

К

КНУБА

Київський національний університет  
будівництва і архітектури

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А   Р О Б О Т А

Бакалавр · Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

# Архітектура цифрової тіні для автоматизованої лінії складання

Industry 4.0

Digital  
Shadow

MQTT 5.0

CoppeliaSim

Grafana

В И К О Н А В

Гапончук Ярослав Валерійович

Н А У К О В И Й   К Е Р І В Н И К

К.т.н. доц. Гуменний Д.О.

Київ · 2026

Факультет автоматизації  
і інформаційних технологій  
Кафедра кібербезпеки  
та комп'ютерної інженерії

# Мета кваліфікаційної роботи



М Е Т А

## Розробка та практична реалізація

Розробка архітектури цифрової тіні для автоматизованої лінії складання та її **практична реалізація** на базі **відкритого програмного забезпечення** з демонстрацією повного циклу від генерації телеметричних даних до візуального представлення оператору.

01

### Об'єкт дослідження

Процес цифровізації автоматизованих ліній складання дискретних виробів

02

### Предмет дослідження

Архітектура, методи та програмні засоби побудови системи цифрової тіні

03

### Методи

Системний підхід, об'єктно-орієнтоване та потокове програмування, імітаційне моделювання

# Актуальність та цінність роботи

I4

## Industry 4.0

Активне поширення принципів Industry 4.0 серед промислових підприємств України та потреба в доступних масштабованих рішеннях для цифровізації виробництва

ISO

## Стандарт ISO 23247:2021

Поява референсної архітектури цифрових двійників для виробництва, що формалізує термінологію та структурні принципи побудови систем

OSS

## Open Source стек

Зрілість відкритих платформ Coppeliasim, Eclipse Mosquitto, Node-RED, InfluxDB, Grafana дає змогу замінити пропріетарні рішення

### П РА К Т И Ч Н Е   З Н А Ч Е Н Н Я

## Готовий до повторного впровадження шаблон цифровізації

Розроблена архітектура та усі програмні артефакти (Node-RED flows, схеми InfluxDB, шаблони дашбордів Grafana, MQTT-публікатор) можуть бути використані як base template для проектів цифровізації автоматизованих ліній різного призначення на машинобудівних та приладобудівних підприємствах.

