобто у фізичному середовищі та на рівні автоматизованого управління, доцільне використовувати Industrial Ethernet. Це забезпечить високу швидкість та надійну передачу даних у режимі реального часу у критичних технологічних процесах, таких, як синхронне керування роботизованими маніпуляторами на конвеєрній лінії та координація дій між контролерами PLC (Programmable Logic Controllers). Також ця технологія забезпечить синхронізацію між усіма елементами системи.

Використання Wi-Fi 6 доцільне на рівні 2 – для диспетчерського управління та збору даних у межах в виробничих зон. Це забезпечить гнучкість та мобільність при підключенні операторських терміналів, мобільних роботів, сенсорних пристроїв. Висока пропускна здатність і мала затримка сигналу Wi-Fi 6 дозволять здійснювати моніторинг і контроль у реальному часі без необхідності прокладання дротів.

Технологія 5G може бути інтегрована на рівнях 2–3 для створення широкомасштабної інфраструктури зв'язку, яка об'єднує виробничі майданчики,

цехи й мобільні вузли. Це дозволить реалізувати високошвидкісну комунікацію між численними пристроями у великих виробничих комплексах, де важлива низька затримка та масштабованість.

Для систем енергоефективного моніторингу й збору даних із віддалених вузлів раціональним є впровадження LoRaWAN переважно на рівнях 3–4. LoRaWAN забезпечить дальність передачі сигналу до десятків кілометрів із мінімальним енергоспоживанням. Також дана технологія може використовуватися як канал передачі даних від автономних сенсорів і пристроїв моніторингу до контролерів або шлюзів, що забезпечує зв'язок між фізичними процесами та вищими рівнями системи автоматизації.

Також, щоб забезпечити масштабований обмін даними між пристроями, доцільно застосовувати протокол Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). MQTT брокер є центральним програмним компонентом ІоТ-системи, його використання дозволить реалізувати асинхронну модель обміну повідомленнями між сенсорами, контролерами, шлюзами та прикладними сервісами верхніх рівнів ISA-95, що є характерним для ІоТ-орієнтованих архітектур [26].

Таким чином, у проєктованій системі автоматизації застосовується гібридна мережева інфраструктура, у якій кожна технологія використовується відповідно до вимог конкретного рівня ISA-95. Такий підхід забезпечує оптимальне поєднання надійності, швидкодії, масштабованості та енергоефективності, що є необхідним для функціонування сучасної кіберфізичної системи автоматизації.

3.2 Побудова структурної схеми системи

Побудова структурної схеми є частиною розробки системи автоматизації виробництва. Така схема відображає взаємозв'язки між рівнями управління, обчислювальними елементами та мережевими технологіями та будується на основі стандарту ISA-95, який визначає п'ятирівневу архітектуру виробничих систем, що охоплює як фізичні процеси, так і інформаційно-керувальні рівні, та обраного ІоТ-орієнтованого архітектурного підходу.

На рівні 0, відповідно до ISA-95, розташовані фізичні процеси – обладнання, датчики, виконавчі механізми та пристрої збору даних. На цьому рівні доцільно застосовувати LoRaWAN, це забезпечить енергоефективний та далекодієвий канал зв'язку в IoT-середовищі.

Рівень 1 охоплює системи локального керування, такі як PLC-контролери або розподілені системи керування, які безпосередньо взаємодіють з технологічним обладнанням. Для забезпечення стабільного зв'язку та мінімальної затримки сигналів використовується Industrial Ethernet, адже є базовою мережевою технологією для критичних виробничих процесів

Рівень 2 відповідає за диспетчеризацію та моніторинг процесів через системи диспетчерського керування та збору даних (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA). На цьому рівні доцільним є застосування технології Wi-Fi 6, яка може забезпечити високу пропускну здатність і доступ до даних у реальному часі.

На рівні 3 відбувається управління виробничими операціями, планування завдань і контроль продуктивності. Для швидкої комунікації між підрозділами підприємства використовується 5G-мережа, що забезпечує низьку затримку та масштабованість. Використання MQTT-брокера забезпечить асинхронний обмін даними між контролерами, шлюзами та іншими компонентами системи. Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на мережу, підвищити масштабованість системи та забезпечити надійний обмін даними між рівнями ISA-95.

