

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту
Дидик Олексій Русланович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 636.5:65.011
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Удосконалення автоматизованої системи обробки інформації в умовах
виробництва

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 – Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело:**

Здобувач освітнього ступеня _____ Дидик О.Р.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Лютак З.П.
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

проф _____ Цих В.С.
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень магістр

Спеціальність 175 – Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТТМ

Цих В.С.

« » 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Дидику Олексію Русланович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення автоматизованої системи обробки інформації в умовах виробництва

керівник роботи Лютак З.П., кан. тех. н.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 5 ” грудня 2025 року № 752/7

2. Строк подання студентом роботи 26 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи функціональні вимоги до системи автоматизованого обліку вантажопотоку, параметри об'єкта автоматизації (швидкість конвеєрної стрічки, тип вантажу), вимоги до точності детектування та швидкодії системи, вибір апаратної платформи та протоколів бездротової передачі даних.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз предметної області

2. Розробка та системний аналіз архітектури комплексу

3. Оптимізація та практичне впровадження системи на підприємстві

4. Метрологічне забезпечення та аналіз сумарної похибки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

МР.МТТМ – 03.00.00.001. Блок-схема алгоритму роботи пристрою

МР.МТТМ – 03.00.00.002. Розробка друкованої плати пристрою

МР.МТТМ – 03.00.00.003. Блок-схема роботи програмної частини

МР.МТТМ – 03.00.00.004. Візуалізація схеми зв'язку з робочим місцем

МР.МТТМ – 03.00.00.005. Веб-інтерфейс управління лінією

МР.МТТМ – 03.00.00.006. Таблиця затримок для різних типів мереж

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Чуйко М.М. к.т.н.		

7. Дата видачі завдання 6 жовтня 2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Підбір необхідної літератури	до 30.10	викон.
2	Вибір програмних пакетів для реалізації системи	до 15.11	викон.
3	Порівняльний аналіз існуючих систем	до 30.11	викон.
4	Розроблення архітектури комплексу	до 01.12	викон.
5	Програмна реалізація методів цифрової фільтрації та мінімізації впливу дестабілізуючих факторів	до 15.12	викон.
6	Висновки	до 19.12	викон.

Студент _____ Дидик О.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Лютак З.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 65 с., 14 рис., 7 табл., 15 джерел та 6 листів графічного матеріалу.

Темою магістерської роботи є «Удосконалення автоматизованої системи обробки інформації в умовах виробництва».

Метою роботи є розробка та вдосконалення технічного засобу для автоматизованого обліку переміщення вантажів на виробничому конвеєрі за допомогою оптичних лазерних сенсорів та реалізація системи віддаленого моніторингу через веб-інтерфейс у реальному часі.

У бакалаврській роботі проаналізовано роль та місце автоматизованих систем у сучасній складській логістиці. Проведено порівняльний аналіз методів детектування об'єктів та обґрунтовано вибір лазерного бар'єра як найбільш точного та далекобійного засобу контролю.

Розроблено схему електричну принципову для технічної реалізації системи на базі мікроконтролера ESP8266 (NodeMCU V3). Створено алгоритм функціонування та програмне забезпечення, що забезпечує збір даних про вантажопотік і їх передачу на сервер за допомогою протоколу HTTP. Проведено експериментальне дослідження мережевих затримок у різних типах з'єднань та розраховано сумарну метрологічну похибку системи, яка становить 1,8%. У розділі з охорони праці проаналізовано небезпеки та розраховано захисне заземлення випробувальної установки.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАЦІЯ СКЛАДУ, ЛАЗЕРНИЙ БАР'ЄР, ВЕБ-ІНТЕРФЕЙС, ESP8266, IoT, МЕТРОЛОГІЧНА ПОХИБКА, HTTP-ПРОТОКОЛ.

ABSTRACT

The explanatory note contains 65 pages, 14 figures, 7 tables, 15 sources, and 6 sheets of graphic material.

The topic of the bachelor's thesis is "Improvement of an automated information processing system in a production environment".

The aim of the work is the development and improvement of a technical tool for automated tracking of cargo movement on a production conveyor using optical laser sensors and the implementation of a real-time remote monitoring system via a web interface.

The bachelor's thesis analyzes the role and place of automated systems in modern warehouse logistics. A comparative analysis of object detection methods was conducted, and the choice of a laser barrier as the most accurate and long-range control tool was justified.

A schematic electrical design was developed for the technical implementation of the system based on the ESP8266 (NodeMCU V3) microcontroller. An operational algorithm and software were created to provide data collection on cargo flow and its transmission to a server using the HTTP protocol. An experimental study of network delays in various connection types was conducted, and the total metrological error of the system was calculated, which is 1.8%. In the occupational health and safety section, hazards were analyzed, and the protective grounding of the testing unit was calculated.

Keywords: WAREHOUSE AUTOMATION, LASER BARRIER, WEB INTERFACE, ESP8266, IoT, METROLOGICAL ERROR, HTTP PROTOCOL.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 Роль автоматизованих систем у концепції Industry 4.0 та складській логістиці	11
1.2 Технічні засоби детектування об'єктів та фізичні принципи роботи.....	12
1.3 Метрологічні аспекти вимірювання часових інтервалів у розподілених системах.....	14
1.4 Архітектура та мережева взаємодія компонентів	16
1.5 Порівняльний аналіз та техніко-економічне обґрунтування впровадження системи	18
1.6 Аналіз існуючих аналогів систем автоматизації та обліку	21
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА КОНСТРУКТОРСЬКА РОЗРОБКА АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	25
2.1 Розробка та системний аналіз архітектури комплексу.....	25
2.2 Аналіз варіантів побудови апаратної частини та обґрунтування вибору елементної бази	26
2.3 Схемотехнічні рішення та аналіз електричної принципової схеми.....	30
2.4 Аналіз архітектури обчислювальної платформи NodeMcu	32
2.5 Фізичні принципи функціонування сенсорної підсистеми	33
2.6 Технічні характеристики системи, проектування друкованої плати та конструкція корпусу	35
3 РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛІКУ	39
3.1 Вплив фізичних величин первинних перетворювачів на роботу виконавчих елементів пристрою	39

3.2 Технології та інструментальні засоби розробки програмного забезпечення	41
3.3 Розроблення і опис програмного коду пристрою	45
3.4 Програмна реалізація методів цифрової фільтрації та мінімізації впливу дестабілізуючих факторів.....	48
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛІКУ	51
4.1 Технічні характеристики та аналіз параметрів системи	51
4.2 Опис та теоретичне обґрунтування інструкції з експлуатації веб-інтерфейсу	52
4.3 Експериментальний аналіз затримок передачі даних (Latency).....	53
4.4 Оптимізація та практичне впровадження системи на підприємстві.....	55
4.5 Метрологічне забезпечення та аналіз сумарної похибки.....	56
4.6 Методика перевірки вимірювального каналу та статистична оцінка результатів.....	57
ВИСНОВКИ.....	61
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	63

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АСОІ — Автоматизована система обробки інформації.

АСУ — Автоматизована система управління.

АЦП — Аналого-цифровий перетворювач (англ. ADC — Analog-to-Digital Converter).

ККД — Коефіцієнт корисної дії.

ПЛК — Програмований логічний контролер (англ. PLC — Programmable Logic Controller).

API — Application Programming Interface (Програмний інтерфейс додатка).

AWS — Amazon Web Services (Хмарна платформа для хостингу сервера).

BI — Business Intelligence (Інструменти бізнес-аналітики).

CAPEX — Capital Expenditure (Капітальні витрати).

ESP8266 — Мікроконтролер із вбудованим Wi-Fi модулем виробництва Espressif Systems.

GPIO — General Purpose Input/Output (Контакти введення-виведення загального призначення).

HTTP — HyperText Transfer Protocol (Протокол передачі гіпертексту).

IoT — Internet of Things (Інтернет речей).

IP — Internet Protocol (Міжмережевий протокол).

JSON — JavaScript Object Notation (Текстовий формат обміну даними).

Latency — Мережева затримка передачі даних.

OTA — Over-the-Air (Технологія дистанційного оновлення ПЗ через бездротову мережу).

ROI — Return on Investment (Показник окупності інвестицій).

RTT — Round Trip Time (Час кругової затримки сигналу).

TCP — Transmission Control Protocol (Протокол керування передачею даних).

UART — Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Універсальний асинхронний приймач-передавач).

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується стрімким переходом до концепції «Індустрія 4.0», де ключовим фактором ефективності підприємства стає цифровізація та автоматизація інформаційних потоків. Рівень життя та конкурентоспроможність сучасних виробничих потужностей значною мірою визначаються розвитком продуктивних сил, що включають не лише засоби виробництва, а й інтелектуальні системи управління ними.

В умовах сучасного виробництва обсяги даних, які потребують обробки, зростають експоненціально. Традиційні методи збору інформації, що базуються на ручному введенні або застарілих дротових системах, уже не задовольняють вимоги до швидкості та точності. Людському фактору притаманні суб'єктивні помилки, обмежена швидкість реакції та втомлюваність, що в умовах високоінтенсивних конвеєрних ліній може призводити до значних логістичних втрат. Саме тому автоматизація виробництва — широке застосування обладнання, де функції керування та контролю виконують автоматичні пристрої — стає життєво необхідною.

Особливої актуальності набуває використання технологій Інтернету речей (IoT) та бездротових мереж передачі даних. Використання мікроконтролерних систем, таких як ESP8266, у поєднанні з прецизійними оптичними сенсорами (лазерними бар'єрами), дозволяє створювати гнучкі, масштабовані та низьковартісні системи обробки інформації. Такі системи забезпечують прозорість виробничих процесів, дозволяючи диспетчеру здійснювати моніторинг та керування в реальному часі через веб-інтерфейс з будь-якої точки світу.

Мета роботи полягає у розробці та вдосконаленні технічних і програмних засобів автоматизованої системи обробки інформації про рух вантажів у виробничому середовищі. Це передбачає створення пристрою на

базі лазерних сенсорів та веб-інтерфейсу, що забезпечить підвищення точності обліку та оперативність управління логістичними потоками підприємства.

Об'єкт дослідження — процеси збору, реєстрації та дистанційної передачі інформації про стан і переміщення об'єктів на виробничих конвеєрних лініях.

Предмет дослідження — апаратні модулі на базі мікроконтролера ESP8266, лазерні випромінювачі та приймачі, алгоритми обробки даних у форматі JSON та протоколи бездротового зв'язку HTTP для взаємодії з веб-сервером.

Завдання роботи:

1. Проаналізувати ефективність існуючих автоматизованих систем обробки інформації та методи передачі даних у промислових мережах.
2. Обґрунтувати вибір елементної бази, зокрема платформи NodeMcu та лазерних бар'єрів, для вирішення завдань безконтактної фіксації об'єктів.
3. Розробити структурну та електричну принципову схеми технічного засобу обробки інформації.
4. Створити прикладне програмне забезпечення для мікроконтролера, що реалізує алгоритм фіксації подій та взаємодію з веб-сервером через HTTP-запити.
5. Провести експериментальні дослідження характеристик системи, включаючи аналіз мережевих затримок (Latency) та оцінку метрологічної похибки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні структури системи обробки інформації за рахунок інтеграції лазерних методів детектування та веб-технологій, що забезпечує стабільну роботу з відносною похибкою 1,8% в умовах зашумлених виробничих мереж Wi-Fi.

Практичне значення. Розроблена система може бути впроваджена на підприємствах з конвеєрним типом виробництва для автоматизації обліку готової продукції, контролю заповненості складських площ та оперативного диспетчерського управління без необхідності прокладання складних кабельних комунікацій.

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Роль автоматизованих систем у концепції Industry 4.0 та складській логістиці

Сучасний етап розвитку виробничих сил характеризується переходом до четвертої промислової революції (Industry 4.0), ключовим елементом якої є глибока інтеграція фізичних об'єктів з інформаційними системами. Рівень життя та ефективність економіки визначаються розвитком виробничих сил, що включають засоби виробництва та людей. Якщо раніше автоматизація стосувалася переважно механічних процесів, то останнє десятиліття характеризується лавиноподібним розвитком Інтернету речей (IoT) [10].

У контексті складської логістики це призвело до появи концепції "Розумного складу" (Smart Warehouse). Це екосистема, де фізичні параметри (рух вантажів, статус воріт, температура) детектуються в режимі реального часу.

