

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система автоматизації процесу сортування та пакування
Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

Шифр КвРКІ 022089.22.03.71 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група КІ2-22-3

Керівник

Науковий ступінь, учене звання

Нормоконтролер

Науковий ступінь, учене звання

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС
«01» червня 2026 р.

дата


Підпис

Дарія СОРОЧИНСЬКА
Ініціали, прізвище


Підпис

Єлизавета ГНАТЧУК
Ініціали, прізвище


Підпис

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище



Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

Хмельницький 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
Рівень вищої освіти ПЕРШОЇ (БАКАЛАВРСЬКОЇ)
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ
Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедри КІС

Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Сорочинській Дарії Юріївні

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система автоматизації процесу сортування та пакування

Керівник проекту (роботи) Гнатчук Єлизавета, д.т.н., проф.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Кіберфізична система автоматизації процесу сортування та пакування та постановка задачі щодо її удосконалення

Проектування системи обробки інформації у кіберфізичній системі автоматизації процесу сортування та пакування

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи автоматизації процесу сортування та пакування

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Лістинг коду _____

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи _____

Апаратне забезпечення проекту _____

Архітектура ПЗ проекту _____

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проектування системи автоматизації процесу сортування та пакування	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – проектування системи автоматизації процесу сортування та пакування	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач  Дарія СОРОЧИНСЬКА

Підпис

Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Єлизавета ГНАТЧУК

Імя, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система автоматизації процесу сортування та пакування».

Автор роботи: Дарія СОРОЧИНСЬКА.

Керівник роботи: Єлизавета ГНАТЧУК.

Пояснювальна записка: 57 с., 19 рис., 9 табл., 4 дод., 60 джерел, 1 листинг коду.

Графічна частина: 3 креслення.

АРХІТЕКТУРА, БАЗА ДАНИХ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА,
МОНІТОРИНГ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню програмно-апаратної системи моніторингу параметрів комп'ютерного обладнання та навколишнього середовища на базі мікроконтролерної платформи. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до надійності, енергоефективності та безперервності функціонування комп'ютерних систем, серверного обладнання, вбудованих пристроїв і елементів інфокомунікаційної інфраструктури. Своєчасний контроль температури, вологості, енергоспоживання та інших параметрів дає змогу попереджати аварійні ситуації, знижувати ризики відмов і підвищувати ефективність експлуатації технічних засобів.

Метою роботи є проектування, реалізація та тестування апаратно-програмного комплексу для збору, передавання, оброблення й візуалізації даних з датчиків у реальному часі. Для досягнення поставленої мети було виконано аналіз сучасних підходів до побудови систем моніторингу, обрано елементну базу, розроблено структурну та функціональну схеми пристрою, спроектовано програмне забезпечення мікроконтролера і користувацький інтерфейс для перегляду результатів вимірювань.

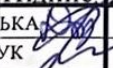
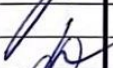



Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Зміст.....	2
Вступ.....	4
1 Кіберфізична система автоматичного сортування та пакування.....	6
1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей кіберфізичної системи автоматичного сортування та пакування.....	6
1.2 Аналіз програмно-апаратного забезпечення обробки інформації в кіберфізичній системі автоматичного сортування та пакування.....	10
1.3 Підходи до вирішення задачі кіберфізичної автоматичного системи сортування та пакування	14
1.4 Аналіз впливу автоматизації сортування на управління виробничими відходами	15
1.5 Висновки до першого розділу.....	17
2 Проектування системи обробки інформації у кіберфізичній системі автоматизації процесу сортування та пакування.....	19
2.1 Визначення апаратних і програмних підсистем програмно-технічного засобу	19
2.2 Обґрунтування вибору апаратних засобів та їх технічна характеристика	22
2.3 Тензометрична система вимірювання маси на базі модуля НХ711	28
2.4 Ультразвукова підсистема контролю геометричних параметрів на базі НС-SR04	34
2.5 Математичне моделювання та аналіз фізичних процесів вимірювання	37
2.6 Розробка мережевої інфраструктури та IoT-інтерфейсу моніторингу.....	39
2.7 Висновки до другого розділу.....	41

КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
Виконав		Дарія СОРОЧИНСЬКА		
Перевіс		Єлизавета ГНАТЧУК		
Н.контр.		Тетяна КИСЛІЬ		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		
			Підсистема керування автоматизованим сортуванням та пакуванням.	Літера
			Пояснювальна записка	Арквщ
				Арквщів
				у
				2
				72
ХНУ КІ2-22-3				