Рівень 4 включає бізнес-планування, управління ресурсами й аналітику. На цьому рівні здійснюється інтеграція верхнього рівня з виробничими рівнями через IoT-сервіси та стандартні протоколи обміну даними, що дозволяє забезпечити узгодженість між виробничими та бізнес-процесами [27].

Узагальнена структурна схема системи автоматизації кіберфізичного виробництва з використанням IoT-підходу наведена на рисунку 3.1. Схема відображає взаємодію між фізичним середовищем, обчислювальними компонентами та мережевими технологіями, що забезпечують передачу інформації між рівнями відповідно до моделі ISA-95.

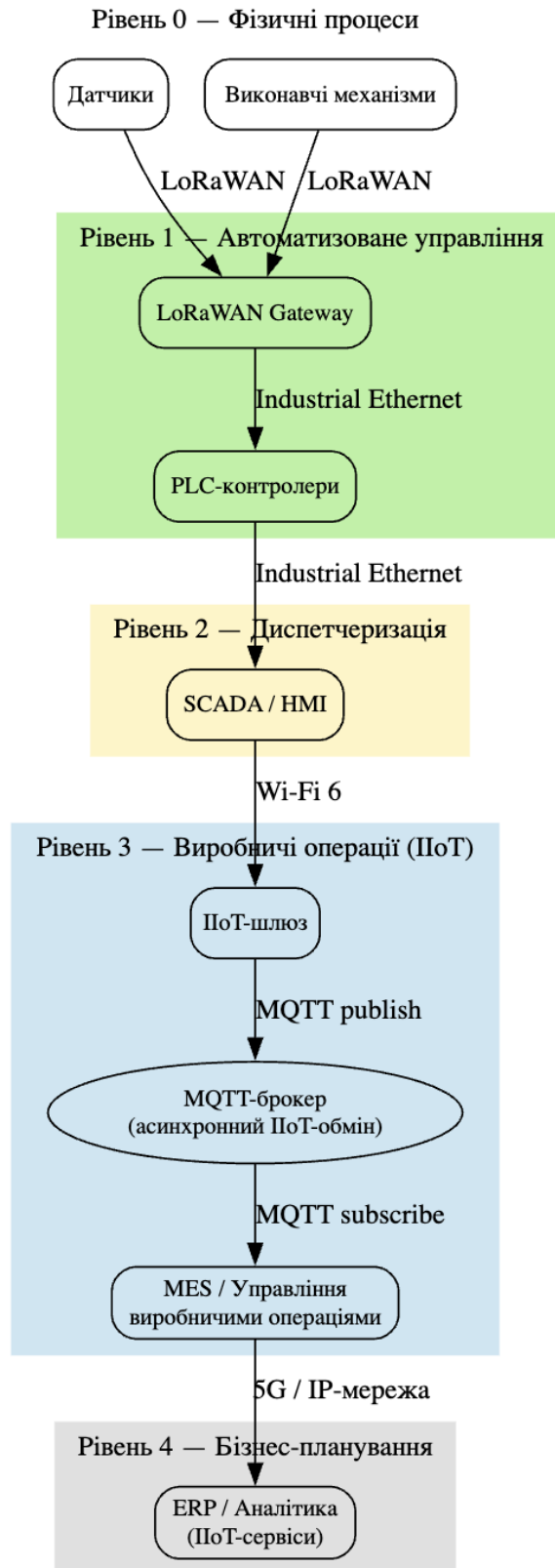


Рисунок 3.1 – Структурна схема автоматизованої кіберфізичної системи на основі стандарту ISA-95 та ІоТ-підходу

3.3 Програмна реалізація обміну даними в IoT-архітектурі

З метою демонстрації механізму обміну даними в IoT-орієнтованій архітектурі та перевірки взаємодії між рівнями системи автоматизації було програмно реалізовано асинхронний обмін даними з використанням MQTT-протоколу. Програмна реалізація імітує рівень фізичних пристроїв, брокер повідомлень, споживача даних.

