

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет

Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
Розроблення SCADA-системи керування виробничою лінією з використанням
IoT
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи КТРСМ-24-1
Олег ЮРЧЕНКО
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Артем БРОННІКОВ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри _____

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ АКТ _____

Кафедра _____ КІТАР _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

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

(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Юрченку Олегу Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення SCADA-системи керування виробничою лінією з
використанням IoT

затверджена наказом університету від 10 11 2025 р. № 1018 Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 18 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Програмне забезпечення Arduino IDE, Node-RED, плата ESP-
WROOM-32, датчики DHT11, HC-SR04, виконавчі пристрої SG90, база даних SQLite

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ;

Огляд літератури та аналіз предметної області;

Вибір та обґрунтування технічних засобів;

Розробка програмного забезпечення;

Експериментальні дослідження;

Висновки;

Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Слайди у форматі PowerPoint презентації у кількості 17 слайдів з розширенням .pptx.

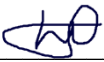
6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою	20.09.2025	Виконано
2	Аналіз ТЗ	07.10.2025	Виконано
3	Аналіз сучасних SCADA-систем	10.10.2025	Виконано
4	Аналіз вимог до розробки SCADA-системи за темою	15.10.2025	Виконано
5	Вибір програмних та апаратних засобів	25.10.2025	Виконано
6	Розроблення апаратної частини лабораторного макету системи моніторингу за процесом	10.11.2025	Виконано
7	Розроблення програмної частини лабораторного макету системи моніторингу за процесом	20.11.2025	Виконано
8	Впровадження експоненціального згладжування	05.12.2025	Виконано
9	Проведення експериментальних досліджень з згладженням даних та прогнозуванням	08.12.2025	Виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	12.12.2025	Виконано
11	Захист кваліфікаційної роботи	18.12.2025	

Дата видачі завдання _____ 20__ р.

Здобувач _____  Олег ЮРЧЕНКО _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Артем БРОННІКОВ _____
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

Я, Юрченко Олег Дмитрович, 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.

12.12.2025



Юрченко О.Д.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 145 с., 16 табл., 33 рис., 4 дод., 30 джерел.

SCADA, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, ІНДУСТРІЯ 4.0, МОНІТОРИНГ, СИСТЕМА ЗБОРУ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ, ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНЕ ЗГЛАДЖУВАННЯ, NODE-RED

Актуальність цієї кваліфікаційної роботи зумовлена зростаючим попитом на впровадження сучасних автоматизованих систем керування та моніторингу виробничих процесів, що базуються на технологіях Інтернету речей.

Застосування SCADA-систем дає змогу ефективно збирати, обробляти та аналізувати дані в режимі реального часу, підвищуючи продуктивність, надійність і безпечність роботи промислових об'єктів. Створення такої системи забезпечує оптимізацію функціонування виробничої лінії, оперативне виявлення відхилень у технологічних процесах та зменшення ймовірності аварій, що є особливо важливим у контексті цифрової трансформації промисловості та переходу до концепції «розумного виробництва».

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення ефективності спостереження, передачі даних з датчиків виробничої лінії для гнучкого коригування та аналізу виробничого процесу.

Об'єкт дослідження – процес управління, контролю та збору даних з датчиків виробничої лінії та передачі даних для подальшого аналізу та відображення.

Предмет дослідження – моделі та технології для системи контролю та збору даних на базі HTTP протоколу з використанням технологій IoT для виробничої лінії.

У кваліфікаційній роботі розроблено прототип SCADA-системи моніторингу та керування технологічним процесом на основі апаратної моделі з

використанням ESP32. На базі середовища Node-RED реалізовано приймання, оброблення та збереження телеметричних даних у базу даних, побудову графіків, таблиць, систему тривоги і функції дистанційного керування виконавчими механізмами через HTTP-інтерфейс. У роботі виконано математичне згладжування сигналів методом експоненціального згладжування, реалізовано модулі попередньої обробки, фільтрації та подання даних у вигляді часових рядів. Проведено експериментальні дослідження впливу параметрів згладжування та прогнозування температури. Також обґрунтовано можливість застосування концепції Digital Twin для створеної системи та визначено шляхи подальшого її вдосконалення.

ABSTRACT

The explanatory note: 145 p., 16 tables, 33 figures, 4 appendices, 30 sources.

SCADA, INTERNET OF THINGS, INDUSTRY 4.0, MONITORING, DATA COLLECTION AND ANALYSIS SYSTEM, EXPONENTIAL SMOOTHING, NODE-RED

The relevance of this qualification work is due to the growing demand for the implementation of modern automated control and monitoring systems for production processes based on Internet of Things technologies.

The use of SCADA systems allows you to effectively collect, process and analyze data in real time, increasing the productivity, reliability and safety of industrial facilities. The creation of such a system ensures the optimization of the functioning of the production line, the prompt detection of deviations in technological processes and the reduction of the probability of accidents, which is especially important in the context of the digital transformation of industry and the transition to the concept of "smart production".

The purpose of the qualification work is to increase the efficiency of observation, data transmission from production line sensors for flexible adjustment and analysis of the production process.

The object of the study is the process of management, control and data collection from production line sensors and data transmission for further analysis and display.

The subject of the study is models and technologies for a control and data collection system based on the HTTP protocol using IoT technologies for the production line.

In the qualification work, a prototype of a SCADA system for monitoring and controlling the technological process based on a hardware model using ESP32 was developed. Based on the Node-RED environment, the reception, processing and

storage of telemetric data in the database, the construction of graphs, tables, an alarm system and the functions of remote control of actuators via the HTTP interface were implemented. The work performed mathematical smoothing of signals using the exponential smoothing method, implemented modules for preprocessing, filtering and data presentation in the form of time series. Experimental studies of the influence of smoothing parameters and temperature forecasting were conducted. Also, the possibility of applying the Digital Twin concept for the created system was substantiated and ways of its further improvement were identified.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	11
Вступ.....	12
1 Огляд літератури та аналіз предметної області.....	14
1.1 Сучасні тенденції в автоматизації виробництв	14
1.2 SCADA-системи	18
1.3 Технологічний процес.....	25
1.4 Висновки до розділу 1	26
2 Вибір та обґрунтування технічних засобів	28
2.1 Вибір основних елементів для виробничої моделі	28
2.2 Вибір елементів для створення лабораторної моделі	33
2.3 Розробка DFD-діаграми	40
2.4 Інженерні розрахунки	42
2.5 Висновки до розділу 2	44
3 Розробка програмного забезпечення	45
3.1 Arduino IDE.....	45
3.2 Node-RED.....	48
3.3 SQLite	53
3.4 Впровадження концепції Digital Twin.....	56
3.5 Висновки до розділу 3	60
4 Експериментальні дослідження.....	62
4.1 Дослідження експоненціального згладжування.....	62
4.2 Вплив коефіцієнта згладжування на якість експоненціального згладжування.....	65
4.3 Прогнозування значень температури	67
4.4 Висновки до розділу 4	68
Висновки	70
Список використаних джерел	72
Додаток А Результати роботи у статті.....	76
Додаток Б Програмна реалізація для ESP32.....	85

Додаток В Програмна реалізація для Node-RED	90
Додаток Г Демонстраційни матеріал.....	136

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АСУ ТП – автоматизована система управління технологічними процесами;
- БД – база даних;
- CAD (англ. Computer-Aided Design) – система автоматизованого проектування;
- CPS (англ. Cyber-Physical System) – кіберфізична система;
- DFD (англ. Data Flow Diagram) – діаграма потоків даних;
- ERP (англ. Enterprise Resource Planning) – система планування ресурсів підприємства;
- EWMA (англ. Exponentially Weighted Moving Average) – метод експоненціального згладжування;
- HMI (англ. Human-Machine Interface) – людино-машинний інтерфейс;
- HTTP (англ. Hypertext Transfer Protocol) – протокол передачі гіпертекстових документів;
- IIoT (англ. Industrial Internet of Things) – Індустріальний Інтернет речей;
- IoS (англ. Internet of Services) – Інтернет послуг;
- IoT (англ. Internet of Things) – Інтернет речей;
- MES (англ. Manufacturing Execution System) – система виконання виробництва;
- MTU (англ. Master Terminal Unit) – головний термінальний пристрій;
- PLC (англ. Programmable Logic Controller) – програмований логічний контролер;
- PWM (англ. Pulse-width modulation) – широтно-імпульсна модуляція;
- RTU (англ. Remote Terminal Unit) – віддалений термінальний пристрій;
- SCADA (англ. Supervisory Control and Data Acquisition) – диспетчерське управління і збір даних.
- SQL (англ. Structured query language) – мова структурованих запитів;

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості цифровізація виробничих процесів стає ключовим чинником підвищення ефективності, надійності та конкурентоспроможності підприємств. Традиційні системи керування, засновані на локальних контролерах і автономних пристроях, поступово поступаються місцем інтегрованим рішенням, які поєднують промислову автоматизацію з інформаційними технологіями. Розроблення SCADA-систем із використанням технологій Інтернету речей (IoT) є актуальним напрямом розвитку комп'ютеризованих та робототехнічних систем.

Проблема, що розглядається у даній роботі, полягає у недостатній гнучкості та масштабованості традиційних SCADA-рішень, які часто не враховують вимоги сучасних виробничих процесів до дистанційного моніторингу, збору великих обсягів даних та їх аналітичної обробки в реальному часі. У багатьох випадках такі системи є закритими або вимагають значних фінансових витрат на впровадження та супровід, що створює бар'єр для малих і середніх підприємств. З іншого боку, впровадження IoT-технологій дозволяє створювати більш гнучкі, економічно вигідні та масштабовані рішення, засновані на відкритих протоколах зв'язку та хмарних технологіях.

SCADA-система з підтримкою IoT відкриває нові можливості для інтеграції промислових контролерів, датчиків і виконавчих механізмів у єдину інформаційну екосистему. Такий підхід дозволяє здійснювати не лише контроль та керування технологічними процесами, а й проводити аналіз даних, прогнозування станів обладнання, оптимізацію ресурсів та енергоспоживання. Це відповідає світовим тенденціям розвитку концепцій Індустрія 4.0 та розумне виробництво.

Актуальність теми також обумовлена необхідністю підвищення рівня безпеки та надійності виробничих процесів. Використання IoT-компонентів у SCADA-системах потребує вирішення питань захисту даних, контролю доступу

та забезпечення безперервності роботи системи навіть за умов відмов окремих вузлів.

У рамках даної роботи розглядається процес розроблення SCADA-системи для керування виробничою лінією складання електроніки з використанням IoT технологій. Для реалізації системи буде використано середовище Node-RED, що забезпечує можливість швидкої побудови гнучких потоків даних, інтеграцію з апаратними пристроями через MQTT, Modbus та інші протоколи, а також створення веб-інтерфейсу для моніторингу процесів у реальному часі.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення ефективності спостереження, передачі даних з датчиків виробничої лінії для гнучкого коригування та аналізу виробничого процесу.

Об'єкт дослідження – процес управління, контролю та збору даних з датчиків виробничої лінії та передачі даних для подальшого аналізу та відображення.

Предмет дослідження – моделі та технології для системи контролю та збору даних на базі HTTP протоколу з використанням технологій IoT для виробничої лінії.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- провести аналіз літератури по впровадженню та розробці SCADA систем та описати основні вимоги для розробки SCADA-системи;
- розробити лабораторний макет виробничого об'єкту;
- розробити програмну частину SCADA-системи;
- провести дослідження розробленої системи та моделей прогнозування та згладжування отримуваних даних;
- оформити звіт згідно вимогам ДСТУ 3008:2015 [1].

Результати роботи було опубліковано у статті [2] (дод. А).

Дана робота впроваджує одну з Цілей сталого розвитку, а саме Ціль 9 Інновації та інфраструктура, що передбачає розвиток стійкої інфраструктури, промисловості, інновацій і технологій. Розроблювана система впроваджує цифрові рішення у виробничому процесі [3].

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Сучасні тенденції в автоматизації виробництв

Сучасне підприємство є складною технологічною системою, яка включає взаємопов'язані між собою підсистеми, що функціонують як у горизонтальній, так і у вертикальній структурі управління. Основу його діяльності становлять виробничі процеси, що реалізуються у відповідних структурних підрозділах. Кожен виробничий підрозділ можна розглядати як технологічну систему, яка об'єднує основні та допоміжні процеси, а також апарати, що керуються автоматизованими системами управління технологічними процесами (АСУ ТП). Такі системи забезпечують роботу безперервних виробництв, автоматизованих потокових і комплексних ліній, агрегатів, верстатів, у тому числі обладнання з числовим програмним керуванням [4].

Керування технологічними процесами може здійснюватися безпосередньо оператором із використанням технічних засобів або повністю автоматизовано за допомогою програмно керованих пристроїв. Основною функцією цих засобів є збирання, зберігання, попередня обробка, передавання та відображення технологічних даних, що забезпечує ефективну взаємодію між системою керування та людиною-оператором.

Сучасне виробництво перебуває на етапі переходу до нового рівня розвитку, що зумовлено інтеграцією інформаційних технологій у промислові процеси. Якщо раніше автоматизація асоціювалася передусім із роботизацією, тобто заміною ручної праці механізмами, то сьогодні її сутність полягає у створенні комплексних інформаційно-керуючих систем, які поєднують досягнення автоматизації, ІТ, робототехніки та систем «людина - автоматизований об'єкт». Таке поєднання стало основою четвертої промислової революції, або концепції Індустрія 4.0 [5].

Концепція Індустрія 4.0 спочатку виникла як стратегічна ініціатива федерального уряду Німеччини, спрямована на розвиток високих технологій із фокусом на інформаційно-комунікаційних системах. Згодом цей термін набув ширшого значення і став узагальнюючим для позначення комплексу технологій та принципів побудови виробництва нового покоління. Основу таких виробничих систем становлять кіберфізичні системи (CPS), Інтернет речей (IoT), Інтернет послуг (IoS) та індустриальний Інтернет речей (IIoT). Виробництва, що функціонують відповідно до цієї концепції, отримали назву розумних виробництв.

Індустрія 4.0 базується на шести основних принципах [6], які забезпечують надійність, безперебійність та ефективність систем автоматизації:

- інтероперабельність;
- віртуалізація;
- децентралізація;
- робота в режимі реального часу;
- орієнтація на послуги;
- модульність.

Інтероперабельність або взаємодія характеризується здатністю кіберфізичних систем, людей і розумних виробничих об'єктів взаємодіяти між собою за допомогою Інтернету речей і Інтернету послуг.

Віртуалізація передбачає створення цифрової моделі виробництва, де дані, отримані від датчиків, поєднуються з віртуальними або симуляційними моделями підприємства.

Децентралізація описує здатність елементів кіберфізичних систем самостійно приймати рішення без постійного втручання центрального контролера.

Робота в режимі реального часу полягає у безперервному зборі, аналізі та використанні даних для оперативного реагування на зміни технологічного процесу.

Орієнтація на послуги характеризує здатність кіберфізичних систем, операторів чи виробничих підрозділів надавати свої функції як сервіси через Інтернет послуг.

Модульність описує здатність системи швидко адаптуватися до змін вимог, розширюватися або модифікуватися шляхом додавання чи заміни окремих модулів.

ISA-95 – це міжнародний набір стандартів, спрямованих на інтеграцію логістичних систем із системами управління виробництвом. Він організовує технології та бізнес-процеси в рівні, що визначаються діяльністю, що виконується, та окреслює, як підприємство може налаштувати інтерфейс для зв'язку між цими рівнями.