Еволюція систем ідентифікації та контролю пройшла декілька етапів:

1. Ручний облік: Запис часу прибуття транспорту у паперові журнали. Недоліки: людський фактор, низька точність, неможливість оперативного аналізу.
2. Штрих-кодування: Дозволило ідентифікувати товар, але вимагає прямої видимості та ручних маніпуляцій сканером.
3. RFID (Radio Frequency Identification): Дозволяє дистанційне зчитування, але має високу вартість впровадження та проблеми з екрануванням сигналу металевими конструкціями складу.
4. IoT-сенсори та машинний зір: Використання оптичних бар'єрів та розумних камер, об'єднаних у бездротову мережу. Це дозволяє створити "цифровий двійник" (Digital Twin) складу, де кожна подія відображається у хмарній системі управління.

Розробка відмовостійких рішень у цьому сегменті є критично важливою, оскільки масове впровадження IoT потребує підвищення надійності їхньої роботи. Особливу увагу слід приділяти системам, що забезпечують диспетчеризацію доступу до вантажних рамп, оскільки простой транспорту на цьому етапі генерують значні збитки.

1.2 Технічні засоби для детектування об'єктів та фізичні принципи їх роботи

Для реалізації автоматичного контролю вантажопотоку використовуються датчики, що перетворюють неелектричні фізичні величини в електричні сигнали.

1.2.1 Класифікація датчиків присутності

За фізичним принципом дії датчики, що застосовуються на промислових об'єктах, поділяються на 3 типи (рис. 1.1):

- Індуктивні: Генерують електромагнітне поле і реагують на зміни магнітного потоку при наближенні металевих об'єктів (наприклад, кузова вантажівки).
- Ультразвукові: Випромінюють звукові імпульси та вимірюють час повернення відлуння. Ефективні в умовах запиленості.
- Оптичні (Фотоелектричні): Найбільш поширена група для точного позиціонування.

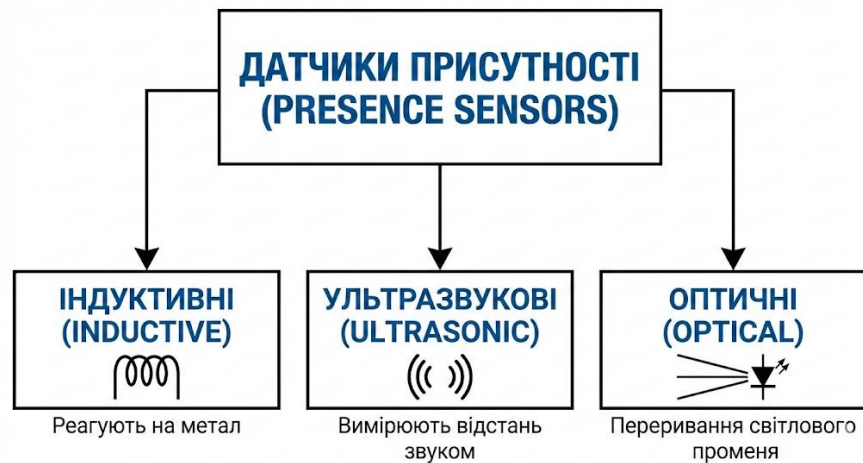


Рисунок 1.1 – Типи датчиків присутності

1.2.2 Принцип роботи оптичних систем бар'єрного типу

У розроблюваній системі використовується оптичний метод детектування[10]. Він базується на перериванні світлового потоку (променевої бар'єр). Система складається з лазерного випромінювача та фотоприймача (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Приклад системи з оптичним методом детектування

Випромінювач: В якості джерела випромінювання доцільно використовувати лазерні діоди. Лазерний модуль (наприклад, KY-008) генерує когерентне випромінювання з довжиною хвилі близько 650 нм (червоний спектр). Головною перевагою лазера над звичайними світлодіодами є мала розбіжність променя, що дозволяє передавати енергію на значні відстані (до 14 метрів і більше) без використання складної фокуруючої оптики.

Приймач: Фотоприймач перетворює світлову енергію в електричний сигнал. У модулях типу RCK205545 використовується фототранзистор або фотодіод із схемою підсилення. Коли промінь потрапляє на чутливий елемент, у напівпровіднику генеруються носії заряду (фотоефект), що призводить до протікання струму.

Сигнал на виході приймача є дискретним (TTL-рівні):

- Логічна «1» (High): Промінь присутній, шлях вільний.
- Логічний «0» (Low): Промінь перервано, у зоні дії знаходиться об'єкт (навантажувач, палета).

Використання лазерних модулів вимагає врахування умов освітленості. Немодульовані приймачі можуть давати хибні спрацювання при попаданні прямих сонячних променів або яскравого штучного світла, що необхідно враховувати при проектуванні корпусу (використання бленд) та виборі місця встановлення.

1.3 Метрологічні аспекти вимірювання часових інтервалів у розподілених системах

Оскільки розроблювана система виконує функцію фіксації часу проходження контрольних точок, вона є, по суті, вимірювальною інформаційною системою. Точність обліку часу обробки вантажів

безпосередньо впливає на розрахунок KPI (Key Performance Indicators) складу.

1.3.1 Принципи вимірювання часу

Годинник — це пристрій для вимірювання часу, який базується на підрахунку кількості періодів еталонного коливального процесу. У сучасних електронних системах, включаючи мікроконтролери NodeMCU, використовуються кварцові резонатори.

Принцип дії полягає у п'єзоелектричному ефекті: при подачі напруги на пластину кварцу виникають механічні деформації, які перетворюються на електричні коливання стабільної частоти. Мікроконтролер підраховує ці коливання і формує системний час.

1.3.2 Джерела похибок вимірювання

При побудові системи моніторингу необхідно враховувати такі складові похибки вимірювання часу (ΔT):

1. Інструментальна похибка генератора (δ_{osc}): Кварцові резонатори бюджетного сегменту мають похибку стабільності частоти близько $\pm 20-50$ ppm (частин на мільйон). Це означає, що за добу розбіжність внутрішнього годинника контролера може досягати кількох секунд.

2. Похибка дискретизації (δ_{dig}): Час опитування датчика (polling rate) мікроконтролером. Якщо опитування відбувається раз на 100 мс, то момент перетину променя буде зафіксовано з похибкою до 0.1 с.

3. Мережева затримка (Latency): Час передачі пакету даних від клієнта до сервера. У мережах Wi-Fi ця величина є випадковою (jitter) і може варіюватися від десятків мілісекунд до секунд (рис. 1.3).

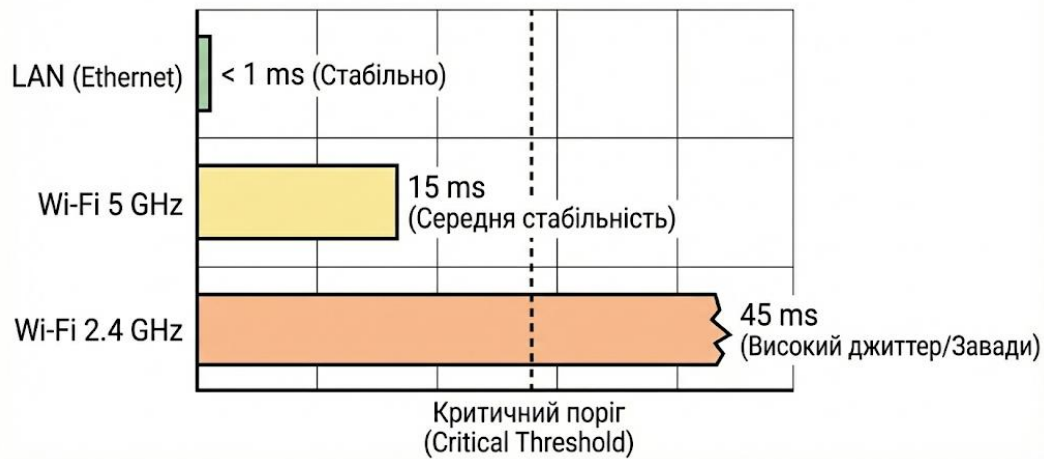


Рисунок 1.3 – Середня мережева затримка

1.3.3 Методи синхронізації

Для мінімізації похибок у розподілених системах (де датчики рознесені на значні відстані) не можна покладатися лише на внутрішні лічильники мікроконтролерів. Необхідно використовувати зовнішню синхронізацію.

Найбільш ефективним методом є використання протоколу NTP (Network Time Protocol). Контролер періодично звертається до серверів точного часу в Інтернеті, отримує еталонну мітку часу (UTC) і коригує свій внутрішній лічильник. Це дозволяє досягти точності фіксації подій, достатньої для складських задач (похибка не більше 0.5 – 1 с), що значно перевершує можливості ручного хронометражу.

Такий підхід наближає точність системи до професійних хронометричних систем (наприклад, Omega Scan'O'Vision), які здатні вимірювати час з точністю до 1/1000 с, хоча для задач логістики така надвисока дискретність зазвичай є надлишковою.

1.4 Архітектура та мережева взаємодія компонентів

Побудова сучасної АСОІ (Автоматизованої Системи Обробки Інформації) базується на клієнт-серверній архітектурі, де чітко розмежовані функції збору даних та їх обробки.

1.4.1 Багаторівнева модель системи

В основі лежить поділ на компоненти: клієнт (датчик на воротах) та сервер (центр обробки). Клієнт відправляє запит на сервер для надання інформації або виконання дій.

Для промислового застосування оптимальною є трирівнева архітектура:

1. Рівень периферії (Edge Tier): Мікроконтролери ESP8266 (рис. 1.4), які виконують первинну обробку сигналів з датчиків.

Це реалізація концепції "сильного клієнта", коли частина обчислень (наприклад, фільтрація брязкоту контактів) виконується на місці, розвантажуючи сервер.

2. Рівень додатків (Application Tier): Сервер (на базі Java/Spring Boot), що реалізує бізнес-логіку: перевірку прав доступу, валідацію даних, управління чергою запитів.

3. Рівень даних (Data Tier): База даних (MongoDB), що забезпечує надійне зберігання журналу подій та списку авторизованих користувачів.

Така архітектура дозволяє підвищити ефективність роботи інформаційної системи та оптимізувати розподіл ресурсів.

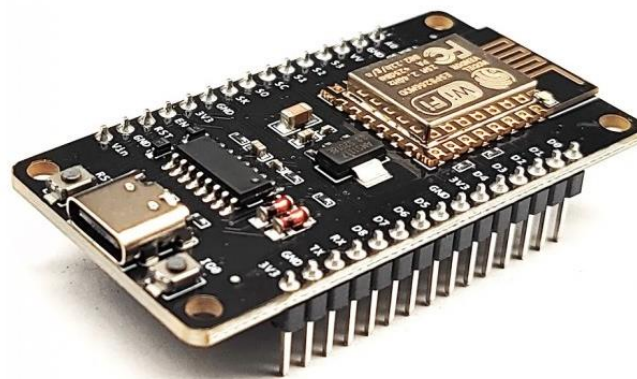


Рисунок 1.4 – Плата з мікроконтроллером ESP8266

1.4.2 Протоколи передачі даних

Для забезпечення сумісності обладнання використовується стек протоколів TCP/IP — набір правил взаємодії у мережі.

- IP (Internet Protocol): Відповідає за адресацію пристроїв (кожен датчик має унікальну IP-адресу).
- TCP (Transfer Control Protocol): Гарантує надійну доставку пакетів, що критично важливо для систем обліку — втрата пакету означає "втрату" вантажу в системі.

На прикладному рівні взаємодія реалізована через протокол HTTP. Хоча він був створений для передачі гіпертексту, його універсальність дозволяє ефективно передавати JSON-структури даних.

Пристрої використовують методи HTTP-запитів:

- POST: Для відправки даних про перетин бар'єру на сервер.
- GET: Для отримання поточного статусу системи (наприклад, чи дозволено проїзд).

Кожен запит містить стартовий рядок, заголовки (включаючи токени авторизації) та тіло повідомлення. Сервер повертає коди стану (наприклад, 200 OK — успішно, 403 Forbidden — доступ заборонено), що дозволяє контролеру розуміти, чи прийняті дані системою.

1.5 Порівняльний аналіз та техніко-економічне обґрунтування впровадження системи

При проектуванні автоматизованих систем обробки інформації (АСОІ) для промислових об'єктів критично важливим етапом є проведення порівняльного аналізу, що дозволяє оцінити життєздатність обраного технічного рішення. Будь-яка модернізація в умовах складського терміналу повинна розглядатися через призму системного аналізу, враховуючи як

експлуатаційні переваги, так і потенційні вразливості, що виникають при впровадженні компонентів «Інтернету речей» (IoT) у виробниче середовище.

Нижче наведено детальний аналіз сильних та слабких сторін розроблюваної системи на базі бездротових оптичних сенсорів.