Для програмної реалізації було використано мову програмування Python, оскільки вона містить велику кількість бібліотек для роботи з мережевими протоколами та асинхронним обміном даних, MQTT-брокер и протокол обміну даними, що є типовим для IoT-системи і широко застосовується для інтеграції пристроїв, шлюзів та сервісів у розподілених кіберфізичних системах.

Програмна реалізація складається трьох основних елементів. Першим елементом є імітація сенсорного пристрою на фізичному рівні моделі ISA-95, який формує дані для відправки (значення температури), не приймає керуючих команд і не виконує логіку управління, лише передає інформацію у систему. У IoT-системі сенсорні пристрої є джерелами даних, які публікують повідомлення у брокер, після чого дані використовуються різними споживачами. Такі пристрої не містять інформації про споживача та не встановлюють пряме з'єднання з ним.

Другий елемент – споживач, що підписується на отримання повідомлень від сенсорного пристрою, приймає та оброблює дані. Для оцінки ефективності передачі даних додатково обчислюється затримка доставки повідомлень, яка визначається як різниця між часом відправки (часова мітка, яку формує сенсор) та часом отримання повідомлення.

Третій елемент – MQTT-брокер, який виконує роль центрального вузла обміну даними в системі. Він приймає повідомлення від сенсорів та направляє дані відповідним клієнтам (споживачам). Використання брокера забезпечує асинхронність, зменшення навантаження на мережу.

Для імітації роботи брокера було завантажено та запущено відповідний докер-контейнер, споживач та сенсор – два окреми файли, що містять необхідний програмний код для формування та отримання повідомлень.

Для програмної реалізації обміну даними за протоколом MQTT було використано бібліотеку `raho-mqtt`, яка забезпечує підтримку моделі `pubslish-subscribe` та широко застосовується для інтеграції сенсорів у кіберфізичних системах [28].

Модель `publish/subscribe` – це шаблон обміну повідомленнями, у якому відправники повідомлень (`producer`), класифікують повідомлення за класами і відправляють їх, не знаючи, які компоненти (`consumer`) отримають. Одержувачі повідомлень, виявляють інтерес до одного або кількох класів і отримують повідомлення лише з цих класів, не знаючи особи видавців.

Цей підхід розділяє компоненти, що генерують повідомлення, від тих, що їх споживають, і підтримує асинхронний зв'язок «many to many». Така модель часто протиставляється моделям обміну повідомленнями на основі черг повідомлень і «point-to-point», де виробники надсилають повідомлення безпосередньо споживачам.

Цей шаблон забезпечує велику масштабованість мережі та підтримує більш динамічні топології, але може ускладнити зміну логіки відправника або структури даних, що публікуються. У порівнянні з синхронними шаблонами та обміном повідомленнями «point-to-point», модель «publish-subscribe» забезпечує найвищий рівень розв'язки між архітектурними компонентами.

У більшості систем відправники та одержувачі взаємодіють через центрального посередника, такого як брокер повідомлень або шина подій. Брокер отримує повідомлення від видавців та пересилає їх відповідним передплатникам, при необхідності виконуючи операції збереження та пересилання, пріоритетної черги або іншу логіку маршрутизації [29].

Для реалізації затримки передачу даних, імітації генерації повідомлень та роботи з часовими інтервалами було використано стандартні бібліотеки `datetime`,

time, що дозволило здійснити оцінку затримок при передачі даних. Модуль datetime надає класи для маніпулювання датами та часом [30].