# 1 ЗАВДАННЯ

## Теоретичний аналіз Industry 4.0 та концепцій цифрового представлення

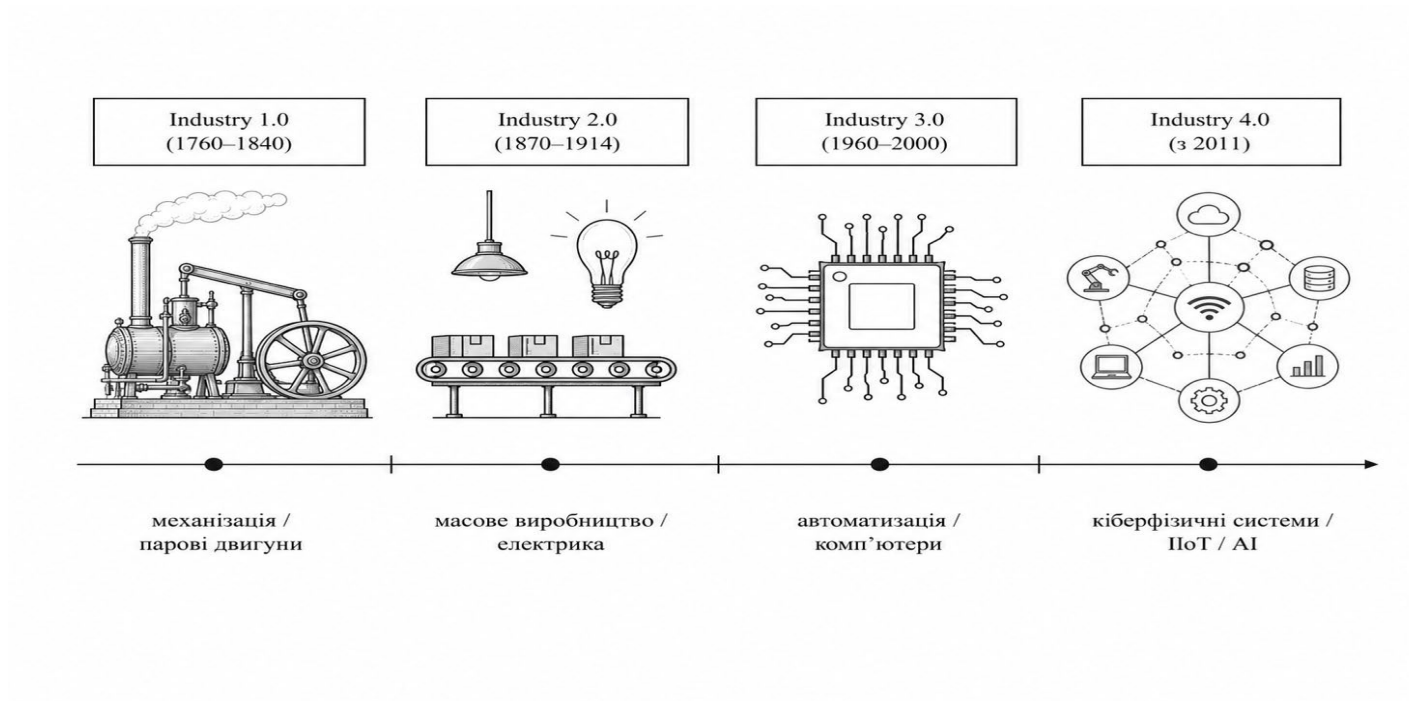


Рисунок 1 — Еволюція промислових революцій від Industry 1.0 до Industry 4.0

### КЛЮЧОВІ КОНЦЕПЦІЇ

Три рівні цифрового представлення фізичного об'єкта

| Критерій      | Модел ь  | Тінь       | Двійник   |
|---------------|----------|------------|-----------|
| Потік даних   | Ручний   | Однобічний | Двобічний |
| Синхронізація | Статична | Near-RT    | Real-time |
| Керування     | Немає    | Моніторинг | Активне   |

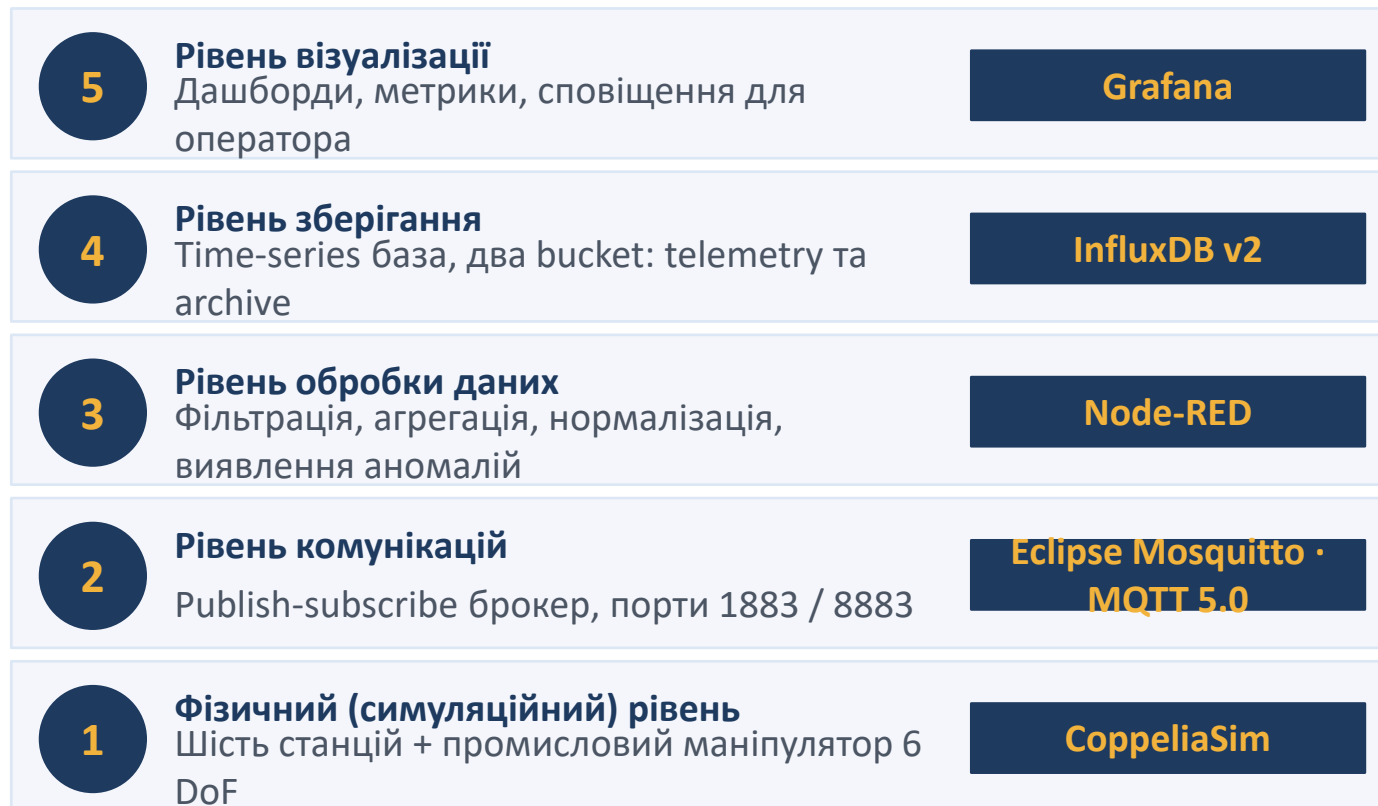
**Цифрова тінь** — оптимальний компроміс між простотою цифрової моделі та функціональністю двійника для задач моніторингу