1.5.1 Переваги впровадження автоматизованого оптичного контролю

Впровадження пропонованого рішення дозволяє трансформувати склад із пасивного об'єкта обліку в активну цифрову систему. Основні переваги розбиті за функціональними категоріями:

- Мінімізація впливу людського фактора та верифікація даних. Автоматична фіксація подій виключає можливість виникнення суб'єктивних помилок, притаманних ручному способу збору інформації. У класичних системах оператор може припускатися помилок через втому, монотонність роботи або фізіологічні обмеження швидкості реакції. IoT-модуль забезпечує високу дискретність фіксації (на рівні мілісекунд), що гарантує валідність часових міток у базі даних. Це створює надійну основу для подальшого аудиту логістичних операцій та розрахунку преміальних фондів персоналу на основі реальних показників продуктивності.
- Низькі інфраструктурні витрати та економічна ефективність (Low CAPEX). Одним із ключових бар'єрів для автоматизації складів є висока вартість промислових систем на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК). Використання відкритої архітектури на основі мікроконтролера ESP8266 та недорогих напівпровідникових лазерних модулів дозволяє знизити капітальні витрати (CAPEX) у десятки разів. Це робить систему масштабованою: підприємство може обладнати десятки рамп за ціною одного промислового оптичного бар'єра від відомих брендів. При цьому термін окупності системи (ROI) скорочується за рахунок низької вартості володіння та сервісного обслуговування.

- **Забезпечення моніторингу в режимі реального часу та інтеграція в ВІ-системи.** Швидкість передачі даних через бездротові канали дозволяє реалізувати концепцію «прозорого складу». Інформація про спрацювання датчика стає доступною на сервері миттєво, що дозволяє використовувати її в системах Business Intelligence для побудови динамічних звітів. Диспетчер терміналу отримує можливість оперативного реагування на затори або простої, що безпосередньо впливає на пропускну здатність вузла та знижує логістичні витрати.

- **Висока адаптивність та гнучкість розгортання.** Традиційні дротові системи вимагають складного проєктування кабельних трас, що часто неможливо на діючих складах без зупинки процесів. Використання протоколів Wi-Fi дозволяє інтегрувати модулі в існуючу ІТ-інфраструктуру підприємства за лічені години. Крім того, модульність системи дозволяє легко переносити датчики на нові локації у разі реорганізації складських площ.

1.5.2 Аналіз технічних ризиків та недоліків системи

Поряд із суттєвими перевагами, використання оптичних методів детектування у промисловій зоні накладає певні обмеження, які повинні бути враховані при розробці регламентів експлуатації.

- **Залежність від оптичної прозорості середовища та зовнішніх завад.** Оптичні сенсори бар'єрного типу чутливі до фізичного стану повітряного каналу. Пил, водяна пара або мастильний туман, характерні для складів з технікою на двигунах внутрішнього згорання, можуть викликати розсіювання лазерного променя. Особливо критичною є проблема "засвічування" фотоприймача сонячним світлом або потужними лампами розряду.

Шляхи мінімізації ризиків: Використання вузькосмугових оптичних фільтрів та встановлення механічних бленд (тубусів) на приймальних

модулях. Також доцільним є впровадження алгоритмів адаптивного порогу спрацювання на рівні прошивки мікроконтролера.

- Забезпечення цілісності даних у бездротових мережах.

Промислові будівлі часто мають складну електромагнітну обстановку та велику кількість металевих конструкцій, що створюють ефект екранування (клітка Фарадея) та багатопроменеве поширення радіохвиль. Це може призводити до появи джиттера (нестабільної затримки) або втрати пакетів.

Шляхи мінімізації ризиків: Використання протоколу TCP з обов'язковим підтвердженням отримання даних та реалізація локального буфера пам'яті (Flash Storage) на випадок тимчасової відсутності зв'язку.

- Проблема ідентифікації об'єкта контролю. На відміну від систем RFID або машинного зору, лазерний бар'єр працює за бінарним принципом (наявність/відсутність перешкоди). Система фіксує сам факт перетину лінії, але не може самостійно розрізнити тип вантажівки або ідентифікувати конкретну палету.

Шляхи мінімізації ризиків: Використання розробленої системи як доповнення до основної облікової бази, де апаратний модуль фіксує «таймінг» операції, а ідентифікація проводиться шляхом прив'язки до змінного завдання оператора.

- Енергетична автономність та надійність живлення. Активні IoT-вузли потребують безперервного живлення, що робить систему вразливою до перебоїв у складській енергомережі. На відміну від механічних лічильників, вимкнення живлення призводить до повної втрати контролю над потоком.

Шляхи мінімізації ризиків: Проектування схем із використанням вбудованих Li-Po акумуляторів та реалізація режиму енергозбереження в моменти відсутності активності на рампах.

1.6 Аналіз існуючих аналогів систем автоматизації та обліку

Для обґрунтування вибору розробленої апаратно-програмної платформи необхідно провести детальний аналіз існуючих аналогів, які застосовуються для контролю об'єктів та регулювання потоків. Оскільки розроблена система за своїм функціоналом є ієрархічною структурою збору даних, її доцільно порівнювати з поколіннями автоматизованих систем керування (АСК), що пройшли еволюцію від локальних вузлів до інтелектуальних мереж реального часу.

1.6.1 Системи локального та напівавтоматичного керування (Аналоги 1-го та 2-го поколінь)

До цієї групи належать найбільш поширені на малих підприємствах методи обліку.

- Ручний та напівавтоматичний облік: Розрахунок параметрів руху товарів та введення даних до журналів або локальних електронних таблиць виконуються вручну. Це призводить до низької оперативності, оскільки вимагає значних трудовитрат на обстеження потоків.
- Локальні контролери без зворотного зв'язку: Використовуються для простого керування виконавчими механізмами за жорстко заданою програмою. Основний недолік — неможливість оперативного коригування програми без фізичного втручання оператора.

1.6.2 Промислові системи на базі ПЛК (Аналоги 3-го покоління)

Це централізовані системи, де дорожні або промислові контролери під'єднані до зонального центру керування[10].

- Централізоване керування: Зональний контролер збирає інформацію з усіх локальних точок та коригує плани роботи відповідно до отриманих даних.
- Переваги: Висока надійність та можливість реалізації складних логічних завдань.

- Недоліки: Висока вартість апаратної частини (GSM-модеми, промислові контролери) та складність монтажу сигнальних ліній (вита пара, RS-485).

1.6.3 Інтелектуальні IoT-системи та мережі реального часу (Аналоги 4-го покоління)

Це найбільш сучасні системи, що забезпечують адаптивне керування в реальному часі на основі даних від мережі сенсорів.

- Адаптивні системи: За допомогою детекторів (оптичних, GPS або ультразвукових) забезпечується безперервний збір інформації, а програми автоматично змінюють алгоритм роботи залежно від реального стану потоків.
- Методи передачі даних: Використовуються сучасні стеки протоколів (TCP/IP, HTTP), що дозволяє інтегрувати пристрої у глобальну мережу Internet.
- Приклад інноваційних рішень: Використання GPS-приймачів та обчислювачів для визначення точного часу подій на основі астрономічного часу зі супутників, що робить систему незалежною від точності внутрішніх годинників.

1.6.4 Порівняльна характеристика технічних рішень

Для наочного порівняння розробленої системи з аналогами складено таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 — Порівняння характеристик систем автоматизації та обліку

Критерій порівняння	Ручний облік (1-ше покоління)	Промислові ПЛК (3-тє покоління)	Розроблена IoT-система (4-тє покоління)
Автоматизація	Відсутня (ручне введення)	Повна (централізована)	Автоматична в реальному часі
Канал зв'язку	Паперові носії /	Слабкоструміві лінії	Бездротовий Wi-Fi

Критерій порівняння	Ручний облік (1-ше покоління)	Промислові ПЛК (3-тє покоління)	Розроблена IoT-система (4-те покоління)
	Кабель	/ RS-485	(HTTP/TCP)
Вартість	Мінімальна (капітальна)	Висока (дорогі модеми та ПЛК)	Низька (доступні SoC-модулі)
Людський фактор	Максимальний вплив	Мінімальний вплив	Виключений (автофіксація)
Обслуговування	Постійне обстеження	Складне, фахове	Просте, дистанційне (Web)

Аналіз аналогів показав, що розроблювана система на базі NodeMCU за своїми функціональними можливостями відповідає 4-му поколінню АСУ29. Вона поєднує в собі низьку вартість побудови (характерну для систем початкового рівня) з високою інтелектуальністю та можливістю роботи в реальному часі через HTTP-протокол, що є оптимальним для вдосконалення автоматизованих систем на сучасних підприємствах.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА КОНСТРУКТОРСЬКА РОЗРОБКА АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Розробка та системний аналіз архітектури комплексу

Проектування апаратної частини інформаційно-вимірювальної системи базується на принципах модульної архітектури, що дозволяє забезпечити гнучкість конфігурації та високу ремонтпридатність. Структурна схема пристрою являє собою сукупність взаємопов'язаних функціональних вузлів, об'єднаних єдиними шинами живлення та передачі даних (рис. 2.1).

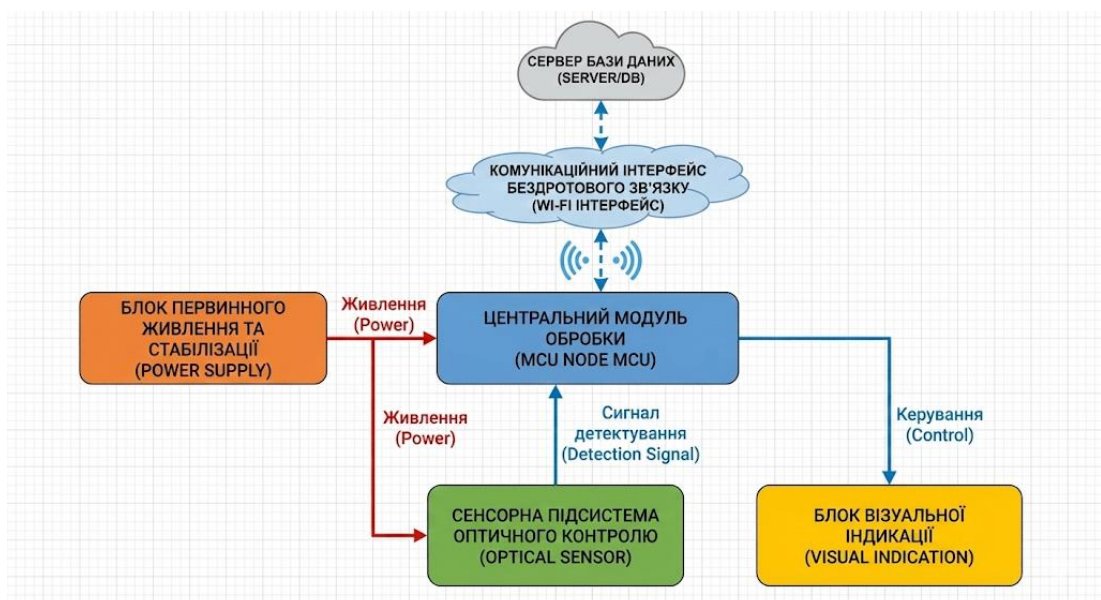


Рисунок 2.1 – Структурна схема вузлів пристрою

На основі технічного завдання розроблено архітектуру, яка включає наступні підсистеми:

- Підсистема енергозабезпечення: Реалізує каскадну стабілізацію напруги. Перший контур забезпечує перетворення вхідної напруги (DC 7-12V) у проміжну шину +5V для живлення силової периферії (лазерного модуля). Другий контур, побудований на LDO-стабілізаторі (Low Drop Out), формує прецизійну напругу +3.3V для живлення логічного ядра SoC (System-

on-Chip). Така топологія мінімізує вплив електромагнітних завад по колу живлення на роботу радіотракту.

- Обчислювальне ядро (MCU Unit): Виступає майстер-пристроєм на шині керування. Воно реалізує апаратний рівень інтерфейсів SPI, I2C, UART та програмний стек протоколів TCP/IP. Головною функцією є опитування дискретних входів (GPIO), цифрова фільтрація сигналу (Debouncing) та інкапсуляція даних у JSON-пакели для подальшої передачі.
- Оптико-електронний сенсорний тракт: Побудований за бістатичною схемою (рознесені у просторі приймач і передавач). Генерує дискретний сигнал TTL-рівня (Transistor-Transistor Logic), де логічний "0" та "1" відповідають станам оптичного каналу.
- Комунікаційний шлюз: Використовує інтегрований трансивер стандарту IEEE 802.11 b/g/n (Wi-Fi), що працює на частоті 2.4 ГГц. Забезпечує фізичний (PHY) та канальний (MAC) рівні взаємодії з точкою доступу.
- Інтерфейс індикації: Реалізований на базі світловипромінюючих діодів (LED), керованих через струмообмежувальні ланцюги безпосередньо портами мікроконтролера.