Структура стандартів ISA-95 широко визнана як важлива для сучасного виробництва. Вона спирається на добре відому еталонну модель Purdue для комп'ютерно-інтегрованого виробництва для опису сегментації мережі в промислових системах управління. ISA-95 встановлює архітектуру, засновану на моделі Purdue, яку підприємства можуть застосовувати незалежно від використовуваної технології. Ця модель ієрархії обладнання також може застосовуватися в дискретних, безперервних та логістичних галузях [7].

Модель ISA-95 складається з п'яти рівнів:

- фізичні виробничі процеси (рівень 0);
- відстеження та маніпулювання виробничим процесом (рівень 1);
- моніторинг та управління (рівень 2);
- управління виробничими операціями (рівень 3);
- бізнес-планування та логістика (рівень 4).

Рівень 1 описує збір даних та маніпулювання фізичними процесами, який характеризується датчиками, інтелектуальними пристроями, клапанами та іншими пристроями, які відстежують або впливають на виробництво.

Рівень 2 описує моніторинг та управління фізичними процесами у виробничому середовищі, що стосується програмованих логічних контролерів (PLC), розподілених систем управління та інших пристроїв керування.

Рівень 3 описує системи виконання виробництва (MES) та інші системи, такі як системи управління та збору даних (SCADA), які керують виробничими операціями.

Рівень 4 описує всі види діяльності, пов'язані з веденням бізнесу, що включає системи планування ресурсів підприємства (ERP).

На рисунку 1.1 наведена модель ISA-95.

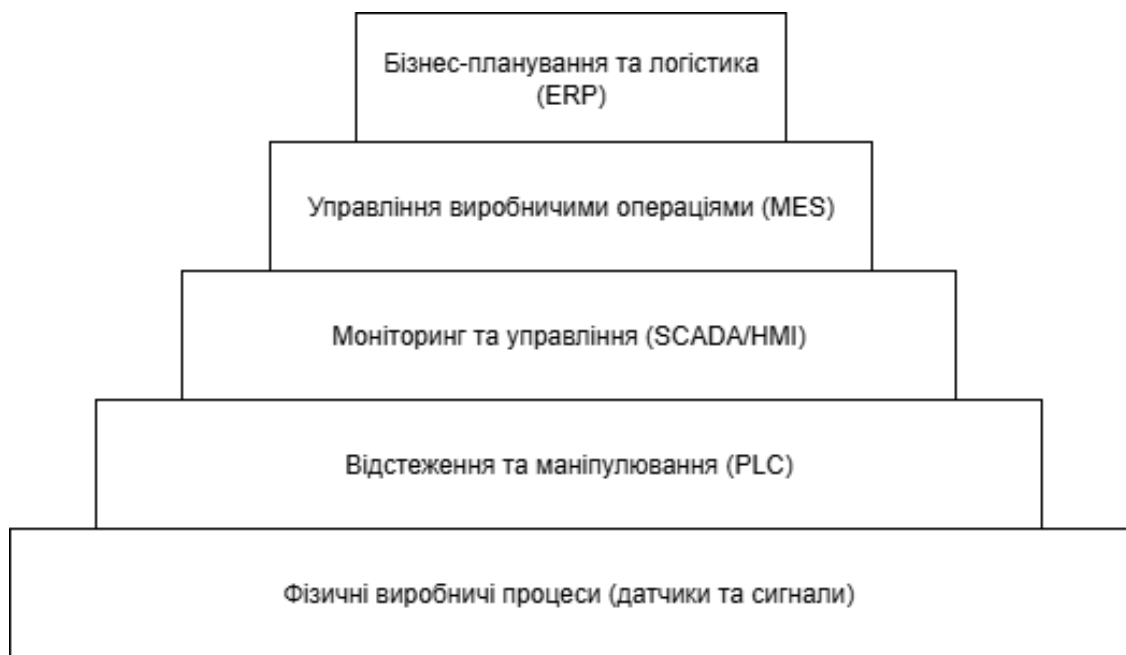


Рисунок 1.1 – Модель ISA-95

Одним із ключових напрямів розвитку є концепція «інформованого виробництва», коли дані з різних елементів технологічного процесу збираються, обробляються й аналізуються для підтримки прийняття рішень у реальному часі. В основі такого підходу лежить тісне поєднання чотирьох складових: людей, процесів, продуктів та інфраструктури. Інформовані продукти та машини оснащуються датчиками і контролерами, що дозволяють їм обмінюватися інформацією автономно, а оператори отримують доступ до актуальних даних незалежно від місця перебування [5].

Таким чином, розвиток промислових комплексів у XXI столітті визначається переходом від класичних автоматизованих систем до кіберфізичних і мережевих структур, що поєднують інформаційні технології, хмарні сервіси та

інтелектуальні алгоритми управління. Це створює підґрунтя для побудови високоефективних виробничих систем, які відповідають вимогам сучасної економіки та концепції Індустрії 4.0.

1.2 SCADA-системи

Сучасна промисловість динамічно розвивається, активно впроваджуючи інноваційні технології, що лежать в основі концепції Індустрії 4.0. Важливу роль у цій концепції відіграють SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition), які забезпечують централізований контроль, моніторинг та оптимізацію виробничих процесів. Їх інтеграція з технологіями Інтернету речей відкриває нові перспективи для підвищення рівня автоматизації, ефективності та адаптивності сучасних виробництв.

Традиційно SCADA-системи застосовувалися для збору даних і керування технологічними процесами в реальному часі. Проте завдяки розвитку IoT вони набувають розширених можливостей, через що з'являється змога підключати велику кількість сенсорів і виконавчих пристроїв, обробляти інформацію у хмарному середовищі та здійснювати аналітику з прогнозуванням стану обладнання. Такий підхід дозволяє підвищити продуктивність виробничих ліній, зменшити експлуатаційні витрати й забезпечити більш високий рівень надійності та безпеки виробничих процесів [8].

SCADA-системи являють собою розподілені комплекси, призначені для керування територіально віддаленими об'єктами, які можуть охоплювати великі географічні зони. Такі системи забезпечують централізований збір даних і координацію роботи віддалених елементів, що є критично важливим для стабільного функціонування об'єкта. SCADA широко застосовується у галузях, де необхідний постійний контроль просторово розподілених інфраструктур, зокрема у водопостачанні, системах очищення стічних вод, нафто- та газотранспортних мережах, енергосистемах і залізничному транспорті.

Центральний диспетчерський пункт SCADA виконує моніторинг і управління польовими станціями за допомогою каналів зв'язку великої дальності дії. Центр управління отримує інформацію про стан об'єктів, обробляє аварійні повідомлення та формує керуючі команди. Ці команди можуть передаватися автоматично або за рішенням оператора до віддалених контролерів. Останні безпосередньо здійснюють локальні дії: відкривають або закривають клапани й вимикачі, зчитують показники сенсорів, а також відстежують локальні умови на предмет виникнення аварійних або небезпечних ситуацій [8].

Одним із основних елементів будь-якої SCADA-системи є система збору первинних даних, що включає датчики та вимірювальні пристрої, які передають інформацію про стан об'єкта керування. Обробку цих даних забезпечують спеціалізовані багатопроцесорні обчислювальні комплекси з підвищеною надійністю, здатні працювати в умовах суворих вимог реального часу [9].

Усі сучасні SCADA-системи складаються з трьох основних структурних компонентів, а саме віддаленого терміналу, диспетчерського пункту керування та комунікаційної системи.

Віддалений термінальний пристрій (Remote Terminal Unit, RTU) виконує завдання управління в реальному часі. Його реалізація залежить від конкретного застосування, а спектр можливих варіантів дуже широкий. Використання таких пристроїв дозволяє зменшити вимоги до пропускної здатності каналів зв'язку з центральним диспетчерським пунктом.

Головний термінал (Master Terminal Unit, MTU) або диспетчерський пункт виконує обробку даних і управління на високому рівні, зазвичай у режимі м'якого реального часу. Однією з ключових функцій MTU є забезпечення інтерфейсу між системою та оператором (НМІ). Його реалізація може варіюватися від одиночного комп'ютера з додатковими модулями підключення до каналів зв'язку до великих обчислювальних систем, таких як мейнфрейми, або локальних мереж із серверів і робочих станцій. У таких системах активно використовуються технології для підвищення надійності та безпеки [9].

Комунікаційна система забезпечує передачу даних між віддаленими об'єктами чи терміналами та центральним інтерфейсом оператора. Вона також передає сигнали управління до RTU або безпосередньо до віддалених об'єктів, залежно від архітектури системи.

На рисунку 1.2 наведена спрощена структурна схема типової SCADA-системи.

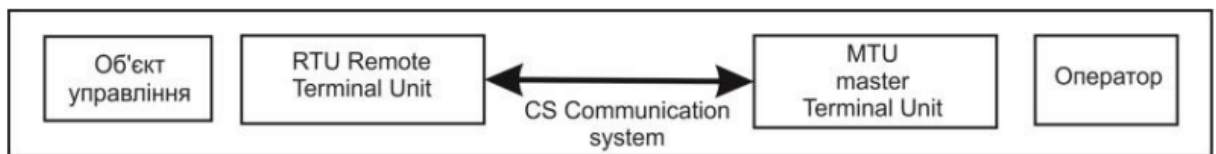


Рисунок 1.2 – Структурна схема SCADA-системи [9]

Основні елементи SCADA-систем:

- програмовані логічні контролери (PLC);
- віддалений термінальний пристрій;
- людино-машинний інтерфейс;
- сервери;
- бази даних;

Програмовані логічні контролери (PLC) виконують функції безпосереднього керування технологічними процесами, отримують дані від датчиків, обробляють їх і передають керуючі сигнали виконавчим механізмам.

Віддалений термінальний пристрій (RTU) відповідає за збір інформації з об'єктів та передавання цих даних до центрального вузла системи.

Людино-машинний інтерфейс (HMI) забезпечує оператору зручний доступ до параметрів процесу, дозволяючи здійснювати моніторинг, налаштування та контроль у режимі реального часу.

Серверна частина системи виконує обробку, зберігання та маршрутизацію даних, координуючи взаємодію між усіма компонентами SCADA.

Бази даних накопичують як поточну, так і історичну інформацію про процеси, що створює основу для подальшого аналізу, оптимізації й підвищення ефективності роботи системи.

Основними функціями SCADA-систем виділяють наступні:

- збір даних, отримання інформації від обладнання технологічного процесу та управління ним на відстані, а також ведення бази даних у реальному часі [9];
- створення зручного для оператора графічного інтерфейсу для моніторингу та керування процесами, а також представлення інформації з бази даних у зручному для аналізу вигляді;
- автоматизація робочих процесів для полегшення прийняття рішень оператором;
- виконання розрахунків ефективності виробництва, аналізу статистики процесу та продуктивності обладнання;
- виконання завдань, таких як блокування, некритичне регулювання та інші функції управління;
- генерація повідомлень і сигналів тривоги автоматично у випадку збоїв чи аномалій у системі;
- підготовка звітів, оперативних зведень, рапортів та іншої експлуатаційної документації;
- зберігання історії даних, тривог та дій оператора для подальшого аналізу;
- розмежування прав користувачів за категоріями, забезпечення безпеки та контроль дій оператора;
- забезпечення резервування критичних елементів системи, таких як сервери, мережі та клієнтські інтерфейси;
- горизонтальний обмін даними з іншими системами автоматизованого управління та передача інформації на вищі рівні управління.

Ці функції забезпечують надійність, гнучкість і ефективність роботи сучасних SCADA-систем, що робить їх незамінними для управління технологічними процесами.

SCADA-системи використовуються у великій кількості галузей, таких як аграрна промисловість, державні установи, охорона здоров'я, фінансовий сектор, хімічна промисловість, енергетичний сектор, системи транспортування, ядерна промисловість, інформаційні технології, космічна галузь та інші (рис. 1.3).

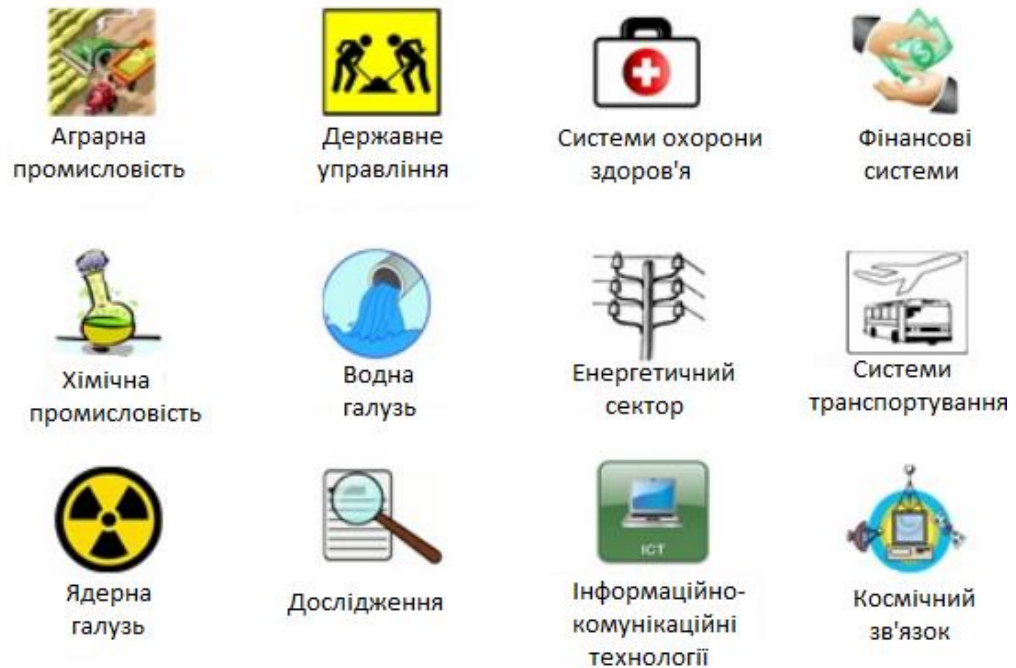


Рисунок 1.3 – Галузі використання SCADA-систем

Сучасні SCADA-системи мають відповідати низці вимог, які спрямовані на забезпечення їхньої надійності, функціональності та зручності використання. Сучасні SCADA-системи повинні відповідати ряду вимог, спрямованих на підвищення їхньої надійності, функціональності та зручності експлуатації. Основна увага розробників зосереджена на:

- забезпеченні стабільної роботи системи в умовах промислового середовища, високої стійкості до зовнішніх впливів і ефективний захист від кіберзагроз;

- наявності широкого спектру драйверів для взаємодії з програмованими логічними контролерами (PLC), віддаленими термінальними пристроями (RTU) та модулями розподіленого вводу-виводу [10];

- наявності вбудованих інструментів для обробки та візуалізації даних, широкі можливості створення графічного та керуючого інтерфейсу;
- розширенні системи за рахунок різних типів вузлів (сервери, клієнти, runtime, development, web-клієнти, тонкі клієнти, підтримка мобільних платформ iOS/Android) та гнучкої системи ліцензування [10];
- інтуїтивно зрозумілому інтерфейсі, якісній технічній документації та надійній технічній підтримці;
- регулярне оновлення системи для забезпечення сумісності з новими версіями операційних систем та актуальними нововведеннями для кібербезпеки.