На рисунку 3.2 наведено результат роботи програми – формування та відправка повідомлення сенсором. На рисунку 3.3 наведено результат зчитування цих повідомлень користувачем.

```

client = mqtt.Client(protocol=mqtt.MQTTv311)
IIoT Sensor started...
Published: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 23.56, 'timestamp': 1765730605.500055}
Published: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 21.19, 'timestamp': 1765730607.5054011}
Published: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 28.89, 'timestamp': 1765730609.509883}
Published: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 23.66, 'timestamp': 1765730611.515268}
Published: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 23.66, 'timestamp': 1765730613.516833}
Published: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 27.32, 'timestamp': 1765730615.5222368}
Published: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 24.81, 'timestamp': 1765730617.525593}
Published: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 27.87, 'timestamp': 1765730619.528629}

```

Рисунок 3.2 – Результат відправки даних сенсором

The screenshot shows a terminal window with five tabs labeled 'Local (1)' through 'Local (5)'. The active tab 'Local (4)' displays the following output:

```

Terminal Local (1) Local (2) Local (3) Local (4) Local (5) + v
Connected to MQTT broker, rc = 0
Subscribed to topic: iiot/sensor/temperature
Connected to MQTT broker, rc = 0
Subscribed to topic: iiot/sensor/temperature
Connected to MQTT broker, rc = 0
Subscribed to topic: iiot/sensor/temperature
Connected to MQTT broker, rc = 0
Subscribed to topic: iiot/sensor/temperature
Received: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 22.97, 'timestamp': 1765731236.586793}
Latency: 0.005 s

Connected to MQTT broker, rc = 0
Subscribed to topic: iiot/sensor/temperature
Received: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 22.65, 'timestamp': 1765731238.592084}
Latency: 0.002 s

Connected to MQTT broker, rc = 0
Subscribed to topic: iiot/sensor/temperature
Received: {'sensor_id': 'temp_01', 'value': 21.57, 'timestamp': 1765731240.5942771}
Latency: 0.002 s

```

Рисунок 3.3 – Результат зчитування повідомлень споживачем

З виводу програми видно, що кожне повідомлення було отримано з мінімальною затримкою, з чого можна зробити висновок, що асинхронний обмін

даними з використанням MQTT забезпечує швидку передачу інформації між компонентами ІоТ-архітектури. Це підтверджує доцільність використання обраного архітектурного підходу для реалізації обміну даними між рівнями ISA-95 у системах кіберфізичного виробництва.

3.4 Висновки до третього розділу

Третій розділ присвячено архітектурі системи автоматизації кіберфізичного виробництва. На основі проведених аналізів мережевих технологій та архітектурних підходів, було обрано гібридну мережеву інфраструктуру, що поєднує дротові та бездротові технології.

Технології обрано відповідно до рівнів моделі ISA-95, було обґрунтовано доцільність використання певної технології на відповідному рівні. Таким чином, Industrial Ethernet доцільно використовувати для критичних процесів управління, Wi-Fi 6 – диспетчерський рівень, 5G – для міжрівневої комунікації, LoRaWAN – для енергоефективного збору даних. Додатково визначено роль MQTT як базового протоколу обміну даними в ІоТ архітектурі.

Побудовано структурну схему системи автоматизації, яка відображає взаємодію компонентів системи та мережевих технологій.

Також виконано програму реалізацію асинхронного обміну даними між компонентами системи з використанням MQTT-протоколу та мови програмування Python. Результат роботи програми підтвердив ефективність обраного підходу та коректну передачу даних між логічними рівнями системи.

4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

4.1 Загальна характеристика системи

Запропонована система автоматизації поєднує виробничі процеси з інформаційно-керувальними та аналітичними рівнями управління. Архітектура системи побудована з урахуванням стандарту ISA-95 та реалізує ІоТ-архітектурний підхід, що реалізує інтеграцію обладнання, контролерів, інформаційних систем і мережевих технологій в єдине середовище обміну даними.

Для забезпечення ефективної взаємодії між рівнями моделі ISA-95 система використовує гібридну мережеву інфраструктуру, яка поєднує дротові та бездротові технології. Такий підхід відповідає вимогам щодо швидкості, надійності, масштабованості та енергоефективності.

Основною особливістю запропонованої системи є використання ІоТ-архітектурного підходу з MQTT-протоколом. Асинхронна взаємодія між компонентами системи забезпечує слабке з'єднання між рівнями, підвищує масштабованість та спрощує інтеграцію нових пристроїв і сервісів без суттєвої перебудови архітектури.