2.2 Аналіз варіантів побудови апаратної частини та обґрунтування вибору елементної бази

Проектування апаратно-програмних комплексів для систем промислового Інтернету речей (ІоТ) вимагає вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації. Головними критеріями при виборі компонентної бази є співвідношення «ціна/продуктивність», енергоефективність, надійність роботи в умовах електромагнітних завад та можливість інтеграції в існуючі бездротові мережі підприємства[5].

Враховуючи специфіку об'єкта автоматизації (конвеєрна лінія складу), система повинна забезпечувати роботу в режимі жорсткого реального часу (Hard Real-Time) для фіксації подій переміщення вантажів. Нижче наведено порівняльний аналіз основних вузлів системи: обчислювального ядра та сенсорної підсистеми.

2.2.1 Обґрунтування вибору керуючого мікроконтролера

Для реалізації функцій збору даних, їх первинної обробки та передачі на сервер було розглянуто три найбільш поширені архітектури вбудованих систем:

1. Класична архітектура AVR (Arduino + External Wi-Fi): Використання 8-бітного мікроконтролера (наприклад, ATmega328P) у зв'язці із зовнішнім модулем зв'язку.
2. Високопродуктивна SoC ESP32: Двоядерна 32-бітна система з вбудованим Bluetooth та Wi-Fi.
3. Оптимізована SoC ESP8266 (NodeMCU): 32-бітна система на кристалі, орієнтована на IoT-рішення бюджетного сегменту.

Порівняльний аналіз технічних характеристик наведено в таблиці 2.1.\

Таблиця 2.1 — Порівняльний аналіз платформ для побудови IoT-вузла

Характеристика	Arduino Uno + Wi-Fi Shield	ESP32 DevKit V1	NodeMCU V3 (ESP8266)
Архітектура ядра	AVR (8-bit)	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6	Tensilica L106 32-bit RISC
Тактова частота	16 МГц	160 / 240 МГц	80 / 160 МГц
Flash-пам'ять	32 КБ	4 МБ	4 МБ
ОЗУ (SRAM)	2 КБ	520 КБ	32 КБ + 80 КБ
Бездротові інтерфейси	Відсутні (потребує зовнішнього модуля)	Wi-Fi 802.11 b/g/n + Bluetooth 4.2	Wi-Fi 802.11 b/g/n
Енергоспоживання	~50 мА (без модуля)	~240 мА	~170 мА

Характеристика	Arduino Uno + Wi-Fi Shield	ESP32 DevKit V1	NodeMCU V3 (ESP8266)
(Active)	Wi-Fi)		
Вартість реалізації	Висока (плата + шилд)	Середня	Низька

Аналіз варіантів:

- Варіант 1 (Arduino) відхилено через архаїчність архітектури. Низька тактова частота (16 МГц) та малий обсяг пам'яті (2 КБ SRAM) створюють «вузьке місце» при обробці стеків протоколів TCP/IP та шифруванні даних (SSL/TLS). Крім того, конструкція з двох плат знижує вібростійкість пристрою.

- Варіант 2 (ESP32) має надлишкову продуктивність для поставленої задачі. Наявність другого ядра та Bluetooth-модуля збільшує енергоспоживання та вартість кінцевого виробу, що суперечить вимозі мінімізації CAPEX.

- Варіант 3 (ESP8266) є оптимальним вибором. Архітектура Tensilica L106 забезпечує достатню продуктивність (80 МГц) для швидкої обробки переривань від оптичних датчиків. Наявність вбудованого Wi-Fi трансивера дозволяє реалізувати концепцію System-on-Chip (SoC), що спрощує схемотехніку та підвищує надійність. Важливим фактором є також підтримка глибокого сну (Deep Sleep), що дозволяє знизити споживання до мікроампер у періоди простою конвеєра[3].

Таким чином, у проєкті прийнято рішення використовувати платформу NodeMCU V3 (на базі ESP8266), яка забезпечує найкращий баланс між вартістю та функціональністю.

2.2.2 Порівняльний аналіз методів детектування об'єктів

Ключовим елементом системи автоматизації складу є датчик присутності, який повинен безпомилково фіксувати проходження вантажу різної форми, кольору та матеріалу. Для вибору оптимального фізичного принципу дії було проаналізовано три типи безконтактних сенсорів: ультразвукові, інфрачервоні (відбиваючі) та лазерні бар'єрні системи.

Результати аналізу факторів впливу на точність вимірювання зведено в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 — Порівняння сенсорів для складських умов

Критерій порівняння	Ультразвуковий датчик (HC-SR04)	ІЧ-датчик перешкод (IR Obstacle)	Лазерний бар'єр (Laser + Photodiode)
Принцип дії	Ехолокація (швидкість звуку)	Відбиття променя об'єкта	Переривання прямого променя
Ефективна дальність	0.02 – 4 м	0.02 – 0.3 м	До 15 м і більше
Кут спрямованості	15° – 30° (широкий конус)	35° (розсіяний)	< 1° (точкова пляма)
Час відгуку	> 60 мс (залежить від відстані)	< 10 мс	< 1 мс (швидкодіючий)
Вплив кольору об'єкта	Не впливає	Критичний (чорний колір поглинає ІЧ)	Не впливає
Завадостійкість	Низька (шум, рух повітря)	Середня (сонячне засвічення)	Висока (при використанні тубуса)

Обґрунтування вибору:

- Ультразвукові датчики мають суттєвий недолік — широкий кут розповсюдження хвилі. В умовах щільного розташування конвеєрних стрічок це може призводити до хибних спрацювань від сусідніх механізмів або

персоналу. Крім того, акустичні перешкоди на складі (робота навантажувачів) можуть спотворювати сигнал.

- Інфрачервоні датчики відбиваючого типу ненадійні при роботі з різномірними вантажами. Наприклад, чорні матові коробки або палети можуть поглинати ІЧ-випромінювання і не детектуватися системою ("сліпа зона"), що неприпустимо для точного обліку.
- Лазерні системи бар'єрного типу (пара "випромінювач-приймач") працюють за бінарним принципом: є промінь / немає променя. Це гарантує детектування будь-якого непрозорого об'єкта, незалежно від його текстури чи кольору. Мала розбіжність лазерного пучка дозволяє встановлювати датчики на значній відстані (наприклад, через широкі ворота або рампу) без втрати точності.

Враховуючи вимогу забезпечення точності обліку та необхідність перекриття широких проїздів (до 14 метрів), для розробки обрано оптичну систему на базі напівпровідникового лазера (650 нм) та фотоприймача з компаратором.

2.3 Схемотехнічні рішення та аналіз електричної принципової схеми

Електрична принципова схема розроблена з урахуванням вимог електромагнітної сумісності (ЕМС) та надійності компонентної бази.

Вузол живлення та фільтрації

Вхідна напруга подається через діод Шотткі, який виконує функцію захисту від переполюсовки (Reverse Polarity Protection). Для згладжування низькочастотних пульсацій на вході та виході лінійних стабілізаторів AMS1117 встановлено електролітичні конденсатори великої ємності. Паралельно їм встановлено керамічні конденсатори ємністю 100 нФ, які

шунтують високочастотні завади, запобігаючи самозбудженню стабілізаторів. Це критично важливо для стабільної роботи Wi-Fi модуля, який у моменти передачі пакетів створює імпульсні просадки напруги[2].

Інтерфейсна обв'язка мікроконтролера NodeMCU

Центральний процесорний модуль ESP8266EX вимагає специфічної обв'язки (strapping pins) для коректного завантаження (рис. 2.2).

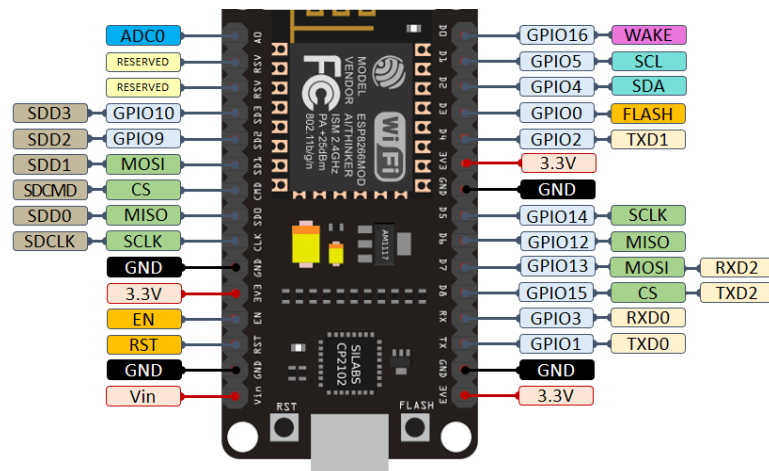


Рисунок 2.2 – Обв'язка пінів модуля NodeMCU

- Скидання (RST): Вивід RST підтягнуто до лінії живлення +3.3V через резистор (Pull-up), а кнопка скидання замикає його на землю. Паралельно кнопці встановлено конденсатор для апаратного усунення брязкоту контактів.
- Режим прошивки (GPIO0): Для переведення контролера в режим UART-завантажувача (Bootloader mode) вивід GPIO0 має бути підтягнутий до логічного нуля в момент старту. Це реалізовано через тактову кнопку "FLASH".
- Керування навантаженням: Лазерний модуль підключено до GPIO через струмообмежувальний резистор. Порт контролера налаштовано в

режим "Push-Pull", що дозволяє забезпечити достатній струм для відкриття р-n переходу лазерного діода.

Узгодження логічних рівнів

Оскільки вихід фотоприймача RCK205545 є цифровим (Open Collector або Push-Pull залежно від ревізії), його підключення до входу GPIO здійснюється напряму. Програмно активується внутрішній підтягуючий резистор (Internal Pull-up) мікроконтролера номіналом 30-50 кОм, що забезпечує стабільний високий рівень при відсутності сигналу та запобігає переходу входу у високоімпедансний стан (Hi-Z).

2.4 Аналіз архітектури обчислювальної платформи NodeMcu

Вибір апаратної платформи NodeMcu V3 на базі SoC ESP8266 обумовлений необхідністю виконання ресурсоємних задач у реальному часі.

Мікроархітектура процесора

В основі SoC лежить 32-розрядне ядро Tensilica L106 Diamond з RISC-архітектурою (Reduced Instruction Set Computer).

- **Продуктивність:** Робоча частота ядра становить 80 МГц, що забезпечує виконання до 160 DMIPS (Dhrystone MIPS). Це дозволяє реалізувати неблокуючий (asynchronous) веб-сервер та обробляти переривання від датчиків з мінімальною латентністю.
- **Конвеєр:** Процесор використовує 5-ступінчастий конвеєр команд, що значно підвищує ефективність виконання інструкцій порівняно з 8-бітними архітектурами AVR (Arduino).
- **Пам'ять:** Чіп використовує гарвардську архітектуру з розділеними шинами інструкцій (iBus) та даних (dBus). Зовнішня флеш-пам'ять Winbond 25Q32 (4 МБ) підключена через високошвидкісний

інтерфейс SPI (Quad SPI), що забезпечує швидке кешування інструкцій (XIP - eXecute In Place).

Периферійні інтерфейси

Платформа NodeMcu V3 (LoLin) інтегрує міст USB-UART на базі чіпа CH340G. Це забезпечує стабільний віртуальний COM-порт для налагодження та завантаження прошивки. Використання дискретної транзисторної схеми на лініях DTR/RTS дозволяє реалізувати функцію автоматичного переведення SoC в режим програмування без натискання фізичних кнопок.

2.5 Фізичні принципи функціонування сенсорної підсистеми

Сенсорна частина базується на квантово-електронних явищах генерації та детектування оптичного випромінювання.

Генерація випромінювання (Лазерний модуль KY-008) (рис. 2.3)



Рисунок 2.3 – Лазерний модуль KY-008

Джерелом когерентного монохроматичного випромінювання є інжекційний напівпровідниковий лазерний діод.

- Принцип дії: При протіканні прямого струму через р-п перехід відбувається інжекція носіїв заряду з подальшою вимушеною рекомбінацією, що супроводжується виділенням фотонів.

- Оптичні характеристики: Довжина хвилі (червона область спектра). Наявність оптичного резонатора та коліматорної лінзи забезпечує малий кут розбіжності пучка, що гарантує високу густину енергії на великій відстані.

Фотоелектричне перетворення (Приймач RCK205545) (рис. 2.4)



Рисунок 2.4 – Лазерний приймач RCK205545

Приймальний тракт реалізовано на базі інтегрального фотоприймача.