Серед основних переваг впровадження SCADA-систем можна виділити:

- підвищення рівня автоматизації, мінімізація впливу людського фактору й покращує ефективність виробництва;
- можливість оперативного реагування на зміни у процесах для підвищення безпеки та стабільності роботи обладнання;
- збереження й аналіз історичних даних, які стають основою для оптимізації технологічних процесів і прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

До основних обмежень упровадження SCADA-систем у виробничих процесах можна віднести декілька чинників [11]:

- висока вартість інсталяції, налаштування та технічного обслуговування системи;
- складність інтеграції SCADA з наявними технологічним обладнанням та інформаційними системами;
- створення ризиків кіберзагроз за рахунок підключення до мережі, що вимагає впровадження додаткових заходів безпеки.

Сучасний розвиток автоматизації вимагає переходу від традиційних SCADA-рішень до кіберфізичних систем (CPS), які забезпечують глибшу інтеграцію між фізичними пристроями та цифровими алгоритмами. Такі системи розширюють можливості збору, обробки й аналізу даних, а також дозволяють здійснювати керування у режимі реального часу.

Кіберфізичні системи забезпечують взаємодію між фізичними пристроями (датчиками, виконавчими механізмами) та комп'ютерними алгоритмами, які працюють у зворотному зв'язку.

Роль SCADA у CPS полягає у інтеграції великої кількості даних з польових пристроїв, наданні їх в уніфікованому вигляді для аналізу, дозволі автоматизувати прийняття рішень та адаптуванні виробництва в режимі реального часу.

Попри зростання рівня автоматизації, людина залишається ключовою ланкою системи, так як саме оператор або інженер приймає стратегічні рішення, пов'язані з плануванням, оптимізацією та управлінням виробництвом. Використання автоматизованих систем не усуває людський фактор, однак розширює можливості фахівця, дозволяючи йому ефективніше контролювати складні технологічні процеси та підвищувати загальну продуктивність виробництва.

Архітектура SCADA у контексті Індустрії 4.0 описана по рівням [12]:

- польовий рівень (збір та передача інформації х пристроїв);
- контролери (прийом даних, локальне управління, передача на SCADA);
- SCADA (збір та аналіз даних, автоматизація процесів, попередження про аварійні ситуації);
- бізнес-рівень (система управління ресурсами виробництва ERP).

На рисунку 1.4 наведено структуру збору даних і оперативного диспетчерського управління SCADA-системи.



Рисунок 1.4 – Структуру збору даних і оперативного диспетчерського управління SCADA-системи

Клієнтські компоненти системи взаємодіють із обладнанням нижнього рівня за допомогою комунікаційного сервера, який може бути представлений як стандартний OPC-драйвер або розроблений індивідуально драйвер, адаптований до роботи з промисловими автоматизованими системами на рівні протоколів обміну інформацією [13].

1.3 Технологічний процес

У якості виробничого середовища для дослідження було обрано конвеєрну лінію складання електронних модулів та обрано технологічний процес «Автоматизоване встановлення та тестування датчика температури на електронний модуль».

Технологічний процес включає в себе 5 етапів, які описані нижче та наведені схематично на рисунку 1.5:

- подача плати на конвеєр;
- точне позиціонування плати;
- роботизоване встановлення датчика;

- перевірка зміни температури на встановленому датчику;
- прийняття рішення SCADA-системою.

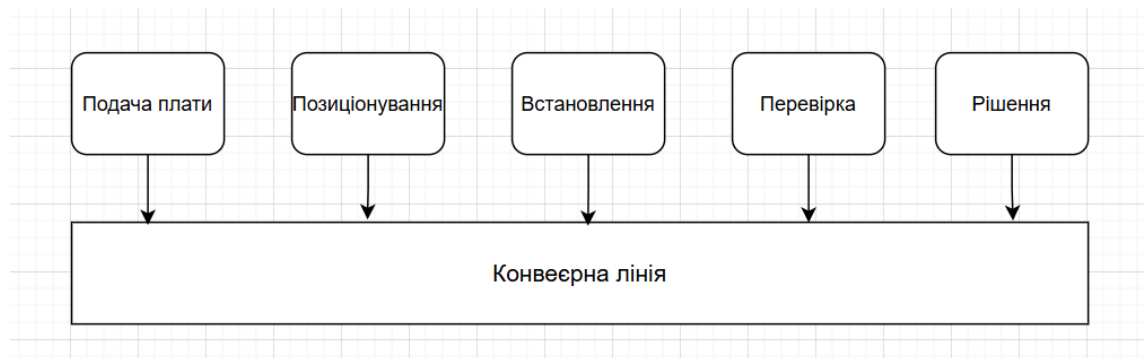


Рисунок 1.5 – Схематичне представлення технологічного процесу

Це типовий етап виробництва електронних модулів, який передбачає точне позиціонування плати, роботизоване встановлення компонента та подальшу перевірку його працездатності. У промислових умовах дана операція виконується роботом-маніпулятором 4-6 ступенів свободи у зв'язці з фотоелектричними датчиками, енкодерами конвеєра та тестовою станцією.

1.4 Висновки до розділу 1

Перший розділ розкриває сучасні тенденції в автоматизації виробництв, ключову роль SCADA-систем у цьому процесі та визначає конкретний технологічний процес для дослідження.

Сучасне підприємство є технологічною системою, що функціонує в концепції Індустрія 4.0, яка ґрунтується на поєднанні досягнень автоматизації, ІТ, робототехніки та взаємодії людини та автоматизованого виробничого процесу. Основу виробничих систем нового покоління становлять кіберфізичні системи, Інтернет рече, Інтернет послуг.

SCADA-системи відіграють важливу роль у реалізації концепції Індустрії 4.0, забезпечуючи централізований контроль, моніторинг та оптимізацію виробничих процесів, особливо для територіально віддалених об'єктів. Сучасні

SCADA-системи інтегруються з IoT, що дозволяє підключати велику кількість сенсорів, обробляти інформацію у хмарному середовищі та здійснювати аналітику з прогнозуванням.

Для практичного дослідження обрано технологічний процес «Автоматизоване встановлення та тестування датчика температури на електронний модуль» на конвеєрній лінії. Цей процес включає точне позиціонування плати, роботизоване встановлення компонента, перевірку його працездатності та прийняття рішення SCADA-системою.

Таким чином, сучасний розвиток промислових комплексів спрямований на побудову високоефективних кіберфізичних і мережевих структур, де SCADA-системи виступають основним інструментом централізованого управління, а міжнародні стандарти, такі як ISA-95, забезпечують структурну інтеграцію між рівнями бізнесу та технологічного процесу

2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

2.1 Вибір основних елементів для виробничої моделі

Проектована система призначена для автоматизації технологічного процесу встановлення та первинного тестування температурних датчиків на конвеєрній лінії складання електронних модулів. Для забезпечення надійності, високої точності та відповідності промисловим стандартам було здійснено обґрунтований вибір технічних елементів, що формують основу виробничої моделі. До складу системи входять засоби вимірювання, виконавчі механізми, модулі позиціонування, датчики контролю проходження, а також обладнання тестового стенда.

Основним виконавчим елементом є робот-маніпулятор 4-6 ступенів свободи Fanuc LR Mate 200ID (рис. 2.1), який забезпечує точне позиціонування та встановлення температурного датчика на друковану плату. Такі маніпулятори мають високу повторюваність ($\pm 0,02$ мм) та інтегровані інтерфейси промислових протоколів, що дозволяє ефективно координувати їх роботу із засобами контролю конвеєра та SCADA-системою. Основні технічні характеристики Fanuc LR Mate 200ID наведені в таблиці 2.1 [14].



Рисунок 2.1 – Fanuc LR Mate 200ID

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики Fanuc LR Mate 200ID

Характеристика	Значення, опис
Максимальне навантаження	7 кг
Досяжність	717 мм
Керовані осі	6 ступенів свободи
Повторюваність (точність)	$\pm 0,01$ мм
Вага	25 кг
Діапазон руху осей	від 250° до 720°
Швидкість осей	від 380 °/с до 1000 °/с
Потужність	0,5 кВт

Подача і позиціонування плати на конвеєрі здійснюється за допомогою енкодера Omron E6B2-CWZ6C 1024P/R (рис. 2.2) високої роздільної здатності 1024, який забезпечує точний контроль швидкості та положення рухомої стрічки.



Рисунок 2.2 – Omron E6B2-CWZ6C 1024P/R

Основні характеристики енкодера наведені у таблиці 2.2 [15].

Таблиця 2.2 – Основні технічні характеристики енкодера Omron E6B2-CWZ6C 1024P/R

Характеристика	Значення, опис
Напруга живлення	від 5 В до 24 В
Максимальний струм	80 мА
Роздільна здатність	1024P/R
Максимальні оберти	6000 об/хв
Керуючий вихід	NPN
Кількість фаз	A, B, Z
Діаметр корпусу	40 мм
Діаметр валу	6 мм

Для фіксації появи та правильного розташування плати застосовується фотоелектричний датчик Omron E3F-DS30P1 (рис. 2.3), що мають високу надійність роботи в умовах виробничого середовища. Безконтактний герметичний інфрачервоний датчик, що застосовується у верстатах із ЧПК та автоматизованих системах для визначення положення об'єктів. Вбудований SMT-чіп забезпечує надійну та стабільну роботу пристрою. Модель є чутливою до пилу, проте вібрація на її функціонування не впливає. Датчик E3F-DS30P1 також має світлодіодний індикатор [16].



Рисунок 2.3 – Omron E3F-DS30P1

Основні характеристики фотоелектричного датчика наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики фотоелектричного датчика Omron E3F-DS30P1

Характеристика	Значення, опис
Напруга живлення	від 6 В до 36 В
Максимальний струм	300 мА
Відстань виявлення	від 10 см до 30 см
Час відгуку	1 мс
Керуючий вихід	PNP NO
Частота відгуку	300 Гц
Діапазон робочих температур	від -25 °С до 65 °С

Для контролю параметрів технологічного процесу та виконання функціонального тесту встановленого елемента застосовується терморезистор типу Pt100 (рис. 2.4). Такий вибір зумовлений високою точністю, стабільністю та відповідністю міжнародним стандартам IEC 60751 [17].



Рисунок 2.4 – WZP Pt100

Основні характеристики терморезистора наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні технічні характеристики терморезистора WZP Pt100

Характеристика	Значення, опис
Діапазон робочих температур	від -50 °С до 205 °С
Габарити	4 мм x 30 мм
Матеріал чутливого елемента	Платина (Pt)
Точність вимірювань	±0,5 °С

У сукупності обрані технічні елементи дозволяють сформувати повноцінну виробничу модель високоточного технологічного процесу, яка відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації, забезпечує точність позиціонування, стабільність вимірювань та можливість централізованого керування в SCADA-системі.

У якості керуючого елемента системи було обрано Siemens SIMATIC S7-1200 (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Siemens SIMATIC S7-1200

S7-1200 має конфігуровані цифрові входи/виходи, аналогові входи, що дає можливість підключити як дискретні датчики (фотоелектрики, енкодерні

імпульси), так і аналогові сенсори. S7-1200 підтримує промислові протоколи обміну даними, зокрема Profinet і Modbus TCP, що забезпечує надійний комунікаційний зв'язок між PLC, приводами, роботом та верхнім рівнем: SCADA/ІоТ-шлюзом. Це дає змогу передавати телеметрію, керувати обладнанням, реалізовувати логіку управління та сповіщення, а також інтегрувати систему в єдину автоматизаційну інфраструктуру [18].

Основні характеристики Siemens SIMATIC S7-1200 наведені у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Основні технічні характеристики Siemens SIMATIC S7-1200

Характеристика		Значення, опис
Діапазон робочих температур		від -20 °С до 60 °С
Напруга живлення		24 В
Номінальний струм		500 мА
Вбудована пам'ять (ОЗП)		125 кБайт
Час обробки ЦП	побітові операції	0,08 мкс
	операції з string	1,7 мкс
	операції з float	2,3 мкс
Кількість входів		14 шт

2.2 Вибір елементів для створення лабораторної моделі

У якості основного модулю керування було обрано плату ESP-WROOM-32, яка наведена на рисунку 2.6. ESP32-WROOM-32 – це потужний універсальний модуль мікроконтролера Wi-Fi+BT+BLE, призначений для широкого спектру застосувань.



Рисунок 2.6 – ESP-WROOM-32

Вбудована мікросхема ESP32-D0WDQ6 розроблена з урахуванням масштабованості та адаптивності. Є два ядра процесора, які можна керувати окремо, а тактова частота регулюється від 80 МГц до 240 МГц. Користувач також може вимкнути процесор і використовувати малопотужний співпроцесор для постійного моніторингу периферійних пристроїв на предмет змін або перетину порогових значень. ESP32 інтегрує багатий набір периферійних пристроїв, починаючи від ємнісних сенсорних датчиків, датчиків Холла, інтерфейсу SD-карти, Ethernet, високошвидкісного SPI, UART, I2S та I2C [19].

Основні характеристики плати наведені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Характеристики плати ESP-WROOM-32

Характеристика	Значення, опис
Модульні інтерфейси	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR
Напруга живлення	5 В
Напруга живлення мікромодуля	від 2,2 В до 3,6 В
Діапазон частоти	від 2,4 ГГц до 2,5 ГГц
Робочий струм	середній: 80 мА
Діапазон робочих температур	від -40 °С до 85 °С

Продовження таблиці 2.6

Характеристика	Значення, опис
Wi-Fi	підтримка протоколу 802.11n до 150 Мбіт/с у режимах: клієнт, точка доступу, Sniffer, Wi-Fi Direct
Bluetooth	підтримка протоколів Bluetooth v4.2 BR/EDR та BLE specification
Датчики на борту	Датчик Холла, датчик температури

У якості імітації робота маніпулятора в роботі використовується серводвигун SG90, що наведений на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Серводвигун SG90

Усередині корпусу серводвигуна розміщено компактний модуль керування, який за вхідним сигналом подає на електродвигун живлення певної полярності. Вхідний сигнал визначає необхідний кут повороту валу. Для контролю поточного положення використовується змінний резистор (потенціометр), механічно з'єднаний через редуктор із валом двигуна. Електронна схема серводвигуна порівнює задане положення з фактичним і, залежно від різниці між ними, формує сигнал живлення відповідної полярності. Це забезпечує автоматичне обертання валу до моменту, коли реальне положення збігається із заданим.

Кут повороту серводвигуна визначається широтно-імпульсним сигналом (PWM), у якому інформація про положення валу закодована у тривалості імпульсу. Частота такого сигналу залишається сталою, приблизно 50 Гц, тобто період становить близько 20 мс. Тривалість імпульсу зазвичай змінюється від 1 до 2 мс, що відповідає повороту валу приблизно від 0° до 180°. Для генерації керуючого сигналу найзручніше використовувати мікроконтролер із підтримкою PWM, який дозволяє точно формувати імпульси потрібної тривалості та забезпечувати стабільне керування серводвигуном [20].

В таблиці 2.7 наведені основні характеристики серводвигуна SG90.

Таблиця 2.7 – Характеристики серводвигуна SG90

Характеристика	Значення, опис
Напруга живлення	від 3,5 В до 5 В
Швидкість без навантаження	(0,12 с)/(60°) при 4,8 В
Крутний момент	2 кг/см
Кут повороту	від 120° до 180° (в залежності від виробника)
Робочий струм	під час руху: від 50 мА до 80 мА, у стані очікування: від 5 мА до 10 мА
Діапазон робочих температур	від 0 °С до 50 °С

Наступним модулем є блок сенсорів збору даних, який включає в себе датчик температури та вологості DHT11 та ультразвуковий датчик відстані HC-SR04.