Таким чином, розроблена система автоматизації відповідає сучасним вимогам до кіберфізичних виробничих систем і створює основу для подальшого розвитку, цифровізації та інтелектуалізації виробничих процесів.

4.2 Порівняльний аналіз з традиційними системами автоматизації

Зазвичай, у промисловості використовуються системи автоматизації, що побудовані на базі централізованих SCADA-рішень, програмованих логічних контролерів та фіксованих дротових каналів зв'язку. Це забезпечує стабільну роботу процесів, проте мають обмежену гнучкість та масштабованість, та є

недостатньо ефективним при динамічному виробництві.

В умовах стрімкого розвитку, сучасні виробничі системи потребують інтеграції з мобільними пристроями, автоматизованими роботами, наявність віддалених сенсорів, хмарних сервісів, що важко реалізувати в межах традиційних систем. Тому все частіше впроваджуються IoT-орієнтовані рішення з використанням бездротових технологій і асинхронних протоколів, результати методу аналізу ієрархій це підтверджують.

Як було зазначено вище, південнокорейська компанія CJ Logistics запровадила приватну 5G-мережу всередині складських приміщень для точного внутрішнього позиціонування, управління та координації у режимі реального часу. Впровадження бездротової технології підвищило безпеку та контроль приміщень та рівень продуктивності на 20%, а капітальні витрати скоротило на 15%.

Другим прикладом є компанія Bosch, яка використанням LoRaWAN для моніторингу обладнання знизила кількість аварійних випадків на 27% та оптимізувала витрати на технічне обслуговування [15].

Так як запропонована система автоматизації кіберфізичного виробництва поєднує переваги класичних рішень та IoT-орієнтовані рішення, з урахуванням проведеного аналізу та результатів програмної реалізації, можна очікувати, що впровадження такої системи автоматизації дозволить:

- зменшити затримку передачу даних між рівнями керування на 30%;
- зменшити витрати на технічне обслуговування обладнання на 20%;
- підвищити гнучкість і масштабованість системи без додаткових витрат.

Отже, запропонована система автоматизації з використанням мережевих технологій перевершує традиційні системи за показниками гнучкості, масштабованості, ефективності передачі даних завдяки архітектурному підходу та поєднанню дротових та бездротових технологій.

Результати експертної оцінки та порівняльної характеристики систем автоматизації зведено до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняльна характеристика систем автоматизації

Критерій	Чинна система	Запропонована система
архітектура	централізована, жорстка ієрархія	децентралізована, IoT-орієнтована
обмін даними	синхронна	асинхронна
мережеві технології	переважно дротові	гібридна
масштабованість	обмежена	висока
затримка	середня, висока	знижена на 30%
підтримка нових пристроїв	обмежена	спрощена
стійкість до відмов	залежність від центрального вузла	підвищена за рахунок розподіленої архітектури
енергоефективність	низька для віддалених сенсорів	висока
підтвердження ефективності	теоретичні дані	програмна реалізація

4.3 Охорона праці при проектуванні системи автоматизації

Відповідно до Закону України «Про охорону праці», охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності [31]. Роботодавець зобов'язаний створити безпечні умови праці та забезпечити функціонування системи управління охороною праці на всіх етапах життєвого циклу виробничої системи.

З огляду на те, що сучасні кіберфізичні виробництва мають високий рівень автоматизації, широке застосування мережевих технологій та обчислюваних систем, процес забезпечення безпеки умов праці є невід'ємною складовою процесу проектування системи автоматизації.

При проектуванні системи автоматизації кіберфізичного виробництва з використанням мережевих технологій необхідно брати до уваги потенційні загрози та небезпечні виробничі фактори, які можуть виникнути у процесі роботи системи. До таких загроз належать ураження електричним струмом, електромагнітні випромінювання, ризики відмови компонентів систем, що може призвести до аварійних ситуацій.

З метою мінімізації ризиків доцільно використовувати лише сертифіковані промислові мережеві компоненти, захищені канали зв'язку та дотримуватись зонування мережі відповідно до моделі ISA-95. Локалізації можливих відмов можна досягнути шляхом розмежування рівнів управління та сегментацією мережі, також це зменшить ризик поширених аварійних режимів та підвищить загальну безпеку експлуатації системи.