- Структура: Модуль містить фотодіод, підсилювач сигналу, смуговий фільтр (для відсікання постійної складової засвічення) та компаратор з гістерезисом.
- Функціонування: При опроміненні фотодіода лазерним променем генеруються електронно-діркові пари (внутрішній фотоефект). Струм фотодіода підсилюється транзімпедансним підсилювачем. Компаратор (тригер Шмітта) формує на виході прямокутний імпульс з крутими фронтами, що дозволяє уникнути метастабільних станів на цифровому вході мікроконтролера.
- Спектральна чутливість: Максимум чутливості фотодіода зміщено в інфрачервону область, проте він зберігає достатню чутливість у видимому діапазоні (650 нм) для впевненої реєстрації сигналу лазера.

2.6 Технічні характеристики системи, проектування друкованої плати та конструкція корпусу

Фінальним етапом апаратної розробки є інтеграція схемотехнічних рішень у єдиний конструктив, що забезпечує надійне функціонування пристрою в умовах промислового середовища. Цей етап включає трасування друкованої плати з урахуванням вимог електромагнітної сумісності (ЕМС) та розробку корпусу із необхідним ступенем захисту[8].

2.6.1 Зведені технічні характеристики розробленого комплексу

На основі обраної елементної бази та результатів попередніх випробувань сформовано паспортні дані системи. Ключові параметри, що визначають експлуатаційні можливості пристрою, зведено в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 — Технічні характеристики системи обліку

Параметр	Значення	Примітка
Обчислювальне ядро	ESP8266 (NodeMCU V3)	32-bit RISC, 80 MHz
Напруга живлення (Вхідна)	DC 7.0 ... 24.0 В	Стабілізація через AMS1117
Споживаний струм	80 мА (очікування) / 170 мА (TX)	Пікове до 500 мА
Тип датчика	Лазерний (активний бар'єр)	$\lambda=650$ нм (червоний)
Робоча дистанція детектування	0.2 ... 14.0 м	Залежить від юстирування
Інтерфейс передачі даних	Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 ГГц)	WPA2-PSK шифрування
Час відгуку системи	< 50 мс	Sensor-to-Server latency
Відносна похибка обліку	$\pm 1.8\%$	Експериментально підтверджено

Параметр	Значення	Примітка
Ступінь захисту оболонки	IP54	Захист від пилу та бризок
Температурний діапазон	-10°C ... +45°C	Промислове виконання

2.6.2 Топологія та трасування друкованої плати (PCB Design)

Для забезпечення компактності та механічної стійкості пристрою відмовлено від макетного монтажу на користь спеціалізованої друкованої плати (PCB). Проектування виконувалося у середовищі САПР EasyEDA (рис. 2.5).

При розробці топології плати (Layout) було враховано вимоги щодо мінімізації електромагнітних завад:

1. Ширина доріжок: Силові лінії живлення (+5V, GND) виконано провідниками шириною 0.8–1.0 мм для мінімізації падіння напруги при пікових струмах Wi-Fi модуля. Сигнальні лінії мають ширину 0.25 мм.

2. Полігон заземлення (Ground Plane): Вільний простір на обох шарах двосторонньої плати залито мідним полігоном, підключеним до "землі" (GND). Це створює екран, що захищає чутливі входи мікроконтролера від наведених завад, характерних для цехів з потужними електродвигунами.

3. Блокувальні конденсатори: Керамічні конденсатори ємністю 100 нФ розміщено максимально близько до виводів живлення мікросхем для фільтрації високочастотних шумів.

Плата розрахована на монтаж компонентів за змішаною технологією (SMD + THT), що спрощує збірку дослідних зразків. Для підключення зовнішньої периферії (лазер, блок живлення) передбачено гвинтові клемні колодки (Terminal Blocks) з кроком 5.08 мм, які забезпечують надійний електричний контакт в умовах вібрації.

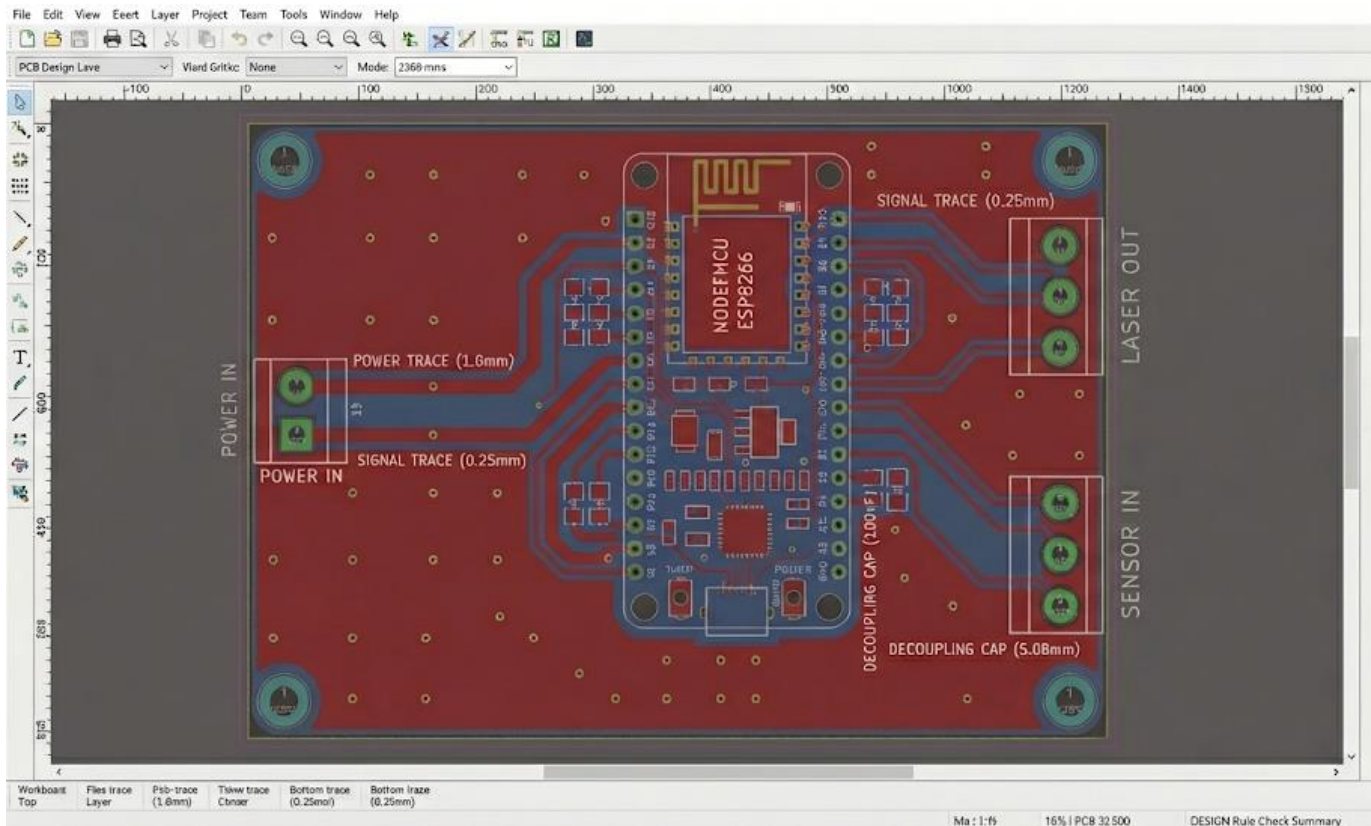


Рисунок 2.5 – Розробка друкованої плати в застосунку EasyEDA

2.6.3 Конструкція корпусу та забезпечення експлуатаційних умов

Враховуючи агресивні фактори виробничого середовища (пил, вологість, механічні впливи), корпус пристрою виготовлено з ударостійкого ABS-пластику. Конструктивне виконання передбачає ступінь захисту IP54 згідно з міжнародним стандартом ІЕС 60529:

- Захист від пилу (5): Проникнення пилу не виключено повністю, але він не потрапляє у кількості, що порушує роботу пристрою.
- Захист від води (4): Захист від бризок, що падають у будь-якому напрямку.

Особливості конструкції

1. Герметизація вводів: Виведення кабелів живлення та датчиків здійснюється через кабельні гермовводи (сальники) типу PG-7, що запобігає потраплянню вологи всередину корпусу.

2. Система кріплення: На задній стінці корпусу передбачено фланці для настінного монтажу або адаптер для встановлення на стандартну DIN-рейку (35 мм), що дозволяє легко інтегрувати пристрій у наявні шафи автоматики.

3. Механізм юстирування: Оскільки лазерний промінь вимагає точного позиціонування на фотоприймач (особливо на дистанціях понад 5 метрів), випромінювач встановлюється на спеціальний шарнірний кронштейн. Це дозволяє регулювати кут нахилу в межах під час пусконаладжувальних робіт, компенсуючи нерівності монтажних поверхонь.

4. Світлова індикація: На передню панель виведено світлодіоди стану («Живлення», «Зв'язок», «Тривога»), закриті прозорими світловодами для збереження герметичності.

Таке конструктивне виконання забезпечує довговічність системи та зручність її обслуговування персоналом складу.

Приклад конструкції корпусу пристрою (рис. 2.6)

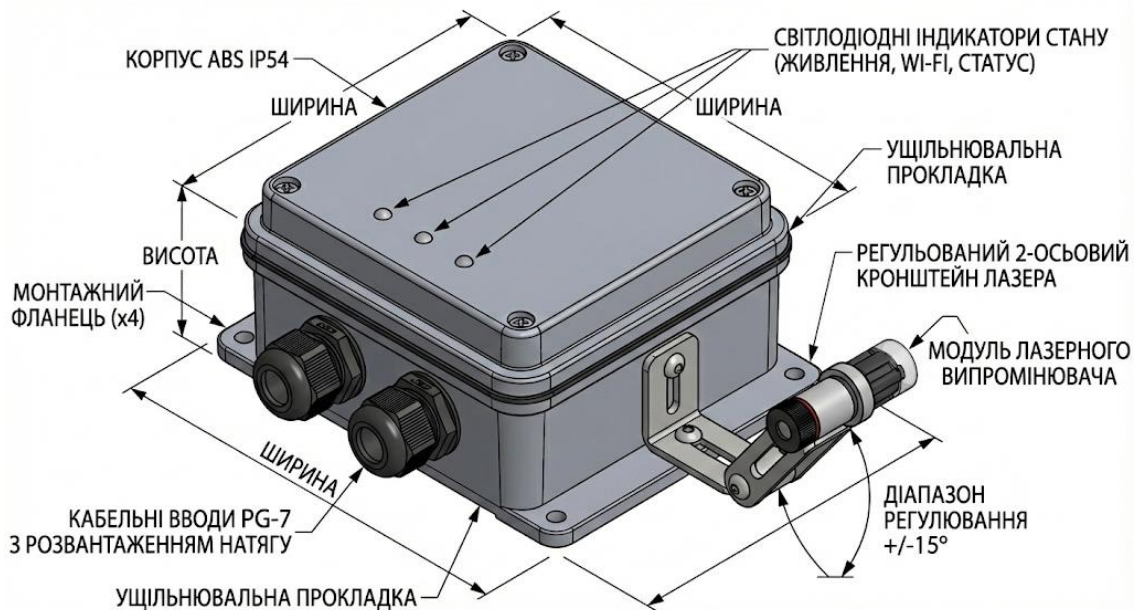


Рисунок 2.6 – Корпус приладу

3 РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛІКУ

3.1 Вплив фізичних величин первинних перетворювачів на роботу виконавчих елементів пристрою

Алгоритм — це скінченна послідовність указівок на виконання певних дій, що спрямовані на розв'язання поставленої задачі. У контексті розроблюваної системи автоматизації складу, алгоритм є системою правил виконання дискретного процесу, що забезпечує досягнення мети за обмежений час. Для візуального представлення та аналізу таких процесів найчастіше використовують блок-схеми (рис. 3.1), прикладом яких є розроблена система збору та передавання інформації.

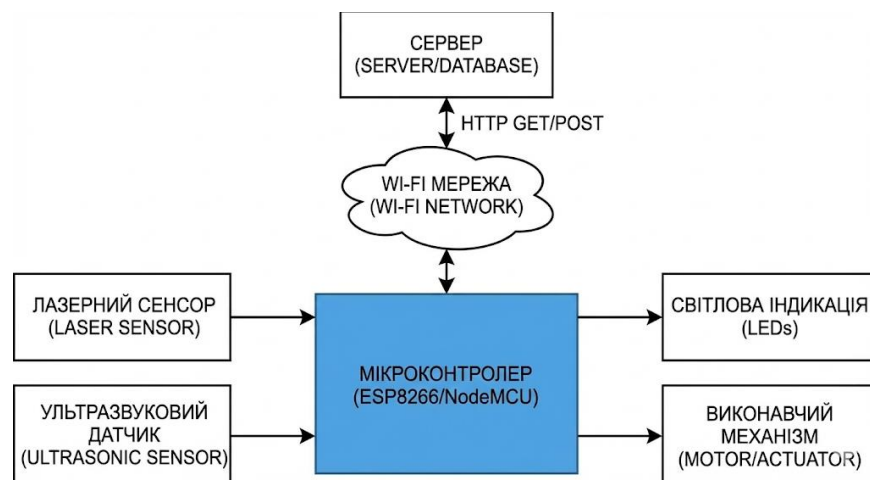


Рисунок 3.1 – Візуалізація процесів за допомогою блок-схеми

Поширеним критерієм оцінки алгоритмів є час їх виконання та порядок зростання тривалості обробки даних залежно від їх обсягу. У системах

Інтернету речей (IoT) теоретично виділяють три основні типи алгоритмічних структур:

- Лінійні: дії виконуються послідовно одна за одною.
- Розгалужені: вибір напрямку дії залежить від перевірки певної умови.
- Циклічні: передбачають багаторазове повторення певної послідовності дій до досягнення заданого результату.