Датчик температури та вологості DHT11 (рис. 2.8) оснащений комплексом датчиків температури та вологості з каліброваним цифровим вихідним сигналом. Завдяки використанню ексклюзивної технології збору цифрового сигналу та технології вимірювання температури й вологості, він забезпечує високу надійність та довготривалу стабільність. Цей датчик містить резистивний компонент вимірювання вологості та компонент вимірювання температури, а

також підключається до високопродуктивного 8-бітного мікроконтролера, що забезпечує відмінну якість, швидку реакцію, захист від перешкод та економічну ефективність [21]. Основні характеристики датчику наведені у таблиці 2.8.

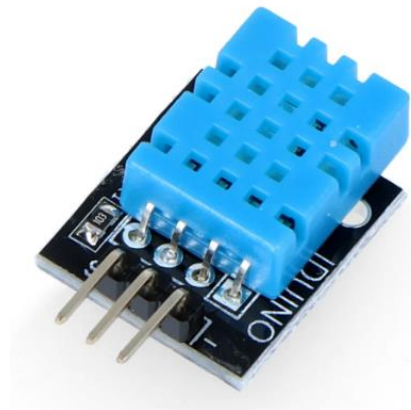


Рисунок 2.8 – Датчик температури та вологості DHT11

Таблиця 2.8 – Характеристики датчика DHT11

Характеристика	Значення, опис
Напруга живлення	від 3,5 В до 5 В
Робочий струм	від 0,5 мА до 2,5 мА
Діапазон робочих температур	від 0 °С до 50 °С
Похибка показань температури	±2 °С
Діапазон вологості	від 20 % до 90 %
Похибка показань вологості	±5 %

Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 працює за принципом ультразвукової ехолокації. Відстань визначається за часом, що пройшов між відправкою сигналу та отриманням відлуння. На рисунку 2.9 наведено зовнішній вигляд ультразвукового датчика HC-SR04. У таблиці 2.9 наведено основні характеристики датчика [22].



Рисунок 2.9 – Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04

Таблиця 2.9 – Характеристики датчика HC-SR04

Характеристика	Значення, опис
Напруга живлення	від 3,8 В до 5,5 В
Робочий струм	8 мА
Частота	40 кГц
Максимальна дистанція вимірювання	1500 мм
Роздільна здатність	3 мм
Кут спостереження	15 °
Ширина імпульсів	10 мкс

Схема підключення елементів наведено на рисунку 2.10.

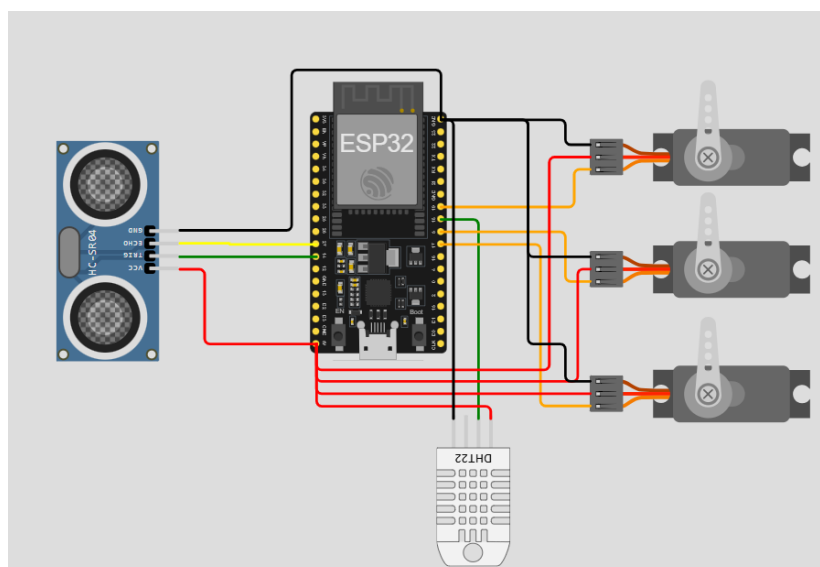


Рисунок 2.10 – Схема підключення

Головним елементом схеми являється плата ESP-WROOM-32, до якої під'єднані інші елементи у вигляді датчиків та виконавчих пристроїв. Дана схема імітує систему збору даних з виробничої лінії будь-якого напрямлення. Головним в даній схемі являється показати збір та передачу даних до основної керуючої системи на базі Node-RED, яка буде приймати, проводити аналіз отриманих даних та видавати відповідну інформацію як у вигляді графіків, так і у вигляді керуючих сигналів на виконавчі пристрої.

У таблиці 2.10 наведено піни підключення елементів до основного модуля системи ESP-WROOM-32.

Таблиця 2.10 – Піни підключення елементів до ESP-WROOM-32

ESP32	HC-SR04	DHT11	SG90	SG90	SG90
5V	VIN	VIN	VIN	VIN	VIN
GND	GND	GND	GND	GND	GND
SP(G36)	–	–	–	–	–
SN(G39)	–	–	–	–	–
G34	–	–	–	–	–
G32	–	–	–	–	–
G33	–	–	–	–	–
G25	–	–	–	–	–
G26	–	–	–	–	–
G27	ECHO	–	–	–	–
G14	TRIG	–	–	–	–
G12	–	–	–	–	–
G13	–	–	–	–	–
3V3	–	–	–	–	–
G23	–	–	–	–	–
G22	–	–	–	–	–
G21	–	–	–	–	–
G19	–	–	–	PWM	–

Продовження таблиці 2.10

ESP32	HC-SR04	DHT11	SG90	SG90	SG90
G18	–	SIGNAL	–	–	–
G5	–	–	–	–	PWM
G17	–	–	PWM	–	–
G16	–	–	–	–	–
G4	–	–	–	–	–
G2	–	–	–	–	–
G15	–	–	–	–	–

2.3 Розробка DFD-діаграми

Діаграма потоку даних (DFD) використовується для наочного відображення руху даних у межах процесу або інформаційної системи. Вона демонструє, які дані надходять до кожної сутності, які виходять з неї, а також як ці потоки пов'язані з окремими процесами. На відміну від блок-схем, DFD не показує логіку керування, правила прийняття рішень чи циклічні операції. [23].

Нотація DFD спирається на концепції теорії графів, яку спочатку застосовували в операційних дослідженнях для опису робочих процесів у підприємствах, а згодом в інформатиці для відображення руху вхідних і вихідних даних під час обчислень. Цей підхід сформувався в межах структурного аналізу та проектування приблизно у середині 1970-х років. Автором першої концепції вважається Ларрі Константін, а подальшого поширення та розвитку метод отримав завдяки Едварду Йордону, Тому ДеМарко, Крісу Гейну та Тріш Сарсону, які розширили його різними нотаціями, впровадили практики ведення словника даних та запропонували принципи ієрархічної декомпозиції процесів [24].

На рисунку 2.11 наведено DFD-діаграму рівня 0 для розроблюваної SCADA-системи.

У діаграмі потоку даних наведено дві сутності оператор НМІ та виробничий об'єкт, які представляють собою роботу оператора зі SCADA-

системою та лабораторний макет відповідно, 4 функції, одне сховище даних та потоки даних.

У таблиці 2.11 наведені опис усіх компонентів DFD-діаграми.

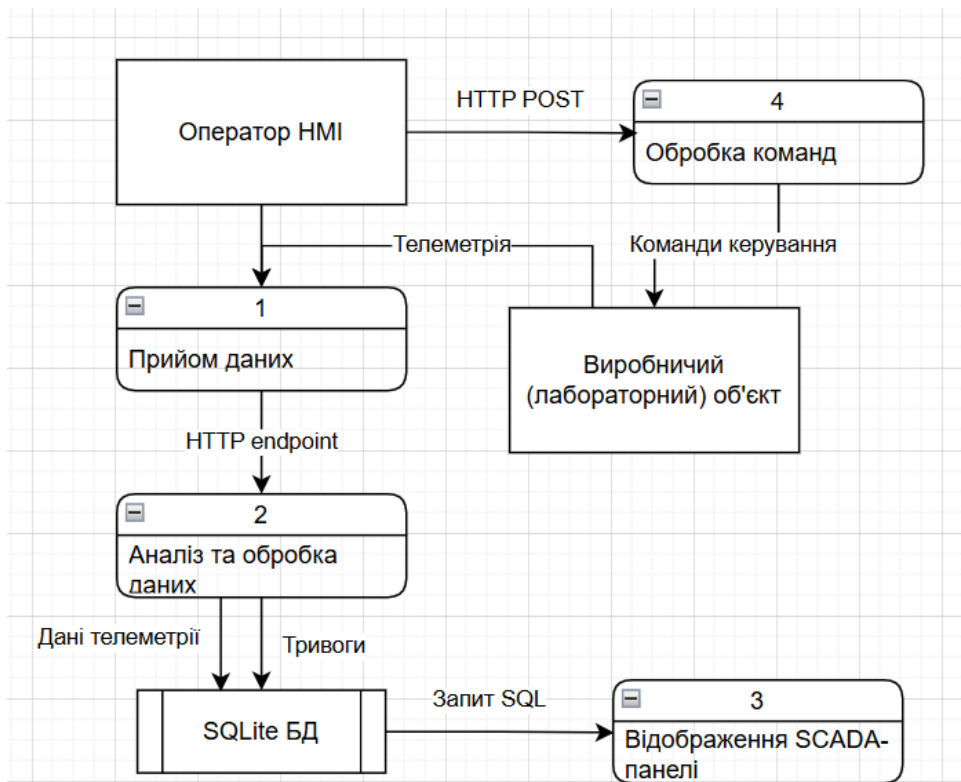


Рисунок 2.11 – DFD-діаграма

Таблиця 2.11 – Опис елементів DFD-діаграми

Елемент	Опис
Сутність «Оператор НМІ»	Дії оператора зі SCADA-системою
Сутність «Виробничий об'єкт»	Лабораторний макет
Функція 1 «Прийом даних»	Прийом пакету даних JSON з ESP32 через HTTP endpoint.
Функція 2 «Аналіз та обробка даних»	Приведення та парсинг отриманих даних JSON до потрібних типів, перевірка умов спрацювання та генерація тривоги

Продовження таблиці 2.11

Елемент	Опис
Функція 3 «Відображення SCADA-панелі»	Формування інтерфейсу індикаторів, графіків, історії тривог
Функція 4 «Обробка команд»	Отримання команд керування та передача до ESP32
Сховище «SQLite БД»	Збереження даних телеметрії та тривог у БД

2.4 Інженерні розрахунки

Розрахуємо роздільну здатність позиціонування енкодера. Припустимо діаметр привідного ролика конвеєра $D = 50$ мм.

Окружність $C = \pi \cdot D \approx 3,1416 \cdot 50$ мм = 157,08 мм.

Імпульси на мм розраховуються за (2.1):

$$p = \frac{1024}{C} = \frac{1024}{157,08} = 6,52 \text{ імпл/мм.} \quad (2.1)$$

Мінімальна крокова довжина для 1 імпульсу розраховується за (2.2):

$$\Delta x_{min} = \frac{1}{p} = \frac{1}{6,52} = 0,153 \text{ мм.} \quad (2.2)$$

Отже, позиціонування плати кероване енкодером має грубу роздільну здатність 0,15 мм, що достатньо для позиціонування ± 2 мм з запасом.

Розрахуємо продуктивність виробничої лінії для базового режиму роботи.

Цикловий час одного виробу розраховується за (2.3):

$$T_{cycle} = \frac{3600 \text{ с}}{N}. \quad (2.3)$$

Цикловий час T_{cycle} – це час між появою сусідніх плат у роботі робота. Він повинен враховувати:

- час розташування елементів ($T_{\text{robot}} = 2,5$ с);
- час тестування ($T_{\text{test}} = 2$ с);
- час прийняття рішення ($T_{\text{solution}} = 1$ с).

Враховуючи усі параметри реальний часу циклу $T_{\text{cycle}} = 5,5$ с, що дає розрахувати максимальну продуктивність за (2.3):

$$N_{\text{max}} = \frac{3600 \text{ с}}{T_{\text{cycle}}} = \frac{3600}{5,5} = 655 \text{ шт/год.}$$

Однак із врахуванням запасу часу та збурюючих факторів затримки етапів циклу бажану продуктивність варто оцінювати у 600 шт/год.

Важливим етапом є тестування встановленого датчика температури. Маса ділянки, що нагрівається $m = 0,005$ кг та середня питома теплоємність $c = 900$ Дж/кг·°С.

Значення використаної енергії для нагрівання робочої зони навколо датчику на $\Delta T = 5$ °С розраховується за (2.4):

$$Q = mc\Delta T = 0,005 \cdot 900 \cdot 5 = 22,5 \text{ Дж.} \quad (2.4)$$

Нагрівання для перевірки чутливості елементи триває 2 с, тому необхідна потужність розраховується за (2.5):

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{22,5}{2} = 11,25 \text{ Вт.} \quad (2.5)$$

Виходячи з розрахунків, рекомендуємо використовувати нагрівач потужністю 20 Вт з керуванням через пропорційний вихід, щоб врахувати теплові втрати і час на досягнення температури.

2.5 Висновки до розділу 2

Другий розділ присвячений вибору, обґрунтуванню та розрахунку технічних засобів, необхідних для створення як повноцінної виробничої моделі автоматизованого процесу встановлення датчика температури, так і її лабораторної імітації.

Для автоматизації процесу встановлення та тестування температурних датчиків було обрано високоточні промислові компоненти. Центральним виконавчим елементом є робот-маніпулятор Fanuc LR Mate 200ID, який має 6 ступенів свободи та високу точність повторюваності, що критично важливо для точного позиціонування на друкованій платі. У якості керуючого елементу системи обрано Siemens SIMATIC S7-1200, який підтримує конфігуровані цифрові та аналогові входи/виходи, а також промислові протоколи, такі як Profinet і Modbus TCP, забезпечуючи надійний зв'язок між роботом, приводами та верхнім рівнем SCADA/ІоТ-шлюзом.

Для імітації системи збору та передачі даних для SCADA-системи на базі Node-RED, було використано мікроконтролерну плату ESP-WROOM-32. Ця плата є універсальним модулем Wi-Fi+BT+BLE з двома процесорними ядрами та багатим набором периферійних пристроїв, що забезпечує масштабованість та адаптивність.

Розроблена DFD-діаграма візуалізує потік даних у SCADA-системі, визначаючи дві сутності, а саме оператор НМІ та виробничий об'єкт. Діаграма включає чотири основні функції, такі як прийом даних (JSON пакетів з ESP32), аналіз та обробка даних з генерацією тривоги, відображення SCADA-панелі та обробка команд. Історія даних та тривоги зберігається у сховищі SQLite.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Arduino IDE

Програмне забезпечення, розроблене для мікроконтролера ESP-WROOM-32 (додаток Б), виконує наступні функціональні задачі:

- збір аналогово-цифрової інформації з датчиків первинної інформації;
- формування уніфікованих телеметричних пакетів у JSON-форматі;
- передавання даних у диспетчерську систему через HTTP;
- отримання й обробка керувальних впливів від верхнього рівня;
- керування трьома сервоприводами в реальному часі.

Архітектурно вся система реалізує принцип Cyber-Physical Node, де ESP32 відіграє роль польового контролера, SCADA – сервера обробки та візуалізації, а датчики та виконавчі механізми формують фізичний рівень виробничого процесу.