## 2 ЗАВДАННЯ

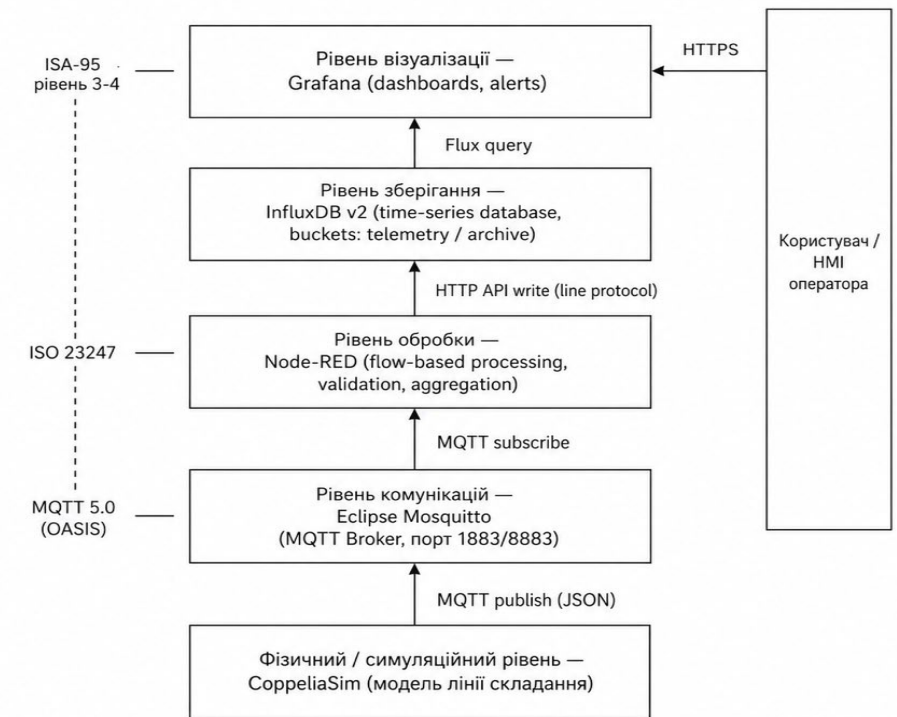
### Багаторівнева архітектура системи цифрової тіні