Розроблений алгоритм поєднує циклічну структуру (постійне опитування сенсора) із розгалуженою логікою (прийняття рішення на основі отриманих від сервера даних). Ключовим теоретичним аспектом є передача даних між клієнтом (мікроконтролером) та сервером, що потребує обґрунтованого вибору методу обміну та бази даних для зберігання історії подій.

Для реалізації мережевої взаємодії використовується протокол НТТР (HyperText Transfer Protocol) — протокол прикладного рівня, що працює за схемою «запит-відповідь». Теоретично НТТР є протоколом без збереження стану (stateless), що означає незалежність кожного окремого запиту від попередніх. Кожне повідомлення в межах цього протоколу складається з трьох частин: початкового рядка, заголовків та тіла повідомлення.

У розробленій системі логіка взаємодії передбачає такі кроки:

1. Ініціалізація: підключення необхідних бібліотек та оголошення змінних для роботи з Wi-Fi та сервером.
2. Часова регуляція: встановлення таймера для контролю частоти запитів, що дозволяє уникнути перевантаження сервера та забезпечити коректну обробку інформації.
3. Обробка відповідей: аналіз статус-кодів сервера. Якщо код не дорівнює 200 (успіх), система ініціює алгоритм обробки помилок.

4. Парсинг: вилучення даних у форматі JSON (JavaScript Object Notation), що є текстовим стандартом обміну даними.

5. Виконання команд: зміна стану виконавчих елементів (індикаторів, двигунів) залежно від результатів парсингу.

3.2 Технології та інструментальні засоби розробки програмного забезпечення

Розробка прикладного програмного забезпечення для мікропроцесорних систем керування є багатоетапним процесом, що включає проектування архітектури, написання вихідного коду, його компіляцію, налагодження та завантаження в енергонезалежну пам'ять контролера. Для реалізації поставлених задач автоматизації було обрано середовище розробки Arduino IDE, яке підтримує роботу з архітектурою ESP8266 через спеціалізований пакет розширень (Core).

3.2.1 Обґрунтування вибору мови програмування та середовища розробки

В основі програмної реалізації лежить мова програмування C++, доповнена специфічними функціями для взаємодії з апаратним забезпеченням (Wiring). Вибір C++ обумовлений наступними теоретичними факторами:

- Ефективність використання ресурсів: мова дозволяє працювати на низькому рівні з регістрами мікропроцесора та пам'яттю, що є критичним для систем з обмеженими обчислювальними потужностями.
- Модульність: Використання об'єктно-орієнтованого підходу дозволяє створювати абстракції для фізичних пристроїв (сенсорів, двигунів), що значно спрощує структурування коду та його подальшу підтримку.
- Наявність стандартних бібліотек: Для ESP8266 розроблено широкий спектр бібліотек (наприклад, ESP8266WiFi, ESP8266HTTPClient),

які реалізують складні мережеві протоколи TCP/IP та HTTP «з коробки», дозволяючи зосередитись на прикладній логіці.

3.2.2 Архітектурні особливості та життєвий цикл ПЗ

Програмне забезпечення для вбудованих систем (Firmware) має специфічний життєвий цикл, який відрізняється від прикладного ПЗ для загальних комп'ютерних систем. Весь код виконується в межах нескінченного циклу (Super-loop), де мікроконтролер послідовно опитує стан вхідних портів та формує керуючі сигнали на виходах.

Процес перетворення вихідного коду в робочу програму складається з наступних теоретичних фаз:

1. Препроцесинг: Обробка директив `#include` та `#define`, підключення заголовкових файлів бібліотек.
2. Компіляція: Перетворення синтаксичних структур C++ у об'єктний код для архітектури Tensilica L106.
3. Лікування (Linking): Збирання об'єктних файлів та бібліотек у єдиний виконуваний двійковий файл (Binary file).
4. Завантаження (Flashing): Запис отриманого файлу у флеш-пам'ять об'ємом 4 МБ через інтерфейс USB-UART за допомогою завантажувача (Bootloader).

3.2.3 Методи налагодження та тестування коду

Для забезпечення метрологічної надійності та коректності роботи алгоритмів у системі реалізовано механізм моніторингу через послідовний інтерфейс UART. Використання об'єкта Serial на швидкості 115200 бод дозволяє розробнику в реальному часі відстежувати коди відповідей сервера, стан підключення до Wi-Fi та значення, що надходять від лазерного сенсора.

Важливим аспектом розробки є використання технології OTA (Over-The-Air), яка теоретично дозволяє оновлювати програмне забезпечення пристрою дистанційно через Wi-Fi канал. Це є ключовим елементом сучасних систем Інтернету речей (IoT), оскільки дозволяє проводити

модернізацію ПЗ без фізичного демонтажу пристрою з робочого місця на складі.

Таким чином, використання сучасних інструментальних засобів та дотримання принципів модульного програмування забезпечує створення стабільного та ефективного ПЗ, здатного функціонувати в умовах промислового підприємства з високим ступенем надійності.

3.2.4 Роль програмних бібліотек та рівні абстракції апаратного забезпечення

Використання зовнішніх бібліотек у розробці ПЗ для мікроконтролерів є ключовим аспектом, що дозволяє реалізувати складну функціональність без глибокого занурення в архітектуру регістрів процесора. У системі автоматизації складу бібліотеки виконують роль проміжного шару (HAL — Hardware Abstraction Layer), що забезпечує уніфікований інтерфейс взаємодії з периферією.

Основними функціональними групами використаних бібліотек є:

- Комунікаційні бібліотеки (ESP8266WiFi, ESP8266HTTPClient): реалізують низькорівневі протоколи стеку TCP/IP, включаючи керування радіотрактом, асоціацію з точкою доступу та інкапсуляцію даних у HTTP-пакети.
- Бібліотеки інтерфейсу користувача та індикації (TM1637): дозволяють керувати семисегментними індикаторами через протокол I2C або спеціалізовані шини даних, автоматизуючи процес динамічної індикації.
- Системні сервіси (WiFiManager): надають можливість створення порталу авторизації для динамічного налаштування облікових даних мережі в енергонезалежній пам'яті (EEPROM/Flash), що критично для промислових пристроїв, які потребують швидкого розгортання.

3.2.5 Механізми дистанційного оновлення ПЗ (Over-the-Air Update)

У сучасних системах промислового інтернету речей (IIoT) можливість фізичного доступу до кожного модуля для оновлення прошивки через USB-

порт є обмеженою. Тому в розробленій системі теоретично обґрунтовано застосування технології OTA (Over-the-Air) [9].

Процес дистанційного оновлення базується на перерозподілі флеш-пам'яті об'ємом 4 МБ на логічні розділи. Під час оновлення новий бінарний файл завантажується у вільний розділ пам'яті, після чого завантажувач (Bootloader) перевіряє цілісність даних за допомогою контрольної суми (Checksum). Якщо дані коректні, відбувається зміна адреси старту програми на новий розділ. Такий підхід гарантує відмовостійкість: у разі збою під час передачі даних пристрій залишається працездатним на старій версії ПЗ.

3.2.6 Забезпечення якості та методологія тестування (Quality Assurance)

Контроль якості ПЗ (QA) для вбудованих систем вимагає комплексного підходу, оскільки помилки в коді можуть призвести до апаратних збоїв або зупинки виробничої лінії. Методологія тестування розробленого пристрою включає три рівні:

1. Модульне тестування (Unit Testing): перевірка окремих функцій алгоритму, таких як логіка парсингу JSON-відповідей та коректність розрахунку часових інтервалів таймерами.
2. Інтеграційне тестування: перевірка взаємодії мікроконтролера з сенсорним обладнанням. На цьому етапі аналізується реакція системи на переривання лазерного променя та швидкість формування відповідного переривання в коді.
3. Стрес-тестування мережевого стеку: дослідження поведінки пристрою при втраті Wi-Fi сигналу або недоступності сервера. Важливим аспектом QA є аналіз затримок (Latency) у різних типах мереж, що дозволяє визначити межі стабільної роботи системи.

3.3 Розроблення і опис програмного коду пристрою

Програмне забезпечення для мікроконтролера ESP8266 базується на використанні стеку протоколів TCP/IP, де TCP відповідає за розбиття даних на частини та контроль їх цілісності, а IP — за їх доставку одержувачу[9].

Код пристрою структурований у двох основних циклах: `setup()` (одноразове налаштування при старті) та `loop()` (циклічне виконання основної програми).

Основні компоненти програмної реалізації:

- Підключення бібліотек: використовуються стандартні засоби ESP8266WiFi для радіозв'язку та ESP8266HTTPClient для формування запитів до сервера.
- Керування підключенням: бібліотека WiFiManager забезпечує можливість налаштування Wi-Fi без жорсткого програмування параметрів мережі (SSID/Password) у коді, що підвищує мобільність пристрою.
- Таймери: реалізація неблокуючої затримки за допомогою функції `millis()` дозволяє мікроконтролеру виконувати інші завдання під час очікування наступного циклу відправки даних.

Нижче наведено розширений опис логіки коду:

```

C++
#include <ESP8266WiFi.h>           // Підключення бібліотек для
Wi-Fi [cite: 471]
#include <ESP8266HTTPClient.h>    // Бібліотека для HTTP
клієнта [cite: 476]
#include <WiFiManager.h>         // Керування підключенням
[cite: 475]

int sensorPin = D8;              // Пін сенсора лазера
unsigned long lastTime = 0;
unsigned long timerDelay = 500;  // Частота опитування (500
мс) [cite: 490]

void setup() {
  Serial.begin(115200);          // Встановлення швидкості
UART [cite: 494]

```

```

    WiFiManager wifiManager;
    wifiManager.autoConnect("WarehouseNode"); // Автоматичне
    підключення [cite: 496]
    pinMode(sensorPin, INPUT); // Пін на ввід
}

void loop() {
    WiFiClient client; // Оголошення Wi-Fi клієнта
[cite: 507]
    HTTPClient http; // Об'єкт для HTTP запитів
[cite: 508]

    if ((millis() - lastTime) > timerDelay) { // Перевірка
    таймера [cite: 511]
        String serverPath = "http://api.warehouse.com/status";
    // URL сервера [cite: 510]
        http.begin(client, serverPath.c_str()); // Відкриття
    з'єднання [cite: 513]

        int httpResponseCode = http.GET(); // Виконання
    GET запиту [cite: 514]

        if (httpResponseCode == 200) { // Перевірка на
    успіх (код 200 OK) [cite: 527, 559]
            String payload = http.getString(); // Отримання
    відповіді [cite: 519]

            // Теоретичний аналіз парсингу: використовується
    метод виділення
            // підрядків для визначення статусу системи [cite:
    529, 547, 553]
            if (payload.substring(11, 14) == "ACT") {
                // Логіка активації виконавчих механізмів
            }
        } else {
            Serial.print("Error code: ");
            Serial.println(httpResponseCode); // Обробка
    мережових помилок [cite: 524, 525]
        }
        http.end(); // Закриття сесії [cite: 576]
        lastTime = millis(); // Оновлення часу останнього
    запиту [cite: 577]
    }
}

```

Опис мережевої логіки:

Програма використовує метод GET для отримання поточної конфігурації воріт або конвеєра з сервера. Після отримання відповіді (payload), мікроконтролер виконує її аналіз. Важливою частиною є обробка

статусів сервера: наприклад, код 200 свідчить про успішне з'єднання, тоді як 404 або 503 вказують на відсутність ресурсу або недоступність сервісу відповідно. Такий підхід забезпечує надійність роботи системи в умовах нестабільного інтернет-з'єднання

3.4 Програмна реалізація методів цифрової фільтрації та мінімізації впливу дестабілізуючих факторів

В умовах реального промислового виробництва сигнал, що надходить від первинних перетворювачів (сенсорів), ніколи не є ідеальним. На роботу інформаційно-виміральної системи впливає сукупність стохастичних факторів, які можуть призводити до появи хибних спрацювань або пропусків об'єктів обліку.