У програмі взаємодіють такі компоненти:

- цифровий датчик температури та вологості DHT11, підключений до GPIO18;
- ультразвуковий датчик HC-SR04 (TRIG – GPIO14, ECHO – GPIO27);
- три серводвигуни SG90, підключені до пінів 17, 5 та 19;
- модуль Wi-Fi ESP32, що забезпечує бездротове з'єднання із SCADA-сервером Node-RED;
- вбудований HTTP-сервер ESP32, який приймає команди для керування сервоприводами.

Ці компоненти імітують фрагмент технологічного процесу виробничої лінії, а саме вимірювання параметрів середовища, визначення положення об'єкта та виконання керувальних дій.

Код використовує такі програмні модулі та бібліотеки:

- WiFi.h (керування Wi-Fi);

- HTTPClient.h (відправлення HTTP POST запитів на Node-RED);
- WebServer.h (створення локального HTTP-серверу для прийому команд);
- DHT.h (взаємодія з датчиком температури та вологості);
- ESP32Servo.h (керування серводвигунами);
- ArduinoJson.h (формування та розбір JSON-повідомлень).

Це забезпечує як вимірювання параметрів, так і створення REST API-інтерфейсу.

Функція `connectWiFi()` застосовує драйвер Wi-Fi-модуля ESP32 для ініціалізації мережевої частини. Процес підключення включає такі технічні етапи, як ініціалізація стеку TCP/IP та запуск внутрішнього DHCP-клієнта, аутентифікація в мережі WPA2-PSK за заданими обліковими даними (SSID і пароль), перехід у стан `WL_CONNECTED`, що означає отримання IP-адреси через DHCP та реєстрація ESP32 як мережевого вузла, здатного встановлювати HTTP-з'єднання.

Після підключення IP-адреса передається в консоль для діагностування та прив'язки SCADA-вузла до мережі. Технічно ESP32 виступає як клієнт локальної мережі, що дозволяє SCADA-системі комунікувати з ним.

Телеметрія з датчиків отримується у функціях `getDistanceCM()`, `dht.readTemperature()` та `dht.readHumidity()`. Функції `dht.readTemperature()` та `dht.readHumidity()` повертають поточні значення температури та вологості з датчика DHT11. Функція `getDistanceCM()` генерує 10 мкс імпульс на піні TRIG, вимірює тривалість відбитого сигналу та перетворює тривалість у відстань, враховуючи швидкість звуку 0,034 см/мкс за (3.1):

$$D = \frac{t \cdot 0,034}{2}. \quad (3.1)$$

Бібліотека ESP32Servo генерує PWM-сигнал 50 Гц з шириною імпульсу від 500 мкс до 2400 мкс відповідно до кута:

$$\theta \in [0..180^\circ]$$

У коді передбачена санітаризація вхідних команд `constrain()`, що унеможливорює механічний вихід за межі.

Функції `sendTelemetry()` зчитує значення температури, вологості, відстані, поточних кутів серводвигунів та надсилає телеметрію кожні 5 секунд, що задається параметром `INTERVAL`. Отримані значення з датчиків формуються у JSON-об'єкт типу:

```
{ "temp": ...,  
  "hum": ...,  
  "servo1": ...,  
  "servo2": ...,  
  "servo3": ...,  
  "distance_cm": ...,  
  "uptime_s": ... }
```

Сформований JSON-об'єкт відправляється HTTP POST-методом на `http://192.168.0.102:1880/telemetry`. Це робить ESP32 телеметричним вузлом SCADA-системи.

ESP32 запускає HTTP-сервер на порту 80 командою `server.on("/command", HTTP_POST, handleCommand)`.

Функція `handleCommand()` виконає наступні задачі:

- приймає JSON від Node-RED;
- розбирає його через `deserializeJson()`;
- оновлює значення ключів `"servo1"`, `"servo2"`, `"servo3"` положення серводвигунів;
- відповідає SCADA-серверу JSON-об'єктом.

У `loop()` реалізовано два паралельні процеси.

Процес обробки HTTP-запитів реалізується через функцію `server.handleClient()`, що аналізує вхідні TCP-з'єднання та обробляє їх у неблокуючому режимі.

Процес дискретної передачі телеметрії реалізується Через порівняння `millis()` із змінною `lastSend = 5000` мс. Це забезпечує циклічність з періодом, що характерно для систем реального часу.

Розроблений код реалізує повноцінну модель інтелектуального IoT-вузла, який:

- виконує вимірювання параметрів навколишнього середовища та технологічного об'єкта;
- обробляє та фільтрує дані на рівні мікроконтролера;
- передає інформацію у SCADA-систему;
- отримує команди керування від диспетчерського рівня;
- керує виконавчими механізмами у режимі реального часу.

3.2 Node-RED

Для реалізації SCADA-рівня автоматизованої системи керування була створена програмна модель у середовищі Node-RED (додаток В).

Node-RED – це інструмент розробки візуального програмування з низьким кодом, що базується на потоках, спочатку розроблений IBM для об'єднання апаратних пристроїв, API та онлайн-сервісів як частини Інтернету речей. Node-RED надає веб-редактор потоків на основі браузера, який можна використовувати для створення функцій JavaScript. Елементи програм можна зберігати або ділитися для повторного використання. Середовище виконання побудовано на Node.js. Потоки, створені в Node-RED, зберігаються за допомогою JSON [25].

Потік Node-RED описує з'єднання та послідовність різних вхідних, вихідних та обробних вузлів на платформі Node-RED. Кожен вузол у потоці виконує унікальне та специфічне завдання. Коли дані передаються до вузла, вузол обробляє їх відповідно до призначеної функції, перш ніж передати їх наступному вузлу в потоці. Ця система дозволяє контрольоване виконання та регулювання широкого спектру операцій. Потоки Node-RED представляють собою основний механізм візуального програмування інструменту [25].

Розроблюване програмне забезпечення виконує функції диспетчеризації, збору телеметрії, інтерактивного керування виконавчими механізмами та зберігання даних у локальній базі SQLite. Створена система забезпечує повний цикл обміну даними з мікроконтролером ESP32 через протокол HTTP, включає серверну логіку, модулі аналітики та візуальний інтерфейс оператора.

У системі реалізовано кінцевий ключ HTTP /telemetry, який виступає джерелом фактичних виробничих даних. Мікроконтролер ESP32 надсилає телеметрію у форматі JSON кожні 5 секунд, включаючи температуру, вологість, поточні кути сервоприводів та показник відстані, виміряний ультразвуковим датчиком.

Після отримання даних у Node-RED застосовується вузол JSON, який декодує їх у структуру `msg.payload`. Подальша обробка виконується у функціональному блоці, де здійснюється нормалізація значень, підготовка структури для запису в базу даних та виклик логіки тривоги. Використання однієї точки прийому даних гарантує централізацію логіки обробки та синхронізацію часових міток.

Для архівації технологічних параметрів використовується база даних SQLite, що розташована локально на робочій станції. Кожен запис містить точну часову мітку у мілісекундах, що дозволяє здійснювати подальший аналіз, побудову трендів та ретроспективну діагностику. Застосування SQLite є оптимальним для локальних SCADA-моделей, оскільки база не потребує окремого сервера й може масштабуватися за обсягом даних.

На рисунку 3.1 наведено з'єднання вузлів у Node-RED для прийому та збереження даних у базу даних.

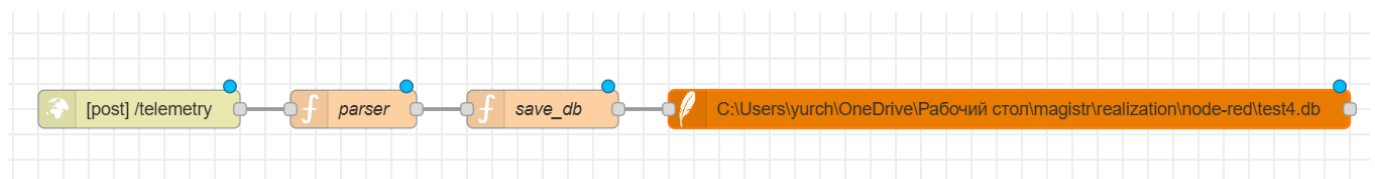


Рисунок 3.1 – Вузли для прийому та збереження даних

Node-RED виконує функції керування, передаючи команди на ESP32 через HTTP-запити (рис. 3.2). Оператор на панелі керування може змінювати кут повороту кожного сервопривода за допомогою слайдерів. Після зміни значення формується JSON-команда, наприклад `{"servo1": 120}`.

Команда надсилається на ендпоінт ESP32 `/command`. Мікроконтролер парсить отриманий JSON та змінює положення сервопривода. У Node-RED відображається відповідь, що дає можливість контролювати виконання команди та фіксувати можливі помилки. Таким чином реалізовано повноцінний замкнений контур керування з передачею команд та зворотним зв'язком.

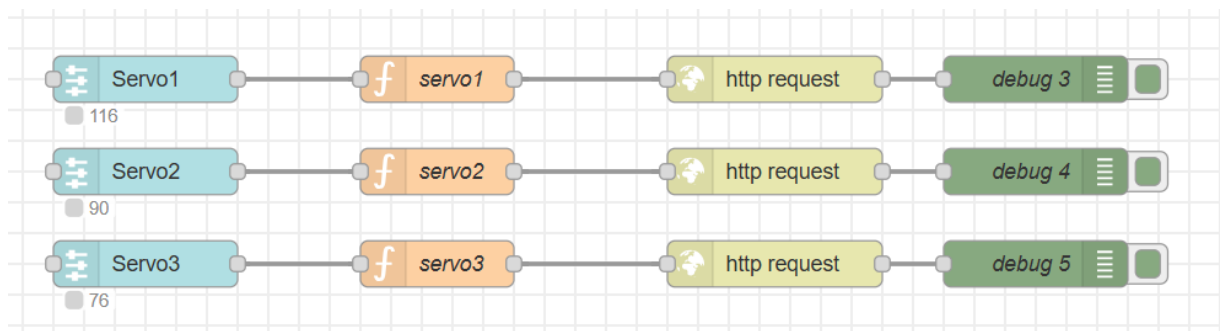
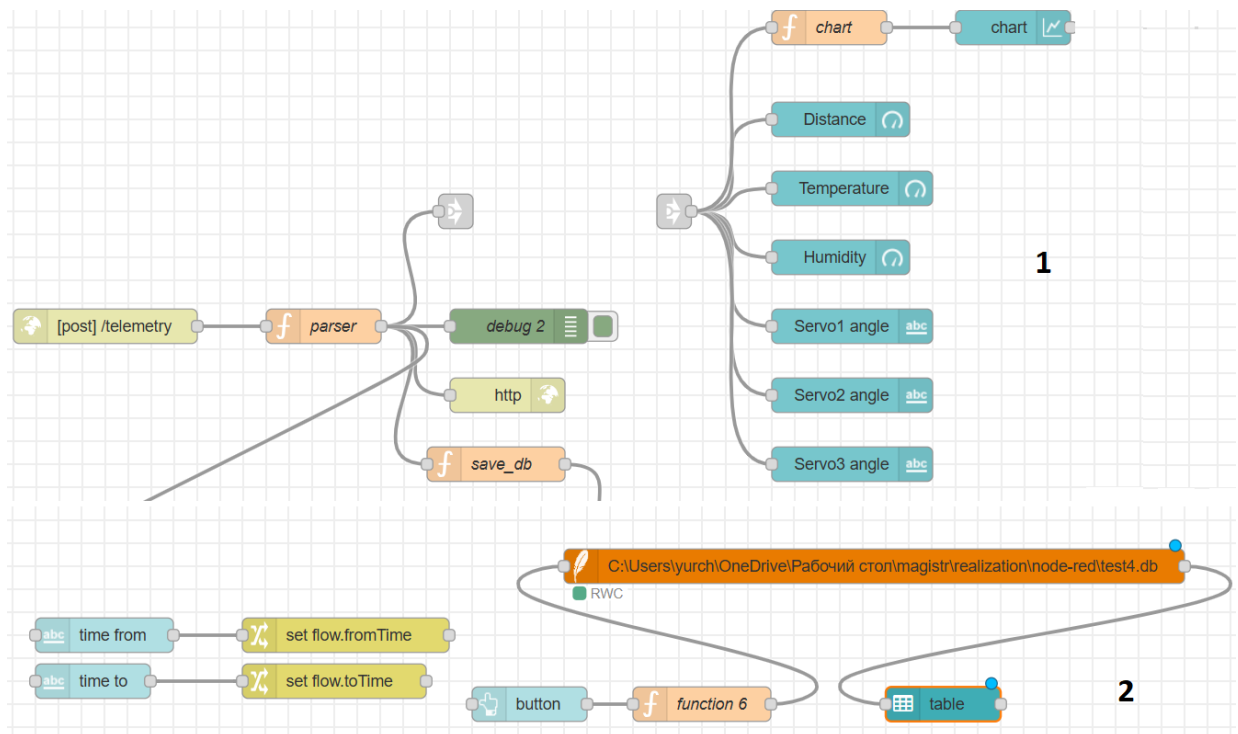


Рисунок 3.2 – Вузли для керування серводвигунами

На основі Node-RED Dashboard створено інтерактивну SCADA-панель, що містить:

- графіки температури, вологості та показників ультразвукового датчика;
- блок управління сервоприводами у режимі реального часу;
- модуль відображення тривоги;
- форма вибору часових проміжків для аналітичних запитів.

Результат автоматично виводиться на історичний графік, що реалізує стандартну SCADA-функцію перегляду трендів (рис. 3.3).



1 – відображення поточних даних на панелі оператора; 2 – відображення даних з БД про хронологію тривог

Рисунок 3.3 – Вузли інтерфейсу оператора

Node-RED у створеній роботі виконує всі основні функції традиційних SCADA-систем:

- збір та первинна обробка технологічних даних;
- архівація даних у БД;
- візуалізація у вигляді графіків та індикаторів;
- керування виконавчими механізмами;
- формування протколів тривог;
- аналітичні SQL-запити по історичних даних.

Завдяки своїй подієво-орієнтованій архітектурі та підтримці протоколів IoT, Node-RED дозволяє інтегрувати різні типи датчиків і модулів без потреби у складних ПЛК або промислових SCADA-платформах. Це робить платформу оптимальним рішенням для побудови цифрової лабораторної моделі виробничого процесу.

Результати розробки SCADA-системи наведені на рисунках 3.4 – 3.6.