#### П'ять функціональних рівнів

згідно з референсною моделлю ISO 23247



Загальна структурна схема системи цифрової тіні



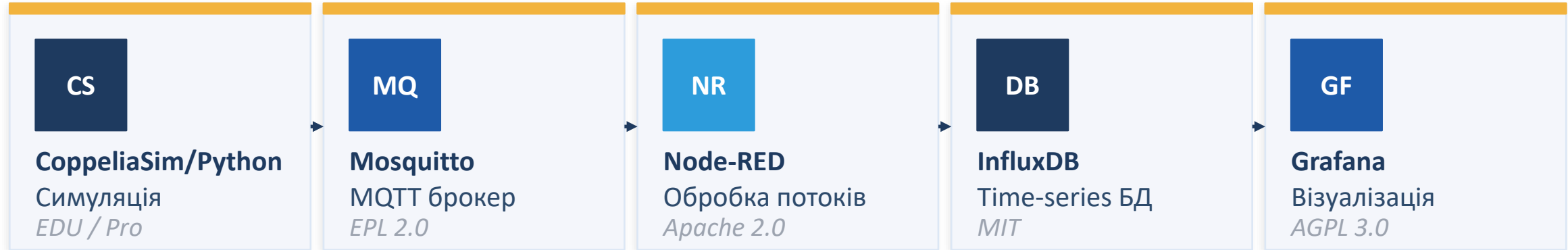
Односторонній потік даних — від фізичного об'єкта до цифрового представлення

Рисунок 3 — Загальна структурна схема системи

## 3

## ЗАВДАННЯ

## Вибір та порівняльний аналіз технологічного стеку



## КРИТЕРІЇ ВИБОРУ КОМПОНЕНТІВ

- **Ліцензія**  
Тільки відкриті ліцензії дозволяють вільне впровадження
- **Документація**  
Активна спільнота та повна офіційна документація
- **Зрілість**  
Тривала історія промислової експлуатації (5+ років)
- **Інтеграція**  
Усі компоненти взаємодіють без власних адаптерів
- **MQTT 5.0**  
Підтримка останньої версії стандарту OASIS 2019
- **Розширюваність**  
Можливість додавати власні модулі та плагіни

## 4 ЗАВДАННЯ

### Симуляційна модель автоматизованої лінії складання у CoppeliaSim



Рисунок 4 — Структурна схема технологічного процесу складання (6 станцій)

Станції лінії: S1 Завантаження → S2 Позиціонування → S3 Збірна → S4 Контроль → S5 З'єднання → S6 Маркування

## ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ

**6**  
робочих станцій  
повний техн. цикл

**6 DoF**  
пром. маніпулятор  
KUKA KR6 / ABB IRB 1200

**50 мс**  
крок симуляції dt  
близько до реального часу

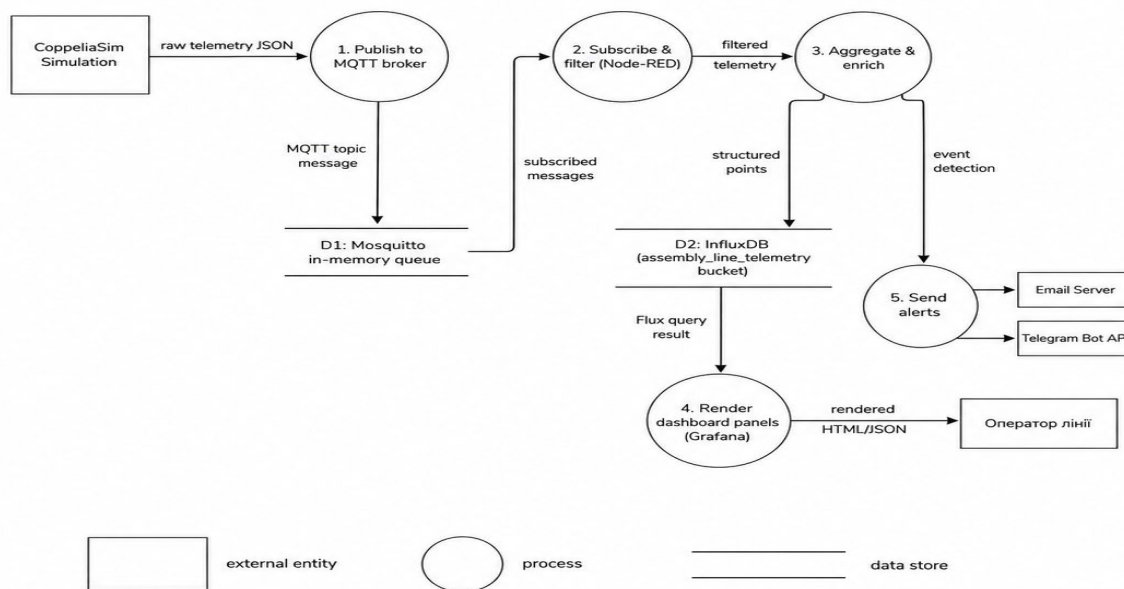
**200**  
msg/s у пікові періоди  
первинна вимога