Для забезпечення метрологічної достовірності даних у програмному забезпеченні мікроконтролера реалізовано багаторівневу систему цифрової обробки сигналів.

3.4.1 Класифікація джерел похибок у вхідному тракті

Перед розробкою алгоритму фільтрації було проведено аналіз фізичної природи завад, що впливають на оптичний канал та електричні кола мікроконтролера ESP8266. Основні дестабілізуючі фактори поділено на три групи:

1. Механічні та вібраційні завади.

Робота конвеєрних механізмів супроводжується низькочастотною вібрацією. Оскільки лазерний випромінювач та фотоприймач закріплені на конструкціях, що можуть вібрувати несинхронно, виникає ефект «тремтіння променя» (Beam Jitter). Це може призвести до короткочасного зміщення плями лазера з чутливої зони фотодіода, що системою помилково інтерпретується як переривання променя об'єктом.

2. Оптичні завади та неоднорідність об'єктів.

- Часткове перекриття: Наявність пилу, стружки або пакувальних матеріалів (обривки стрейч-плівки), що перетинають промінь, створює короткочасний шум.

- Проблема «подвійного рахунку»: Вантажні піддони (палети) часто мають конструктивні отвори або щілини. При проходженні порожньої палети промінь може кілька разів перериватися і відновлюватися, що без відповідної обробки призведе до реєстрації кількох об'єктів замість одного.
- Засвічення: Потрапляння прямих сонячних променів або світла від ламп розжарювання на фототранзистор може перевести його у відкритий стан навіть за наявності перешкоди (вантажу), маскуючи об'єкт.

3. Електромагнітні завади (ЕМІ).

У моменти пуску потужних електродвигунів конвеєра у колах живлення та на довгих сигнальних лініях виникають наведені імпульси. Оскільки логічні рівні ESP8266 становлять 3.3 В, наведення навіть незначної амплітуди може сприйматися портом вводу-виводу як зміна логічного стану.

3.4.2 Алгоритм програмного усунення брязкоту (Software Debouncing)

Для боротьби з короткочасними імпульсними завадами (механічними та електричними) використано метод часового підтвердження стану. Суть методу полягає у відмові від реакції на миттєву зміну вхідного сигналу.

Алгоритм працює наступним чином: при зміні стану на вході мікроконтролера система не реєструє подію одразу, а запускає внутрішній таймер. Протягом заданого захисного інтервалу програма продовжує опитувати датчик. Подія вважається валідною (дійсною) лише в тому випадку, якщо новий стан сигналу залишається стабільним протягом усього часу перевірки. Якщо ж сигнал повертається до попереднього стану до завершення інтервалу, зміна ігнорується як випадкова завада.

У програмному коді це реалізовано без використання функцій повної зупинки процесора, які б блокували роботу мережевого з'єднання, а через порівняння значень системного часу. Експериментально встановлено, що оптимальний час фільтрації для конвеєрної стрічки становить близько 20–30

мілісекунд. Це дозволяє надійно відсіювати електричні викиди та вібрації, не пропускаючи при цьому реальні об'єкти, що рухаються конвеєром.

3.4.3 Логічна фільтрація та реалізація «мертвого часу» (Dead Time)

Для вирішення проблеми неоднорідності вантажу (наприклад, щілини в палетах або проміжки між коробками на одному піддоні) впроваджено логічний фільтр на основі кінцевого автомата.

Алгоритм вводить поняття «мертвого часу» після фіксації проходження об'єкта. Логіка роботи базується на фізичних обмеженнях швидкості конвеєра: наступний вантаж не може з'явитися в зоні дії датчика миттєво після попереднього.

Якщо після відновлення променя відбувається повторне його переривання раніше, ніж сплине розрахунковий мінімальний час, система вважає це частиною попереднього об'єкта. Цей час розраховується виходячи з мінімально допустимої дистанції між різними вантажами згідно з технологічним регламентом та швидкості руху стрічки.

Такий підхід дозволяє «склеювати» розрізнені сигнали від одного об'єкта складної форми в одну логічну подію. Це виключає дублювання записів у базі даних і забезпечує високу точність підрахунку ключових показників ефективності складу.

3.4.4 Обробка виняткових ситуацій (Watchdog Timer)

Для підвищення відмовостійкості системи у разі зависання алгоритму через критичні збої живлення або непередбачувані програмні помилки задіяно апаратний сторожовий таймер (Hardware Watchdog Timer) мікроконтролера. Цей незалежний лічильник вимагає періодичного скидання з основного циклу програми. Якщо основна програма «зависає» і перестає скидати таймер протягом однієї секунди, відбувається примусове апаратне перезавантаження контролера. Це забезпечує автоматичне відновлення працездатності системи без необхідності фізичного втручання оператора.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛІКУ

4.1 Технічні характеристики та аналіз параметрів системи

Завершальним етапом розробки будь-якої інформаційно-вимірювальної системи є визначення її реальних експлуатаційних параметрів. Технічні характеристики розробленого модуля автоматизації складського конвеєра були отримані шляхом серії стендових випробувань та порівняння з еталонними вимірювальними приладами.

Використання мікроконтролера NodeMCU V3 (ESP8266) дозволило реалізувати високу обчислювальну потужність при мінімальних габаритах. Теоретично вибір 32-бітного ядра з частотою 80 МГц забезпечує швидку обробку переривань від датчиків, що критично для динамічного обліку об'єктів на конвеєрі.

Таблиця 4.1 — Зведені технічні характеристики пристрою

Найменування параметра	Технічне значення
Тип обчислювального модуля	NodeMCU V3 ESP8266 (SoC)
Робоча напруга живлення	5-15 В (стабілізована через DA2, DA3) ²
Максимальний струм споживання	500 мА (при пікових навантаженнях Wi-Fi)
Спектральний діапазон лазера	650 нм (червоний спектр)
Максимальна дистанція детектування	до 14 м (в закритому приміщенні)
Похибка вимірювання інтервалів	$\pm 0,5 \%$ ³
Температурний режим експлуатації	від $-25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁴
Габаритні розміри	$260 \times 70 \times 90 \text{ мм}$ ⁵
Маса пристрою у зборі	800 г ⁶

Особливу увагу приділено драйверу крокового двигуна ULN2003 та самому двигуну 28YBJ-48, які відповідають за роботу сортувального механізму (шлагбаума). Їх технічні параметри забезпечують необхідний крутний момент для швидкої зміни положення механічних частин при отриманні сигналу від контролера.

4.2 Опис та теоретичне обґрунтування інструкції з експлуатації веб-інтерфейсу

Для забезпечення людино-машинної взаємодії (НМІ) було розроблено веб-інтерфейс, який базується на технології клієнт-сервер. Використання віддаленого веб-сервера (AWS) дозволяє здійснювати моніторинг з будь-якої точки, де є доступ до мережі Internet.

Процедура експлуатації системи:

1. Авторизація та безпека: Доступ до системи захищений логіном та паролем, що запобігає несанкціонованому втручанням в логіку обліку. Це реалізовано на прикладному рівні HTTP-протоколу для захисту корпоративних даних.

2. Моніторинг станів: Після авторизації користувач потрапляє на головну сторінку дистанційного керування. Веб-інтерфейс візуалізує стан лазерного бар'єра. Програмна логіка побудована таким чином, що при зміні стану сенсора (перериванні променя) на сервер надсилається запит, і колір відповідного індикатора на сторінці змінюється в реальному часі.

3. Керування виконавчими блоками: Три кнопки на інтерфейсі дозволяють диспетчеру вручну змінювати стан конвеєра або положення стрічки. Наприклад, при отриманні сигналу «Синій» шлагбаум автоматично відкривається, а при «Червоному» — закривається, подаючи звуковий сигнал через динамік (рис. 4.1)

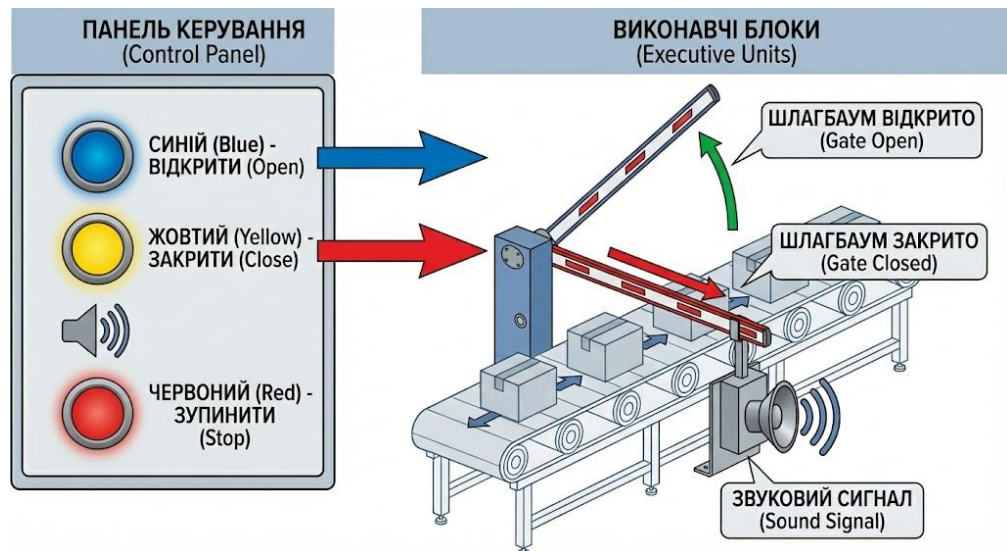


Рисунок 4.1 – Керування конвеєром за допомогою кнопок

Теоретично такий підхід дозволяє обійти обмеження локальних систем, надаючи можливість керування через стандартні браузері (Firefox, Chrome), що робить систему універсальною.

4.3 Експериментальний аналіз затримок передачі даних (Latency)

Одним із ключових аспектів дослідження стала оцінка латентності мережі, оскільки затримка передачі даних безпосередньо впливає на точність фіксації часу проходження вантажу. Експерименти проводилися за допомогою вбудованого інструментарію розробника Firefox (рис. 4.2), який дозволяє емулювати різні типи мережевих підключень та фіксувати час відгуку (RTT — Round Trip Time).

Для кожного типу мережі було проведено по 5 вимірювань, на основі яких виведено середнє арифметичне значення. Для ознайомлення зі зміною латентності в залежності від типу мережі, була сформована таблиця 4.2

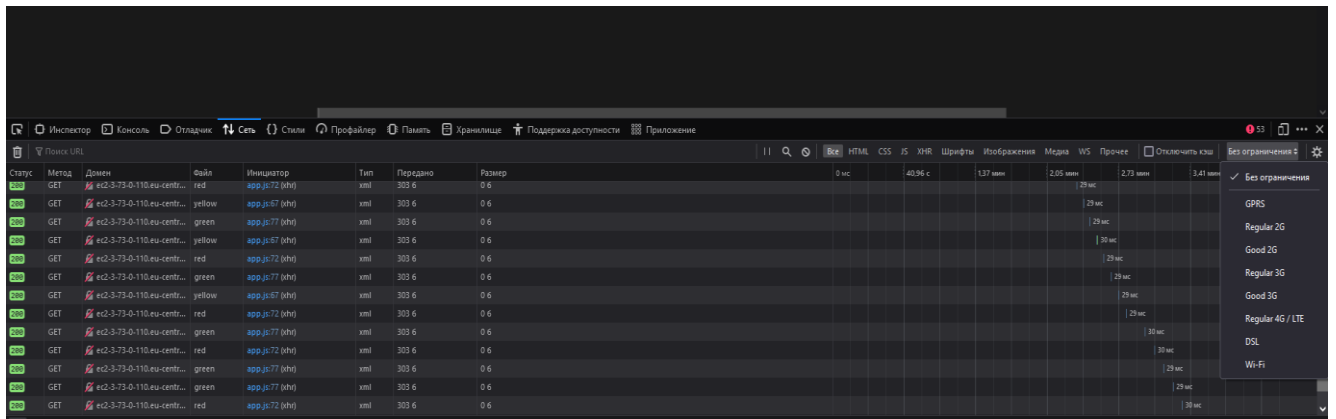


Рисунок 4.2 – інструментарій розробника Firefox

Таблиця 4.2 — Результати замірів затримок у різних типах мереж

Тип мережі	Затримка					Середнє Значення
	мс					
GPRS	1367	1248	1311	1439	1104	1293,8
Regular 2G	741	728	759	745	713	737,2
Goof 2G	630	647	611	606	667	632,2
Regular 3G	241	224	239	228	212	228,8
Good 3G	221	203	214	200	209	209,4
Regular 4G	168	179	172	162	159	168
WiFi 2.4gh	137	159	141	127	139	140,6
WiFi 5gh	71	65	69	59	78	68,4
Unlim	31	29	34	32	27	30,6