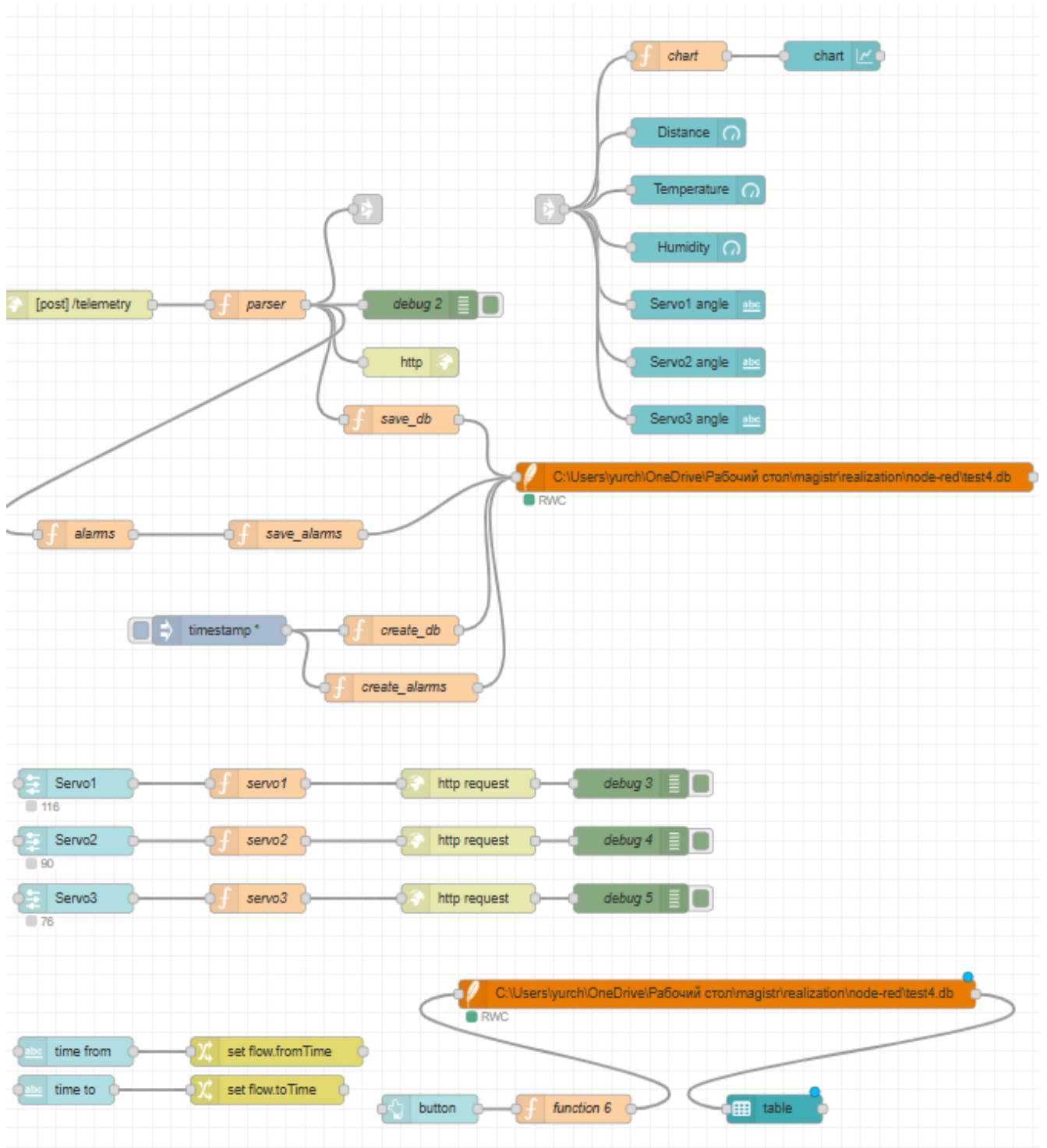


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд потоку

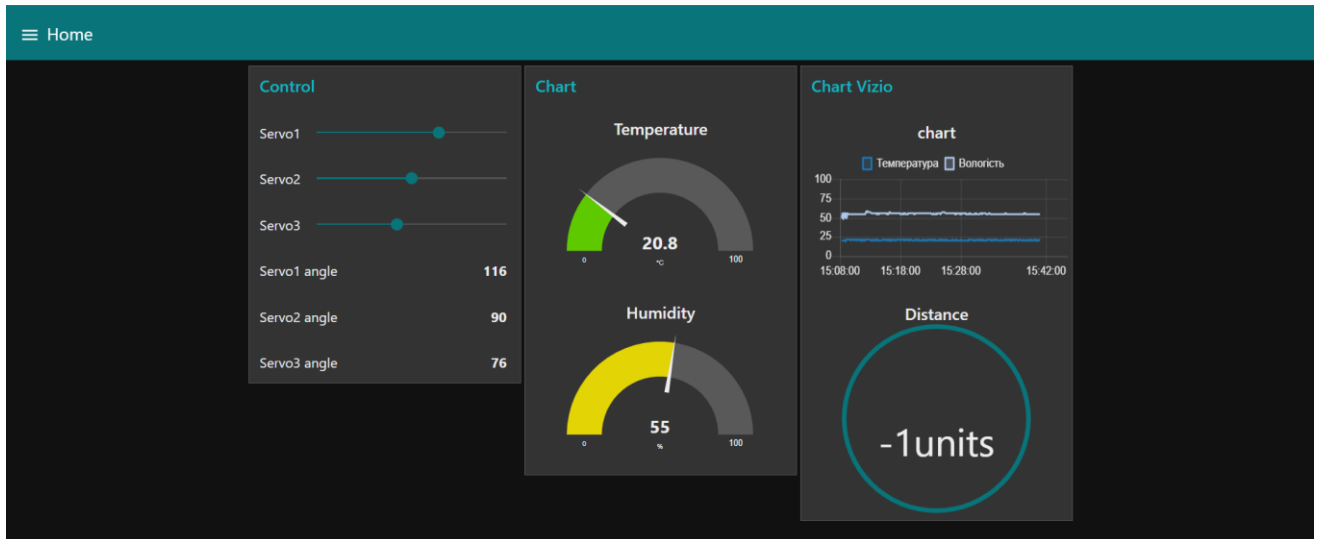


Рисунок 3.5 – Робоча панель оператора з візуалізацією даних

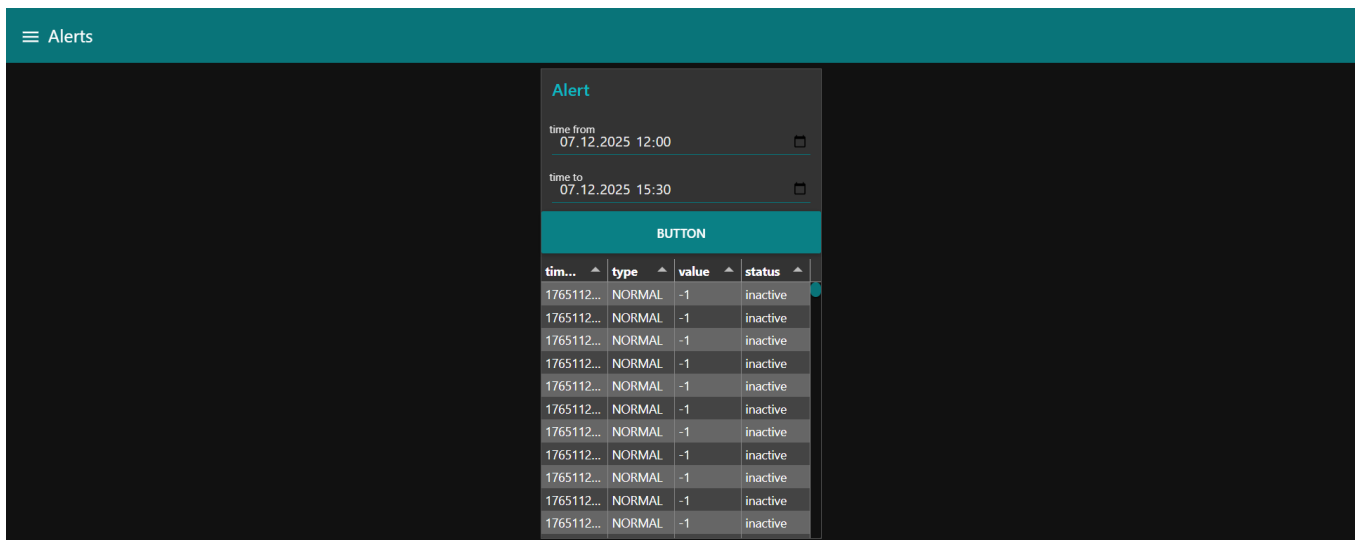


Рисунок 3.6 – Панель відображення тривог з БД

3.3 SQLite

Одним з ключових компонентів розробленої SCADA-системи є підсистема зберігання технологічних параметрів і тривог. Для її реалізації була обрана локальна реляційна база даних SQLite, що забезпечує хороше співвідношення між простотою розгортання, високою продуктивністю та достатньою функціональністю для лабораторних та навчальних SCADA-рішень [26].

SQLite є вбудованою та не потребує запуску окремого серверного процесу. Це критично важливо для локальної SCADA-моделі, де робоча станція оператора

одночасно виконує функції серверної частини. База працює з одним файлом, що спрощує резервне копіювання та можливість перенесення системи. Висока швидкодія при роботі з записами телеметрії, які надходять кожні кілька секунд, забезпечує можливість формувати тривалі тренди без затримок.

SQLite має повноцінну підтримку SQL, що дозволяє виконувати аналітичні вибірки, фільтрацію за часовими діапазонами, сортування, агрегацію, а також підтримується офіційними вузлами Node-RED, що спрощує інтеграцію.

Розроблена БД має дві таблиці. Таблиця збереження телеметрії має наступну реалізацію та поля:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS telemetry (  
  id INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,  
  timestamp DATETIME DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,  
  temp REAL,  
  hum REAL,  
  servo1 INTEGER,  
  servo2 INTEGER,  
  servo3 INTEGER,  
  distance_cm REAL,  
  uptime_s INTEGER);
```

Ця таблиця накопичує повну історію вимірювань, що дозволяє проводити аналіз стану системи в будь-який момент.

Таблиця фіксації тривоги має наступну реалізацію та поля:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS alarms (  
  id INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,  
  timestamp DATETIME DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,  
  type TEXT,  
  value INTEGER,
```

```
status TEXT -- active / cleared);
```

В даній таблиці alarms зберігаються всі критичні події, які були сформовані логікою Node-RED, а саме перегрів, надмірна вологість, об'єкт надто близько до датчика, неправильний стан сервопривода тощо. Поле status фіксує стан тривоги (ACTIVE, INACTIVE).

Після отримання телеметрії на Node-RED формуються SQL-запити у вигляді:

```
INSERT INTO
    telemetry (temp, hum, servo1,
              servo2, servo3, distance_cm, uptime_s)
VALUES (${t.temp}, ${t.hum}, ${t.servo1},
        ${t.servo2}, ${t.servo3}, ${t.distance_cm}, ${t.uptime_s});
```

Кожен пакет даних є окремим рядком у таблиці. Частота запису розрахована так, щоб забезпечити повний тренд без надмірного навантаження на пам'ять.

Для тривог застосовується подібний механізм запису:

```
INSERT INTO
    alarms (timestamp, type, value, status)
VALUES (${msg.timestamp}, '${msg.payload.type}',
        '${msg.payload.value}', '${msg.payload.status}');
```

Оператор має можливість виконувати аналітичні запити за довільний часовий інтервал. Вводячи часові мітки система формує запит:

```
SELECT timestamp, type, value, status
FROM alarms
```

```
WHERE timestamp BETWEEN ${fromTime} AND ${toTime}
ORDER BY timestamp ASC;
```

3.4 Впровадження концепції Digital Twin

Цифровий двійник (Digital Twin) – це віртуальна модель фізичного об’єкта або технологічного процесу, яка знаходиться у постійному двосторонньому зв’язку зі своїм реальним аналогом. Технологія ґрунтується на трьох взаємопов’язаних компонентах [27]:

- фізична система (реальне обладнання, датчики, виконавчі механізми);
- віртуальна модель (математичні та інформаційні моделі процесу);
- дані та зв’язок у реальному часі (телеметрія, архіви, зворотні команди).

У промислових системах цифрові двійники використовуються для [27]:

- прогнозування стану обладнання;
- аналізу поведінки в різних умовах;
- підвищення ефективності автоматизованих систем керування;
- тестування алгоритмів без ризику для реальної установки.

У розроблюваній SCADA-системі цифровий двійник реалізовано як віртуальна модель технологічного процесу, що функціонує паралельно з фізичною моделлю на ESP32, що має три рівні:

- рівень даних (температура, вологість, відстань, кути серводвигунів);
- математична модель експоненціального згладжування;
- рівень візуалізації та керування (таблиці, графіки, керування серводвигунами у режимі реального часу, індикатори).

Алгоритм у Node-RED реалізує просту модель для експертної оцінки стану виробничої лінії:

$$Alarm = \begin{cases} TEMP_HIGH, & T > T_{max}, \\ HUM_LOW, & H > H_{min}, \\ DIST_SHORT, & H > H_{min}, \\ NORMAL, & \text{інше.} \end{cases}$$

У процесі збору телеметричних даних від сенсорів виникають характерні випадкові коливання, обумовлені низкою факторів: електричними перешкодами, нестабільністю датчика, квантуванням АЦП та змінами середовища. Для побудови цифрової моделі технологічного процесу необхідно усунути високочастотний шум та отримати більш стабільний часовий ряд. З цією метою в роботі застосовано метод експоненціального згладжування (EWMA) [28].

Експоненціальне згладжування належить до класу рекурсивних лінійних фільтрів першого порядку та описується (3.2) [29]:

$$\hat{x}_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)\hat{x}_{t-1}, \quad (3.2)$$

де x_t – поточне виміряне значення;

\hat{x}_t – згладжене значення;

$\alpha \in [0; 1]$ – коефіцієнт згладжування.

Чим більшим є значення α , тим швидше фільтр реагує на зміни сигналу, але тим менш ефективно він придушує шум [29]. У даному проєкті обрано значення $\alpha = 0,25$ для значень температури, що забезпечує компроміс між згладжуванням та динамікою.

У системі використано два види EWMA-фільтрації. Онлайн-фільтрування у реальному часі при надходженні кожного нового значення температури у Node-RED. На рисунку 3.7 код реалізації онлайн-згладжування.

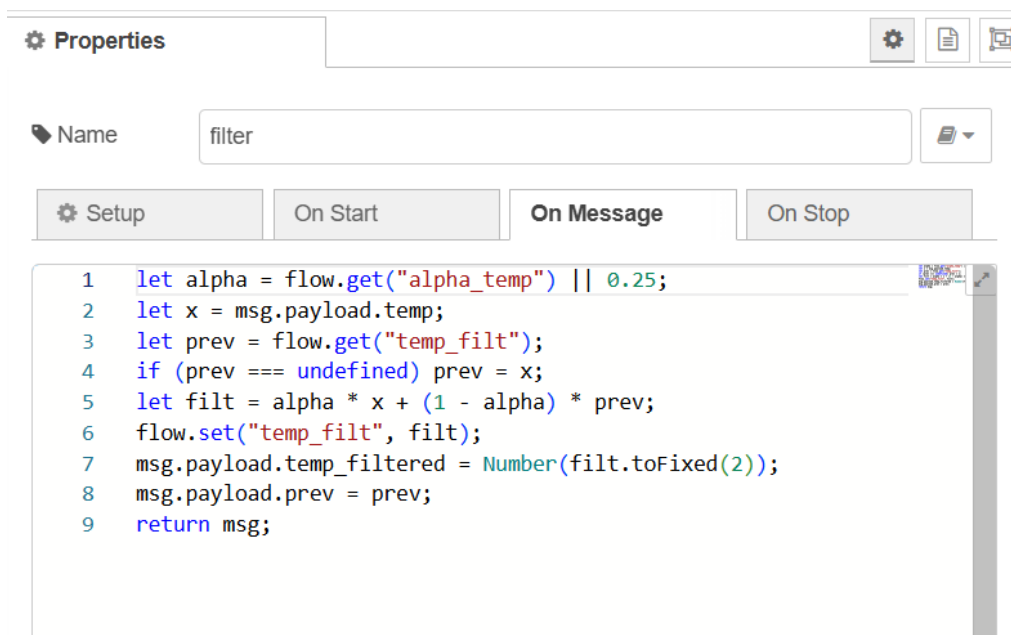


Рисунок 3.7 – Функція онлайн-згладжування у Node-RED

На рисунку 3.8 наведені з'єднання вузлів для онлайн-згладжування.