Також при проектуванні системі необхідно передбачувати дублювання критичних каналів зв'язку та резервування мережевих компонентів, застосовувати надійні протоколи обміну даними, що контролюють доставку повідомлень. У запропонованій системі автоматизації таким протоколом є MQTT, його використання дозволить забезпечити передбачуваний керований обмін даними між компонентами системи.

Загалом, застосування мережевих технологій у системах автоматизації виробництва створює можливість для підвищення рівня охорони праці шляхом впровадження віддаленого моніторингу та диспетчерського управління.

Отже, при проектуванні системи автоматизації кіберфізичного виробництва важливо враховувати можливі ризики та брати до уваги її вразливості для мінімізації ймовірності інцидентів. Пропонована система базується на побудові чіткої ієрархічної структури на основі моделі ISA-95, передбачає використання перевірених мережевих технологій та надійного протоколу обміну даними, що забезпечить стабільну безперечну роботу виробництва.

4.4 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі надано загальну характеристику пропонованої системи автоматизації із порівняльним аналізом чинних систем. У результаті аналізу побудовано таблицю, яка відображає певні переваги системи, такі як енергоефективність, масштабованість, спрощена підтримка нових пристроїв та зниження затримки при передачі даних.

Також було розглянуто питання охорони праці у контексті проектування систем автоматизації виробництв, зазначено, що необхідно брати до уваги при проектуванні системи для мінімізації ризиків. Зазначено, що запропонована система автоматизації розроблена з урахуванням можливих вразливостей та вимог безпеки, що підтверджує доцільність її впровадження у кіберфізичному виробництві.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було розроблено систему автоматизації кіберфізичного виробництва з використанням поєднання дротових та бездротових мережевих технологій та IoT-орієнтованого архітектурного підходу.

У першому розділі проведено аналіз предметної області, досліджено поняття та завдання автоматизації кіберфізичних систем, проведено аналіз мережевих технологій у сучасних системах автоматизації, зокрема Industrial Ethernet, Wi-Fi 6, 5G, LoRaWAN. Було визначено вимоги до системи автоматизації, на основі яких було побудовано критерії оцінювання архітектурних підходів у другому розділі.

Другий розділ присвячено дослідженню архітектурних підходів до побудови системи автоматизації кіберфізичного виробництва. Розглянуто SCADA, DCS, клієнт-серверну, IoT, edge-архітектурні підходи та їхню відповідність стандарту ISA-95. Для визначення оптимального архітектурного підходу для побудови системи автоматизації кіберфізичного виробництва було використано метод аналізу ієрархій Т. Сааті, саме цей метод доцільно використовувати при вирішенні багатокритеріальних задач. Результати розрахунків підтвердили, що саме IoT-орієнтований архітектурний підхід є найбільш ефективним для реалізації необхідної системи з урахуванням групи вимог.

У третьому розділі виконано проектування системи автоматизації на основі обраного підходу та стандарту ISA-95. Було обґрунтовано вибір поєднання мережевих технологій для кожного рівня моделі, побудовано структурну схему та реалізовано програмну модель обміну даними з використанням MQTT протоколу. Програма продемонструвала асинхронну взаємодію між компонентами системи та підтвердила можливість ефективного обміну даними в IoT-орієнтованому середовищі.

Четвертий розділ містить дослідження питання охорони праці при проектуванні систем автоматизації кіберфізичного виробництва та загальний опис запропонованої системи автоматизації та порівняльний аналіз із традиційними системами, який зведено до таблиці із зазначенням переваг та недоліків досліджуваних систем.