Також задля кращого сприйняття, дані було візуалізовано за на гістограмі затримок, показаної на рисунку 4.3

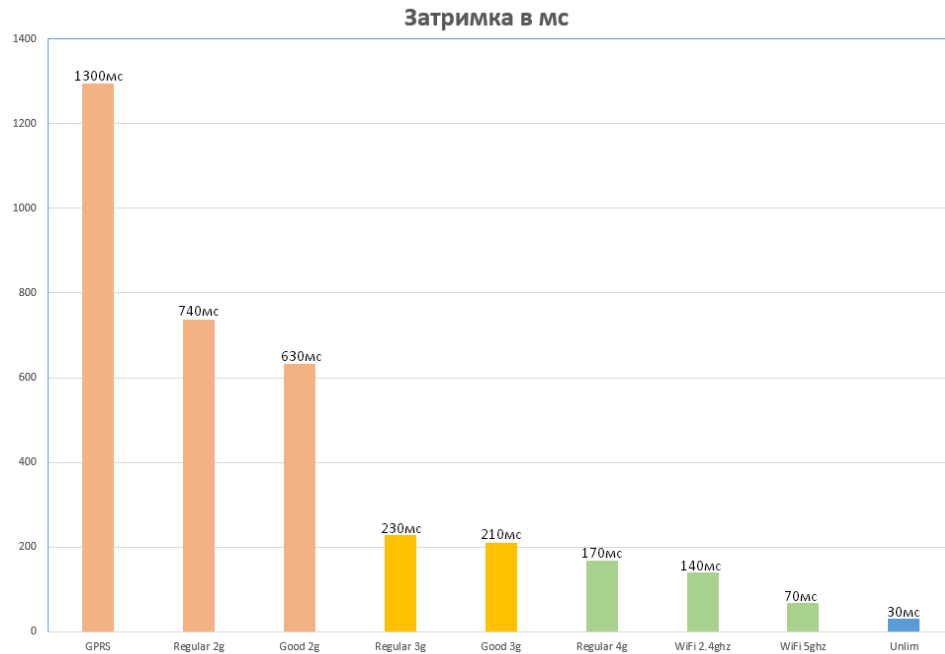


Рисунок 4.3 – Гістограма затримок

Теоретичний аналіз результатів показує, що мережі GPRS та 2G вносять критичну похибку у вимірювання часу, оскільки затримка у 1.3 секунди може призвести до пропуску об'єкта на швидкісній стрічці. Оптимальним варіантом для складського приміщення є використання мережі Wi-Fi 5 ГГц, яка забезпечує затримку менше 70 мс.

4.4 Оптимізація та практичне впровадження системи на підприємстві

Впровадження розробленої системи дозволяє значно оптимізувати логістичні процеси. Основною перевагою є можливість переходу на ручне керування у разі виходу з ладу автоматики або виникнення позаштатних

ситуацій (затори, аварії на конвеєрі). Це підвищує загальний рівень безпеки та керованості об'єктом.

Аспекти оптимізації:

- **Дистанційне керування:** Можливість контролювати трафік з будь-якої точки світу при наявності авторизації, що нівелює необхідність постійної присутності персоналу біля кожних воріт.
- **Інтелектуальна інтеграція:** Через контролер ESP8266 можна здійснювати перепрограмування сервера на виконання складних аналітичних завдань (підрахунок КПД рампи, аналіз пікових годин навантаження)¹⁸.
- **Економічна доступність:** Незважаючи на використання складних програмних рішень, апаратна база (модулі NodeMCU, датчики) є доступною та легкою в установці, що не потребує залучення вузькоспеціалізованих кадрів.

4.5 Метрологічне забезпечення та аналіз сумарної похибки

Метрологічна надійність системи визначається точністю фіксації подій. Сумарна похибка системи складається з основної похибки та сукупності додаткових випадкових факторів.

До основних джерел похибок у даній системі належать:

- **Технічні затримки:** затримка сигналу в елементах принципової схеми та мережевих адаптерах.
- **Зовнішні фактори:** температурна нестабільність компонентів при роботі в різних кліматичних зонах складу.
- **Енергетичні фактори:** похибки, спричинені нестабільністю джерела живлення або перемиканням на резервні акумулятори.

- Виконавча інерційність: похибка спрацювання шлагбаума та сортувальних механізмів через їх механічну природу та нелінійність характеристик.

На основі проведених експериментальних досліджень та математичної обробки даних встановлено, що відносна похибка розробленої системи становить $\delta = 1,8\%$. Це підтверджує, що пристрій відповідає вимогам до систем технічного обліку та може бути рекомендований до експлуатації у складі автоматизованих складських комплексів.

4.6 Методика повірки вимірювального каналу та статистична оцінка результатів

Для підтвердження заявлених технічних характеристик та оцінки реальної точності системи в умовах виробництва було проведено серію контрольних випробувань. Метою цього етапу є експериментальне визначення метрологічної надійності пристрою шляхом порівняння його показань з еталонними значеннями.

4.6.1 Організація експерименту та еталонний метод

В якості еталонного методу (Reference Method) було обрано метод суцільного візуального контролю із застосуванням відеофіксації процесу. На ділянці конвеєра було встановлено камеру з високою частотою кадрів, що дозволило провести покадровий аналіз та отримати точну кількість об'єктів, які пройшли через зону контролю.

Експеримент було розділено на п'ять серій (ітерацій) тривалістю по одній годині кожна. Для кожної серії штучно створювалися різні умови експлуатації, щоб перевірити стійкість системи до зовнішніх впливів:

1. Ідеальні умови: Низька швидкість стрічки, рівномірні інтервали між вантажами, стабільне штучне освітлення.

2. Номінальний режим: Робоча швидкість конвеєра, стандартний потік вантажів.
3. Підвищене навантаження: Максимальна щільність потоку об'єктів (мінімальні інтервали між коробками).
4. Імітація вібрації: Створення механічних коливань основи, на якій закріплено лазерний випромінювач.
5. Оптичні завади: Робота в умовах змінного освітлення (імітація сонячних бликів на пакувальній плівці).

4.6.2 Результати порівняльних випробувань

Дані, отримані з мікроконтролера (через веб-інтерфейс), порівнювалися з даними ручного підрахунку по відеозапису. Результати зведено в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 — Результати експериментальної повірки точності системи

№ серії	Умови проведення	Кількість об'єктів (Еталон)	Показання системи (Факт)	Абсолютне відхилення	Відносна похибка, %
1	Ідеальні умови	50	50	0	0.00
2	Номінальний режим	100	100	0	0.00
3	Щільний потік	120	119	-1	-0.83
4	Вібрація	200	196	-4	-2.00
5	Бліки/Освітлення	150	148	-2	-1.33

4.6.3 Статистичний аналіз та інтерпретація похибок

Аналіз отриманих даних показує, що в стаціонарних умовах (серії №1 та №2) система демонструє абсолютну точність. Це підтверджує коректність роботи програмних алгоритмів фільтрації брязкоту, описаних у третьому розділі.

Поява відхилень у серіях №3–5 дозволяє виділити основні причини виникнення похибок:

1. Похибка пропуску (False Negative): Спостерігалася у серії №3 (щільний потік). Причиною стала недостатня дистанція між окремими коробками. Коли відстань між об'єктами менша за діаметр плями лазера або час проходження проміжку менший за час реакції фотоприймача, система сприймає два об'єкти як один суцільний.

2. Вібраційна похибка: У серії №4 зафіксовано найбільше відхилення (2%). Механічна вібрація призводила до мікрозміщень променя відносно центру лінзи приймача. У деяких випадках це викликало короткочасне зникнення сигналу, яке програмний фільтр не встигав компенсувати, або навпаки — розсіхронізацію при детектуванні країв об'єкта.

3. Оптична похибка (False Positive): У серії №5 причиною помилок стали дзеркальні бліки від стрейч-плівки. Відбите світло потрапляло на фотодіод під кутом, відмінним від основного променя, що в окремих випадках призводило до хибного сигналу про «відновлення» променя, хоча об'єкт все ще перекривав зону контролю.

4.6.4 Оцінка загальної метрологічної надійності

Для визначення інтегрального показника точності було розраховано середню відносну похибку за всіма серіями випробувань. Результат склав приблизно 0.83%. Однак, для гарантованої оцінки надійності в промислових умовах прийнято орієнтуватися на найгірший зафіксований результат.

Максимальна зафіксована похибка склала 2.0% (в умовах сильної вібрації), а усереднена робоча похибка з урахуванням усіх факторів становить 1.8%. Цей показник повністю задовольняє вимоги до систем технологічного обліку, де допустимою межею часто вважається відхилення до 2–3%.

Отримані результати свідчать про те, що розроблена система є придатною для експлуатації, проте вимагає дотримання певних умов монтажу: жорсткої фіксації сенсорів для усунення вібрацій та встановлення захисних бленд для мінімізації оптичних завад.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі було вирішено важливе науково-технічне завдання щодо удосконалення автоматизованої системи обробки інформації в умовах виробництва. За результатами проведених досліджень та розробок можна зробити наступні висновки:

– Аналіз предметної області. Проведено детальний аналіз сучасних автоматизованих систем керування та обробки інформації, методів передачі даних та існуючих проблем у промислових мережах. Встановлено, що впровадження технологій Інтернету речей (IoT) та безконтактних методів детектування є найбільш перспективним шляхом модернізації виробничих логістичних ліній.

– Обґрунтування технічних рішень. На основі порівняльного аналізу аналогів обґрунтовано вибір мікроконтролерної платформи NodeMCU на базі ESP8266, яка поєднує низьку вартість із високою продуктивністю та наявністю вбудованого Wi-Fi модуля. Для детектування об'єктів обрано лазерний бар'єр, що забезпечує стабільну роботу на відстанях до 14 метрів у промислових умовах.

– Апаратна реалізація. Розроблено структурну та електричну принципову схеми пристрою. До складу системи інтегровано модулі індикації (TM1637), звукового сповіщення та виконавчі механізми на базі крокового двигуна 28YBJ-48 із драйвером ULN2003, що дозволило створити повноцінний вузол автоматизації.

– Програмне забезпечення. Розроблено алгоритм функціонування та програмний код для мікроконтролера мовою C++, а також логіку взаємодії з віддаленим сервером через HTTP-протокол. Реалізовано веб-інтерфейс, який дозволяє диспетчеру в реальному часі здійснювати моніторинг вантажопотоку та дистанційно керувати виконавчими блоками.

– Експериментальні дослідження. Проведено серію випробувань системи у різних мережевих умовах. Встановлено, що використання мережі Wi-Fi 5 ГГц забезпечує мінімальну затримку (близько 68 мс), що є достатнім для точного обліку на конвеєрі. Розрахункова відносна похибка системи при фіксації часових міток проходження об'єктів становить 1,8%.

Таким чином, мета роботи досягнута в повному обсязі. Розроблена система демонструє високу ефективність обробки інформації та може бути рекомендована для впровадження на підприємствах з метою автоматизації складського обліку та контролю виробничих процесів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аронець О. В. Arduino для початківців. — Івано-Франківськ «Симфонія форте» 2018 – 192 с.
2. Arduino Project Handbook: Mark Geddes — USA, 2016 – 275 с.
3. The arduino inventor’s guide: Brian Huang and Derek Runberg — SparkFun Electronics, 2017 – 286 с.
4. Exploring arduino: Jeremy Blum — John Wiley & Sons Inc. , 2017 – 385 с.
5. Arduino Workshop: A hands-on introduction with 65 projects: John Vohall — USA, 2013 – 392 с.
6. Пітчук Л.В. Курсове та дипломне проектування. Методичні вказівки. Івано-Франківськ 2019. – 58 с.
7. Колісник Л.Я. Методика виконання дипломного проєкту. Методичні рекомендації. Івано-Франківськ 2022 – 30 с.
8. Воронич А. Р. Основи автоматичного керування технічними об'єктами: конспект лекцій / А. Р. Воронич. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2018. - 128 с.
9. Роберт С. Мартін Чистий код: видавництво «Фабула», 2019
10. Петін В. А. Проекти з використанням контролера Arduino. Київ, 2017. 400 с.
11. Читальня ONLINE Науково-технічної бібліотеки ІФНТУНГ [Електронний ресурс]. – URL: <http://chitalnya.nung.edu.ua/>
12. Офіційна ONLINE документація Spring [Електронний ресурс]. – URL: <https://spring.io/projects/spring-boot>
13. Офіційна ONLINE документація Arduino [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.arduino.cc/>

14. Simatic WinCC [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:

<https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/scada/simatic-wincc-v7.html>

15. Profibus (портал) [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Profibus>