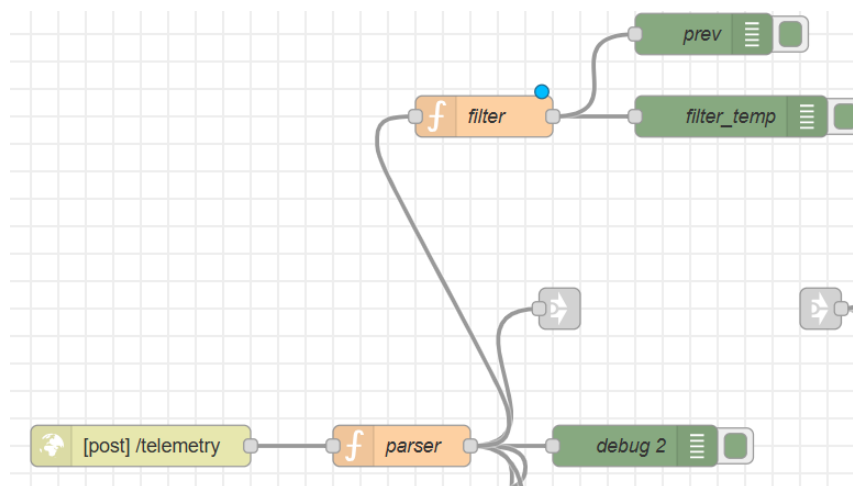


Рисунок 3.8 – З'єднання вузлів у Node-RED для онлайн-згладжування

Офлайн-фільтрація (batch-EWMA) історичних даних із бази даних SQLite реалізована при виборі даних з часових рамок з БД, що обробляються у циклі (рис. 3.9). Для відображення даних з БД та згладжених даних реалізована нова вкладка з кнопками задавання проміжку часу (рис. 3.10).

```

1  let alpha = 0.25;
2  let out = [];
3  let prev;
4
5  for (let i = 0; i < msg.payload.length; i++) {
6    let row = msg.payload[i];
7    let x = Number(row.temp);
8
9    if (isNaN(x)) continue;
10
11   if (prev === undefined) prev = x;
12
13   let filt = alpha * x + (1 - alpha) * prev;
14
15   out.push({
16     timestamp: row.timestamp,
17     temp_raw: x,
18     temp_filt: Number(filt.toFixed(2))
19   });
20
21   prev = filt;
22 }
23
24 msg.payload = out;
25 return msg;

```

Рисунок 3.9 – Функція офлайн-згладжування у Node-RED

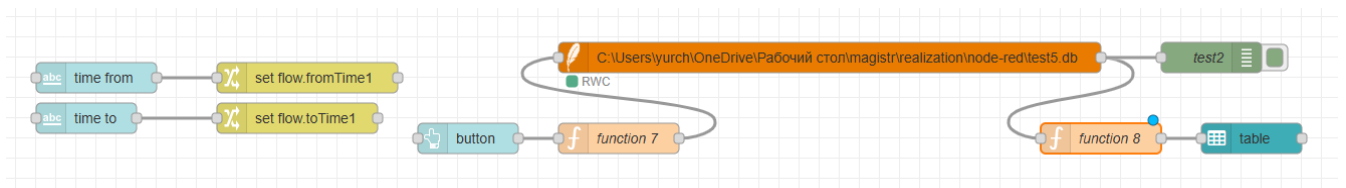


Рисунок 3.10 – З'єднання вузлів у Node-RED для офлайн-згладжування

Таким чином формується реальна цифрова копія температурного процесу в режимі онлайн та будується історичну модель процесу з низьким рівнем шуму, що являється основою для прогнозування, візуалізації та аналізу. На рисунках 3.11 та 3.12 наведено результат відображення двох реалізацій експоненціального згладжування.

Prediction

time from
10.12.2025 00:28

time to
10.12.2025 21:28

BUTTON

timesta...	temp_raw	temp_filt
1765392014...	20.2	20.2
1765392019...	20.2	20.2
1765392024...	20.2	20.2
1765392029...	20.2	20.2
1765392034...	20.2	20.2
1765392039...	20.2	20.2
1765392044...	20.2	20.2
1765392049...	20.2	20.2
1765392054...	20.2	20.2
1765392059...	20.2	20.2
1765392064...	20.2	20.2

Рисунок 3.11 – Відображення даних після офлайн-згладжування

```

10.12.2025, 21:30:55 node: debug 2
telemetry : msg.payload : Object
  { temp: 20.4, hum: 46, servo1:
  servo2: 90, servo3: 90 ... }

10.12.2025, 21:30:56 node: filter_temp
telemetry : msg.payload.temp_filtered : number
20.41

10.12.2025, 21:30:56 node: prev
telemetry : msg.payload.prev : number
20.41777830078609

```

Рисунок 3.12 – Відображення даних після онлайн-згладжування

3.5 Висновки до розділу 3

Третій розділ детально описує розробку програмного забезпечення для реалізації дворівневої лабораторної моделі автоматизованої системи керування, що складається з польового контролера ESP32 та диспетчерського рівня SCADA на базі Node-RED.

Розроблене ПЗ для мікроконтролера ESP-WROOM-32 реалізує принцип Cyber-Physical Node, виступаючи як польовий контролер. Воно забезпечує збір аналогово-цифрової інформації з датчиків, формування уніфікованих пакетів телеметрії у форматі JSON, передачу цих даних до диспетчерської системи через

протокол HTTP, а також отримання й обробку керуючих команд від верхнього рівня для управління трьома сервоприводами SG90 в режимі реального часу.

Для реалізації диспетчерського рівня обрано Node-RED – інструмент візуального програмування з низьким кодом, що базується на потоках і використовується для об'єднання пристроїв, API та онлайн-сервісів в IoT. Node-RED виконує всі основні функції традиційних SCADA-систем: збір і первинна обробка даних, архівація, візуалізація, керування виконавчими механізмами, формування протоколів тривоги та аналітичні запити.

На базі Node-RED Dashboard створено інтерактивну SCADA-панель, що включає графіки технологічних параметрів, блок управління сервоприводами, модуль відображення тривоги та форму для вибору часових проміжків для аналітичних запитів.

Для архівації технологічних параметрів і тривоги обрано локальну реляційну базу даних SQLite. Її перевагами є простота розгортання, висока продуктивність для локальних SCADA-моделей та відсутність потреби у запуску окремого серверного процесу.

У розробленій SCADA-системі концепція цифрового двійника реалізована як віртуальна модель технологічного процесу, що функціонує паралельно з фізичною моделлю на ESP32. Ця модель включає рівень даних, математичну модель експоненціального згладжування та рівень візуалізації і керування.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Дослідження експоненціального згладжування

Метою експериментального дослідження є оцінка роботи розробленої системи моніторингу та цифрового двійника виробничої лінії, що побудована на основі даних, що надходять від мікроконтролера ESP32 та обробляються у середовищі Node-RED. Дослідження включає експерименти зі збором початкових даних від датчиків та застосуванням експоненціального згладжування.

Перший етап передбачає збір нефільтрованої даних. У якості вихідних були взяті значення з датчика температури, які система збирала протягом деякого часу. В таблиці 4.1 наведені дані, які були зібрані системою. На рисунку 4.1 наведено графік значень температури з датчика.

Таблиця 4.1 – Дані з датчика температури

Часова мітка	Значення температури
1765475641910 – 11.12.2025 19:54:01	20.4
1765475646882 – 11.12.2025 19:54:06	20.3
1765475651886 – 11.12.2025 19:54:11	20.4
1765475656884 – 11.12.2025 19:54:16	20.4
1765475661867 – 11.12.2025 19:54:21	20.9
1765475666998 – 11.12.2025 19:54:26	20.4
1765475671897 – 11.12.2025 19:54:31	20.5
1765475676932 – 11.12.2025 19:54:36	21
1765475681901 – 11.12.2025 19:54:41	20.5
1765475686891 – 11.12.2025 19:54:46	20.3
1765475686891 – 11.12.2025 19:54:51	20.8

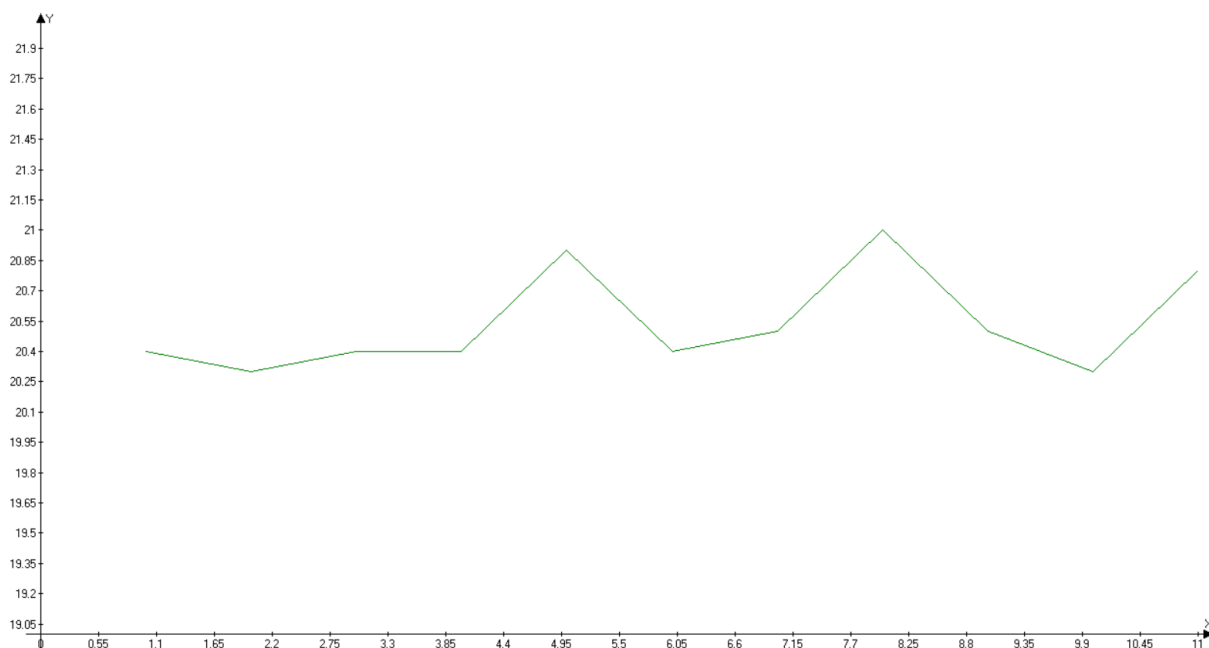


Рисунок 4.1 – Графік початкових даних температури

Коливання в межах від $0,5^{\circ}\text{C}$ до 1°C є типовими для ДНТ11 і становлять проблему для аналітики та прогнозування.

Використовуючи (3.2), було проведено згладжування отриманих значень температури. Реалізація програмного коду для згладжування даних наведено на рисунку 4.2.

```

1 let msg = [20.4, 20.3, 20.4, 20.4, 20.9, 20.4, 20.5, 21, 20.5, 20.3, 20.8];
2 let alpha = 0.25;
3 let out = [];
4 let prev;
5 for (let i = 0; i < msg.length; i++) {
6   let x = Number(msg[i]);
7   if (isNaN(x)) continue;
8   if (prev === undefined) prev = x;
9   let filt = alpha * x + (1 - alpha) * prev;
10  out.push({
11    temp_raw: x,
12    temp_filt: Number(filt.toFixed(2))
13  });
14  prev = filt;
15 }
16 console.log(out);

```

Рисунок 4.2 – Програмний код для експоненціального згладжування

Отримані дані після згладжування наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Згладжені дані

Часова мітка	Значення температури
1765475636892	20.4
1765475641910	20.38
1765475646882	20.38
1765475651886	20.39
1765475656884	20.51
1765475661867	20.49
1765475666998	20.49
1765475671897	20.62
1765475676932	20.59
1765475681901	20.52
1765475686891	20.59

На рисунку 4.3 наведені графіки початкових та згладжених даних.



Рисунок 4.3 – Графіки початкових та згладжених даних температури

На графіку порівняно сирі та згладжені дані. Метод експоненціального згладжування значно зменшив шум та вирівняв динаміку. Плавність цифрового сигналу стала суттєво кращою при збереженні загальної форми процесу.

Розрахуємо середньоквадратичне відхилення за вибіркою початкових та згладжених даних.

Середньоквадратичне відхилення розраховується за (4.1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4.1)$$

Програмна реалізація наведена на рисунку 4.4.

<pre> 1- const data = [20.4, 20.3, 20.4, 20.4, 2 20.9, 20.4, 20.5, 21, 3 20.5, 20.3, 20.8]; 4 const N = data.length; 5 const mean = data.reduce((acc, x) => acc + x, 0) / N; 6- const sumSqDiff = data.reduce((acc, x) => { 7 const diff = x - mean; 8 return acc + diff * diff; 9 }, 0); 10 const variance = sumSqDiff / N; 11 const std = Math.sqrt(variance); 12 13 console.log(std) </pre>	<pre> 1- const data = [20.4,20.38,20.38,20.39, 2 20.51,20.49,20.49,20.62, 3 20.59,20.52,20.59]; 4 const N = data.length; 5 const mean = data.reduce((acc, x) => acc + x, 0) / N; 6- const sumSqDiff = data.reduce((acc, x) => { 7 const diff = x - mean; 8 return acc + diff * diff; 9 }, 0); 10 const variance = sumSqDiff / N; 11 const std = Math.sqrt(variance); 12 13 console.log(std) </pre>
--	--

Рисунок 4.4 – Програмна реалізація обчислення середньоквадратичного відхилення

З результатів обчислення середньоквадратичне відхилення для початкових даних складає 0,2346 та для згладжених даних 0,0855.

4.2 Вплив коефіцієнта згладжування на якість експоненціального згладжування

Експеримент спрямований на оцінювання впливу коефіцієнта згладжування α на якість роботи фільтра експоненціального згладжування (EWMA).

Основна мета – це визначити найоптимальніше значення α .

Модель згладжування наведена у формулі 3.2. З даної формули значення α може бути в межах від 0 до 1. За основу початкових даних були обрані значення з таблиці 4.1.

У таблиці 4.2 наведені розраховані згладжені дані відповідно до значення коефіцієнту згладжування, а також середньоквадратичне відхилення.

Таблиця 4.3 – Згладжування даних відповідно до коефіцієнту α

Коефіцієнт α	Згладжені дані	σ
0,25	[20.4, 20.38, 20.38, 20.39, 20.51, 20.49, 20.49, 20.62, 20.59, 20.52, 20.59]	0,0855
0,5	[20.4, 20.35, 20.38, 20.39, 20.64, 20.52, 20.51, 20.76, 20.63, 20.46, 20.63]	0,1277
0,75	[20.4, 20.33, 20.38, 20.4, 20.77, 20.49, 20.5, 20.87, 20.59, 20.37, 20.69]	0,1723
1	[20.4, 20.3, 20.4, 20.4, 20.9, 20.4, 20.5, 21, 20.5, 20.3, 20.8]	0,2346

З наведених результатів можна сказати, що при збільшенні значення α зростає відхилення та значення майже не згладжуються, однак занадто низьке значення коефіцієнта згладжування може впливати на швидкість роботи та обчислення, що у свою чергу може впливати на швидкодію систему та порушення правила роботи системи у реальному часі. Оптимальним значенням було обрано 0,25.