5

## ЗАВДАННЯ

## Програмні модулі публікатора MQTT, потоків Node-RED та схеми InfluxDB

Діаграма потоків даних системи цифрової тіні (DFD рівня 1)



## MQTT публікатор

CoppeliaSim → Mosquitto

- Структура тем: line/L1/station/N/{параметр}
- Чотирирівнева ієрархія, формат JSON
- QoS 0/1/2 відповідно до критичності даних

## Node-RED flow

Понад 30 вузлів обробки

- Фільтрація шумів і дублікатів повідомлень
- Агрегація даних за 5 / 60 секунд
- Виявлення аномалій (правила + пороги)

## InfluxDB схема

5 measurements, 2 buckets

- manipulator\_telemetry: 10 Гц, joint\_1–6
- conveyor\_telemetry: 5 Гц, speed, current
- Downsampling 5-хв середніх раз на годину

Рисунок 5 — Діаграма потоків даних системи (DFD рівня 1)



6

ЗАВДАННЯ

Чотири інтерактивних дашборди в Grafana з системою сповіщень



Рисунок 6 — Дашборд «Виробничий моніторинг — Лінія L1»: cycle time, throughput, OEE

Чотири дашборди

- 1

**Виробничий моніторинг**  
Cycle time, throughput, OEE по лінії L1
- 2

**Стан обладнання станцій**  
Температура, струм, статуси кожної станції
- 3

**Аналіз OEE**  
Availability, Performance, Quality за зміну
- 4

**Аварійні події**  
Журнал alerts, маршрутизація сповіщень

СПОВІЩЕННЯ

· Telegram

7

## ЗАВДАННЯ

### Тестування системи за п'ятьма сценаріями та оцінка продуктивності

850 мс

медіанна затримка

вимога  $\leq 5\,000$  мс

800 msg/s

пікове навантаження

вимога  $\geq 200$  msg/s

5 / 5

виявлені аномалії

усі сценарії пройдено

< 20 %

завантаження CPU

при  $\times 4$  паралельних сесіях

## П'ЯТЬ ТЕСТОВИХ СЦЕНАРІЇВ

Усі аномалії виявлено успішно

|   |                           |       |                             |
|---|---------------------------|-------|-----------------------------|
| 1 | Нормальна робота          | —     | Базова лінія для порівняння |
| 2 | Перегрів маніпулятора     | 7 хв  | Telegram                    |
| 3 | Зупинка конвеєра          | < 1 с | Telegram (критичне)         |
| 4 | Зростання cycle time      | 13 хв | Telegram                    |
| 5 | Втрата зв'язку з брокером | 30 с  | Telegram                    |

# Висновки кваліфікаційної роботи

## МЕТУ ДОСЯГНУТО

### Усі сім завдань виконано

- Розроблено архітектуру цифрової тіні відповідно до референсної моделі стандарту ISO 23247 з повним покриттям п'яти функціональних рівнів
- Реалізовано систему повністю на відкритих ліцензіях (CoppeliaSim, Mosquitto, Node-RED, InfluxDB, Grafana) без розробки власних протоколів обміну
- Усі функціональні та нефункціональні вимоги задоволено: медіанна затримка 850 мс при вимозі  $\leq 5\,000$  мс, пропускна здатність у 4 рази вища за первинну
- Усі п'ять тестових сценаріїв пройдено успішно з виявленням аномалій від  $< 1$  секунди до 13 хвилин відповідно до типу деградації

## ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

- **Прогнозне обслуговування**  
Інтеграція алгоритмів машинного навчання для прогнозу відмов обладнання
- **Перехід до повного двійника**  
Розширення моделі зі зворотним каналом керування та симуляційними прогнозами
- **AR / VR інтерфейс**  
Інтерфейс доповненої та віртуальної реальності для оператора лінії
- **Інтеграція з ERP / MES**  
Підключення до корпоративних систем за стандартом OPC UA



К Н У Б А

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

# Дякую за увагу

*Готовий відповісти на запитання комісії*

**Архітектура цифрової тіні для автоматизованої лінії складання**

*Кваліфікаційна робота бакалавра · Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія» ·*

*Київ 2026*