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку промислового виробництва характеризується глобальною цифровізацією та переходом до концепції «Індустрії 4.0». Одним із ключових елементів цієї трансформації є впровадження кіберфізичних систем (КФС), які забезпечують тісну інтеграцію обчислювальних алгоритмів із фізичними процесами. Автоматизація процесів сортування та пакування за ваговими та геометричними ознаками є критично важливою для харчової, фармацевтичної та логістичної галузей, де точність дозування безпосередньо впливає на економічну ефективність та безпеку споживача.

Традиційні автоматизовані системи управління (АСУ ТП) часто є закритими та дорогими у впровадженні для малого та середнього бізнесу. Використання сучасних енергоефективних мікроконтролерів із вбудованими мережевими інтерфейсами, таких як ESP32-S2, дозволяє створювати гнучкі та доступні рішення з функціями «граничних обчислень». Це дозволяє не лише виконувати механічне сортування, а й формувати «цифрові паспорти» продукції, забезпечуючи повну простежуваність та IoT-моніторинг у реальному часі. Таким чином, розробка бюджетної, але прецизійної КФС сортування є актуальним науково-технічним завданням.

Об'єкт дослідження технологічні процеси автоматизованого зважування, класифікації за габаритами та накопичувального пакування об'єктів на виробничих лініях.

Предмет дослідження архітектура програмно-технічного засобу, математичні моделі цифрової фільтрації сигналів, алгоритми логічного керування на базі скінченних автоматів та методи вебінтерфейсної візуалізації даних КФС.

Мета роботи проєктування та дослідження кіберфізичної системи автоматизації сортування об'єктів за масою та висотою з реалізацією функції

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

групового пакування та вбудованого вебінтерфейсу для віддаленого моніторингу статистики.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати принципи побудови КФС на базі моделі 5С та методи подолання динамічних похибок зважування.
2. Обґрунтувати вибір елементної бази (мікроконтролера ESP32-S2, АЦП НХ711 та сенсора HC-SR04) та розробити функціонально-структурну схему системи.
3. Розробити програмне забезпечення на базі моделі скінченного автомата для керування сортуванням та накопичувальним обліком продукції.
4. Спроектувати людино-машинний інтерфейс (Dashboard) та провести верифікацію працездатності системи у середовищі віртуального моделювання Wokwi.
5. Провести техніко-економічне обґрунтування проєкту та сформулювати специфікацію компонентів для фізичної реалізації ПТЗ.

Методи дослідження. У роботі використано методи цифрової обробки сигналів (ЦОС), теорії скінченних автоматів, об'єктно-орієнтованого програмування на мові C++, а також методи імітаційного моделювання складних технічних систем.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО СОРТУВАННЯ ТА ПАКУВАННЯ

1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей кіберфізичної системи автоматичного сортування та пакування

Розвиток сучасних виробничих потужностей нерозривно пов'язаний із концепцією «Розумного виробництва», де центральне місце посідають кіберфізичні системи (КФС) (рис. 1.1). Згідно з останніми дослідженнями в галузі комп'ютерної інженерії, КФС визначаються як інтеграції обчислень, мереж та фізичних процесів [1]. У контексті автоматизації сортування та пакування, це означає створення середовища, де кожен об'єкт на конвеєрі має свій цифровий образ, а керування механічними вузлами відбувається на основі аналізу даних у реальному часі [2].