На рисунку 4.5 наведені графіки отриманих даних.

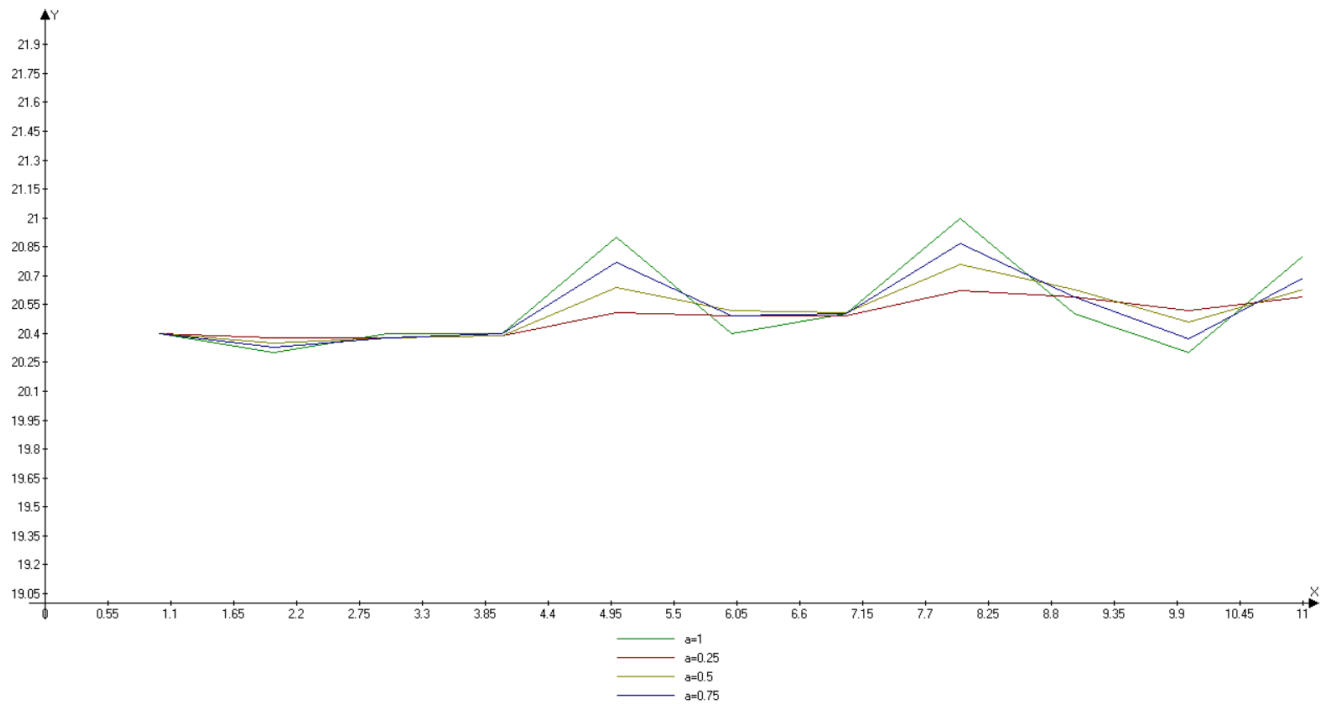


Рисунок 4.5 – Графіки отриманих даних відповідно до коефіцієнту згладжування

4.3 Прогнозування значень температури

Мета експерименту – дослідити можливість короткотривалого прогнозування температури технологічного процесу на основі згладжених історичних даних для подальшого інтегрування в систему.

За основу взяті згладжені дані з таблиці 4.2.

Математична модель прогнозування та визначення тренду розраховується за (4.2) [30].

$$\Delta_t = x_t - x_{t-1}, \quad (4.2)$$

де Δ_t – приріст температури.

Прогнозування на один крок розраховується за (4.3).

$$x_{t+1} = x_t + \Delta_t. \quad (4.3)$$

У таблиці 4.4 наведені результати розрахунків

Таблиця 4.4 – Розрахунок приросту температури

Часова мітка	Значення температури	Δ_t
1765475646882	20.4	–
1765475651886	20.38	-0,02
1765475656884	20.38	0
1765475661867	20.39	0,01

Виходячи з отриманих даних та (4.2) прогнозування на два кроки вперед становить $20,39^{\circ}\text{C} + 2 \cdot 0,01 = 20,41^{\circ}\text{C}$. Похибка з реальним наступним значенням $20,49^{\circ}\text{C}$ з таблиці 4.2 становить $0,08^{\circ}\text{C}$. В таблиці 4.5 наведені розрахунки прогнозування значень температури.

Таблиця 4.5 – Розрахунки прогнозування значень температури

Кроки	Прогноз	Фактичне	Похибка
1	20,40	20,51	0,11 $^{\circ}\text{C}$
2	20,41	20,49	0,08 $^{\circ}\text{C}$
3	20,42	20,49	0,07 $^{\circ}\text{C}$
5	20,44	20,59	0,15 $^{\circ}\text{C}$

Отримані результати демонструють досить високу точність прогнозованих даних на короткотривалому відліку часу, що дає можливість впровадження моделі прогнозування у SCADA-систему.

4.4 Висновки до розділу 4

Четвертий розділ присвячений експериментальній оцінці розробленої системи моніторингу та цифрового двійника виробничої лінії, зокрема,

ефективності методу експоненціального згладжування та можливості короткотривалого прогнозування технологічних параметрів.

Вихідні значення температури, зібрані з датчика DHT11, продемонстрували типові коливання в межах від 0,5 °C до 1 °C, що є проблемою для точної аналітики та прогнозування.

Застосування методу експоненціального згладжування (EWMA) призвело до значного зменшення шуму та вирівнювання динаміки сигналу, суттєво покращивши плавність при збереженні загальної форми процесу.

Було розраховано середньоквадратичне відхилення для початкових і згладжених даних. Середньоквадратичне відхилення для початкових даних становило 0,2346, тоді як для згладжених даних воно зменшилося до 0,0855. Це підтверджує, що експоненціальне згладжування успішно зменшило відхилення та шум на 36%, що підвищує ефективність спостереження та збору даних для подальшого аналізу.

Експериментально оцінювався вплив коефіцієнта α на якість роботи фільтра EWMA з метою визначення найбільш оптимального значення. Дослідження показало, що при збільшенні значення α , зростає відхилення, і дані майже не згладжуються. Зокрема, при $\alpha = 1$ середньоквадратичне відхилення залишається 0,2346 як у початкових даних. Занадто низьке значення α може негативно вплинути на швидкість обчислень та швидкодію системи реального часу. На основі порівняння середньоквадратичних відхилень було обрано оптимальне значення коефіцієнта згладжування $\alpha = 0,25$.

Також проведено дослідження короткотривалого прогнозування значень температури. Розрахунки продемонстрували досить високу точність прогнозованих даних на короткотривалому відліку часу. Наприклад, прогнозування на 2 кроки вперед дало значення 20,41 °C, що має похибку 0,08°C порівняно з фактичним наступним значенням 20,49 °C. Максимальна похибка при прогнозуванні на 5 кроків вперед склала 0,15°C.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі було реалізовано повноцінний прототип SCADA-системи, орієнтований на моніторинг і керування технологічним процесом на основі концепцій Інтернету речей та цифрових двійників. Система включає апаратний рівень, комунікаційний рівень, рівень оброблення й аналізу даних, базу даних і програмний інтерфейс візуалізації. Усі ці складові були інтегровані в єдину архітектуру, що забезпечує збір телеметрії, її обробку, зберігання та відображення у вигляді графіків, таблиць та елементів керування.

Конфігурація лабораторного макету дозволила імітувати технологічний процес, а саме автоматизоване встановлення та тестування датчика температури на електронний модуль. Апаратна частина була повністю інтегрована з Node-RED через HTTP-протокол, що забезпечило двосторонню взаємодію між фізичною установкою та SCADA-системою в реальному часі. Розроблено інтерфейс, який надає можливість отримання телеметрії та відправлення команд на ESP32, що наближає виконану роботу до промислових стандартів IoT-середовищ.

Одним із ключових досліджень стало впровадження математичних методів обробки сигналів. Для фільтрації шумових вимірювань використано експоненціальне згладжування, яке було реалізовано як у потоковому режимі (в режимі реального часу), так і для пакетної обробки даних, зчитаних із бази даних SQLite. Запровадження фільтра дозволило значно покращити якість сигналів, зменшити вплив випадкового шуму та підвищити достовірність отриманих часових рядів. У системі також реалізовано інструменти порівняння початкових і згладжених даних, що дало змогу провести оцінку ефективності методу та визначити оптимальні значення коефіцієнта згладжування.

Також проведено моделювання та прогнозування температури як одного з ключових параметрів технологічного процесу. Було реалізовано метод короткострокового прогнозування. Проведені експериментальні дослідження

засвідчили, що модель забезпечує найменші похибки прогнозу на малих горизонтах, що дозволяє використовувати її як елемент системи ранньої діагностики та попередження аномалій.

Логічним продовженням виконаної роботи стало впровадження концепції Digital Twin. Створена SCADA-система може розглядатися як базова реалізація цифрового двійника апаратної установки, оскільки забезпечує збір актуальних параметрів, оновлює віртуальний стан процесу в режимі реального часу й дозволяє керувати фізичними об'єктами через цифрову модель. Це демонструє можливість застосування розробленої моделі для дослідження поведінки обладнання, тестування сценаріїв, оптимізації параметрів керування та впровадження аналітики.

У рамках експериментальних досліджень проаналізовано роботу системи як при надходженні поточних даних, так і при роботі з історичними вибірками. Проведено експерименти щодо вибору параметра α для EWMA, порівняння прогнозних моделей, аналізу поведінки системи при різних навантаженнях та тестування форматів запиту даних за часовими інтервалами. Експерименти підтвердили працездатність та стабільність побудованої моделі, а також показали, які параметри найбільше впливають на точність і швидкодію системи.

У підсумку розроблена система виконує всі ключові функції SCADA-рівня:

- збір телеметрії;
- фільтрація та аналіз даних;
- виявлення тривоги;
- керування виконавчими механізмами;
- збереження історичних даних;
- побудова графіків та аналітики;
- функціональність цифрового двійника.

Розроблена система є масштабованою для подальшого доповнення новими сенсорами, алгоритмами машинного навчання, інтегрування з промисловими контролерами Siemens S7-1200 та розширення до промислового цифрового двійника.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання / Нац. стандарт України. – Вид. офіц. – [Чинний від 2017 – 07 – 01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 26 с.
2. Юрченко О.Д. Роль SCADA-системи з використанням концепції ІОТ // Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки 2025: матеріали II-ої Всеукраїнської конференції, Харків, 16-17 травня 2025.: тези доповідей / [редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)].-Харків: [електронний друк], 2025. – С. 120-124/– Режим доступу: <https://tapr.nure.ua/dijalnist-kafedri/naukova-robota/computer-integrated-technologies-automation-and-robotics>. Дата звернення: 31.09.2025.
3. 17 Цілей сталого розвитку [Електроний ресурс]/– Режим доступу: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/>. Дата звернення: 25.10.2025.
4. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: Підручник Харків: ФОП Панов А.М., 2021., 604 с.
5. Святний В., Бровкіна Д. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ. [Електроний ресурс]/– Режим доступу: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/4feca081-13f5-44ab-86a5-f4c53b05eadc/content>. Дата звернення: 12.12.2025.
6. Hermann M., Pentek T., Otto V. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. [Електроний ресурс]/– Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/307864150_Design_Principles_for_Industrie_40_Scenarios_A_Literature_Review. Дата звернення: 12.12.2025.
7. ISA-95 Standard: Enterprise-Control System Integration. isa.org. [Електроний ресурс]/– Режим доступу: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>. Дата звернення: 12.12.2025.

8. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/specialpublications/nist.sp.800-82r2.pdf>. Дата звернення: 12.12.2025.

9. Автоматизована система керування технологічними процесами в SCADA системі TRACE MODE 6 : навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, В. В. Євсєєв, та ін. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2018 р. – 320 с.

10. SCADA система [Електронний ресурс] / Семенюк Ганна. Режим доступу: <https://digitar.com.ua/scada-systema-shho-cze-take/>. Дата звернення: 18.12.2025.

11. Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems for Industrial Automation and Control Systems in Industry 4.0 [Електронний ресурс] / Florin Vasile Popescu – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/367066607_Supervisory_Control_and_Data_Acquisition_SCADA_Systems_for_Industrial_Automation_and_Control_Systems_in_Industry_40. Дата звернення: 18.12.2025.

12. Research on the SCADA system constructing methodology based on SOA [Електронний ресурс] / L. Wang – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/290759633_Research_on_the_SCADA_system_constructing_methodology_based_on_SOA. Дата звернення: 18.12.2025.

13. Архітектурні рішення та інтеграція [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <http://edu.asu.in.ua/mod/book/tool/print/index.php?id=107>. Дата звернення: 18.12.2025.

14. FANUC Robot LR Mate 200iD Datasheet. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: https://www.fanucamerica.com/cmsmedia/datasheets/LR%20Mate%20200iD%20Series_187.pdf. Дата звернення: 18.12.2025.

15. E6B2-CWZ6C 1024P/R 0.5M Datasheet. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <https://www.ia.omron.com/product/item/2453/>. Дата звернення: 18.12.2025.

16. E3F2-DS30C4-P1 Datasheet. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/168739/OMRON/E3F2-DS30C4-P1.html>. Дата звернення: 12.12.2025.

17. IVO PT100 Datasheet. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1491697/IVO/PT100/127/2/PT100.html>. Дата звернення: 12.12.2025.

18. SIMATIC S7-1200. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/simatic-s7-1200.html>. Дата звернення: 12.12.2025.

19. Espressif Documentation. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. Дата звернення: 12.12.2025.

20. Servo Motor SG90 Datasheet. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_datasheet.pdf. Дата доступа: 06.05.2025.

21. DHT11 Datasheet. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1440068/ETC/DHT11/127/2/DHT11.html>. Дата доступа: 06.05.2025.

22. HC-SR04 Datasheet. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1132203/ETC2/HC-SR04/229/2/HC-SR04.html>. Дата звернення: 12.12.2025.

23. Data Flow Diagrams Examples. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: https://www.umsl.edu/~sauterv/analysis/dfd/dfd_intro.html. Дата звернення: 12.12.2025.

24. Data Flow Diagrams. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20061012050711/http://www.cems.uwe.ac.uk/~tdrewry/dfds.htm>. Дата звернення: 12.12.2025.

25. Low-code programming for event-driven applications : Node-RED. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <https://nodered.org/>. Дата звернення: 12.12.2025.

26. SQLite. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <https://sqlite.org/>. Дата звернення: 12.12.2025.

27. Gallagher N., Armstrong M. M. What Is a Digital Twin? | IBM. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <https://www.ibm.com/think/topics/digital-twin>. Дата звернення: 12.12.2025.

28. Exponentially Weighted Moving Models. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2404.08136>. Дата звернення: 12.12.2025.

29. Експоненціальне згладжування. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/2398204/page:21/>. Дата звернення: 12.12.2025.

30. Extrapolation. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Extrapolation>. Дата звернення: 12.12.2025.