Отже, програмна реалізація та порівняльний аналіз підтвердили, що використання поєднання дротових та бездротових мережевих технологій та IoT-орієнтованого підходу дозволяє суттєво покращити ключові характеристики системи автоматизації. Запропоноване рішення забезпечує гнучкість, масштабованість і продуктивність, що робить його перспективним для застосування у сучасних промислових підприємствах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. №50. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademichnu-dobrochesnost.prds.
2. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. ДП «УкрНДНД», 2016. – 31 с.
3. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 49 с.
4. Cyber-Physical Systems [Електронний ресурс] / Fortinet. – Режим доступу: <https://www.fortinet.com/resources/cyberglossary/cyber-physical-systems> – 02.12.2025 р. – Загол. з екрану.
5. Rajkumar R. Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution: Proceedings of the IEEE / New York: IEEE, 2021. – 230 p.
6. Lee E. A. Cyber Physical Systems: Design Challenges // Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). – Orlando, USA, 2008. – P. 363–369.
7. IEEE 802.11ax White Paper [Електронний ресурс] / IEEE Xplore. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8466994> – 05.12.2025 р. – Загол. з екрану.
8. Network Technology – Overview [Електронний ресурс] / ScienceDirect. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/network-technology> – 30.10.2025 р. – Загол. з екрану.

9. Automation in Manufacturing / Proceedings of AIM Conference [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ras.papercept.net/images/temp/AIM/files/0210.pdf> – 05.12.2025 р. – Загол. з екрану.

10. What is Wi-Fi 6? Everything RF. URL: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-wi-fi-6> 03.12.2025– Загол. з екрану..

11. What is OFDMA? Everythin RF. URL: <https://www.everythingrf.com/community/ofdma> (дата звернення: 03.12.2025).

12. Transforming Warehouse Operations [Електронний ресурс] / Ericsson. – Режим доступу: <https://www.ericsson.com/en/cases/2023/transforming-warehouse-operations> – 30.10.2025 р. – Загол. з екрану.

13. What is LORAWAN? Everythin RF. URL: <https://www.everythingrf.com/community/lorawan> (дата звернення: 03.12.2025).

14. Bosch Connected Industry: LoRaWAN Use Cases [Електронний ресурс] / LoRa Alliance. – Режим доступу: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/bosch_berlin_2019_0.pdf – 30.10.2025 р. – Загол. з екрану.

15. White Paper IEEE 802.11ax / Siemens. – Siemens AG, 2022. – 16 с.

16. Industrial ethernet standarty [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://svtsvet.com.ua/ru/industrial-ethernet-standarty-i-vozmozhnosti-primeneniya-ru.html> – 30.10.2025 р. – Загол. з екрану.

17. IEC 62264-1:2013. Enterprise-control system integration – Part 1: Models and terminology. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2013.

18. ISO 22400-2:2014. Automation systems and integration – Key performance indicators (KPIs). Geneva : International Organization for Standardization, 2014.

19. Lee E. Principles of Cyber-Physical Systems: Textbook / Cambridge: MIT Press, 2020. – 405 p.

20. NIST SP 800-82 Rev. 3. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2022.

21. SCADA // Wikipedia : вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. –

- Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/SCADA> (дата звернення: 05.12.2025).
22. Server Model // Wikipedia : вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/client_server_model (дата звернення: 05.12.2025).
23. Internet of Things // Wikipedia : вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/industrial_internet_of_things (дата звернення: 05.12.2025).
24. ISA-95 Standard [Електронний ресурс] / International Society of Automation (ISA). – Режим доступу: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard> – 30.10.2025 р. – Загол. з екрану.
25. Метод аналізу ієрархій. URL: <https://dss.tg.ck.ua/ahp-help> (дата звернення 05.06.2023).
26. What is MQTT? // Amazon Web Services [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aws.amazon.com/what-is/mqtt/> (дата звернення: 06.12.2025).
27. What is ISA-95? // MaintainX Learning Center [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.getmaintainx.com/learning-center/what-is-isa-95> (дата звернення: 06.12.2025).
28. Paho-MQTT : Python client library for MQTT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eclipse.org/paho/index.php?page=clients/python/index.php> (дата звернення: 06.12.2025).
29. Subscribe Pattern // Wikipedia : вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/subscribe_pattern (дата звернення: 05.12.2025).
30. Basic date and time types // Python 3 Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.python.org/3/library/datetime.html> (дата звернення: 06.12.2025).
31. Про охорону праці: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення 7.12.2025).