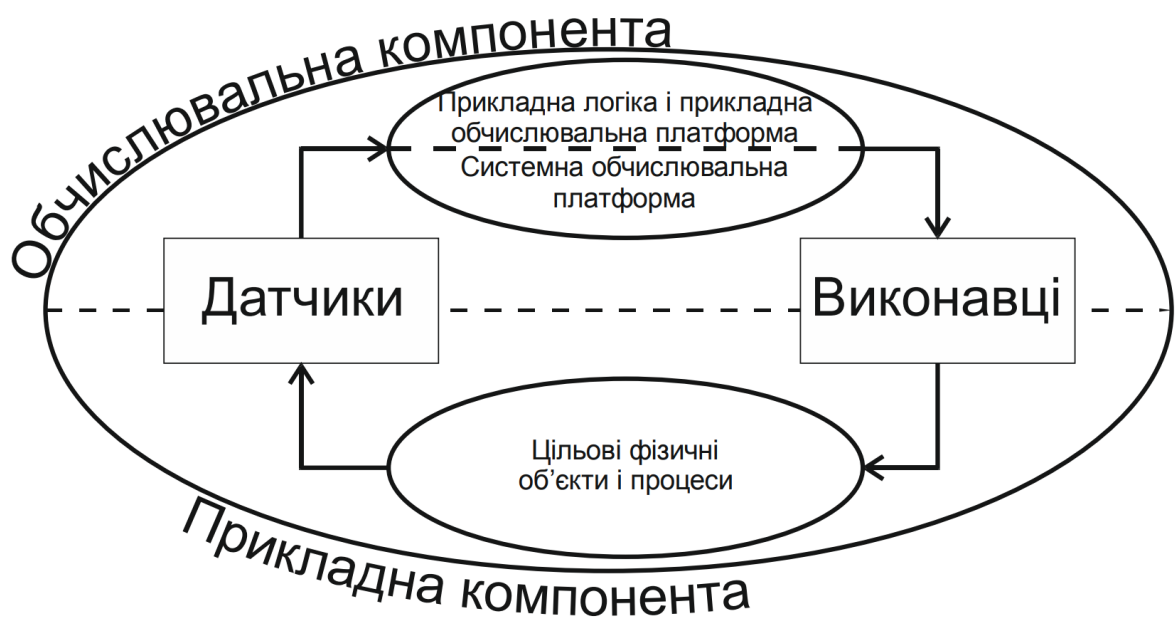


Рисунок 1.1 – Узагальнена структура КФС

Аналіз архітектури сучасних КФС дозволяє виділити п'ять фундаментальних рівнів обробки інформації, відомих як модель 5С [3].

1. Рівень з'єднання у розроблюваній системі забезпечується сенсорним вузлом, куди входять тензометрична платформа та ультразвуковий ехолот. Тут відбувається первинний збір аналогових та цифрових сигналів.

2. Рівень перетворення базується на алгоритмах цифрової фільтрації, які перетворюють «сирі» дані АЦП (аналого-цифровий перетворювач) у зрозумілі метрологічні одиниці, грами та сантиметри.

3. Кібернетичний рівень виконує роль «цифрового двійника» об'єкта, де отримані параметри порівнюються з еталонними значеннями категорій «Преміум» чи «Норма».

4. Рівень пізнання відповідає за прийняття рішення про вердикт сортування та накопичення статистики.

5. Рівень конфігурації реалізує зворотний зв'язок, дозволяючи системі адаптуватися до змін (наприклад, автоматичне тарування при зміні температури). Така багаторівнева структура дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та забезпечити високу відтворюваність результатів навіть при інтенсивній роботі конвеєра.

Предметна область дослідження охоплює технологічні лінії сортування, де вагова ознака є визначальним фактором якості [4]. У харчовій промисловості це дозволяє автоматизувати фасування сипких та штучних продуктів, гарантуючи відповідність державним стандартам маси. У логістичних центрах КФС сортування забезпечує коректне розподілення вантажів за тарифними сітками, що критично для оптимізації витрат на транспортування. Окремим важливим сегментом є фармацевтична галузь, де точність зважування до міліграма безпосередньо впливає на безпеку споживача. Незначна похибка в таких масштабах може призвести не лише до фінансових збитків через перевитрату сировини, а й до випуску бракованих партій ліків. Таким чином, впровадження інтелектуальної КФС стає необхідною умовою для підприємств, що прагнуть відповідати стандартам цифрового виробництва та забезпечувати безперебійний контроль якості без зупинки лінії.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз сучасних підходів до автоматизації сортувальних ліній дозволяє виділити перехід від ізольованих автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) до відкритих кіберфізичних екосистем [5]. У таких системах інформація від вагового модуля не просто використовується для спрацювання виконавчого механізму, а й передається в аналітичні модулі для прогнозування завантаженості лінії та оптимізації енергоспоживання.

Важливою відмінністю КФС від класичних АСУ ТП є впровадження концепції розподіленого інтелекту. Це означає, що ваговий модуль не просто транслює електричний сигнал, а здійснює первинну обробку даних. У такій архітектурі інформація про масу об'єкта стає частиною його «цифрового паспорта», що дозволяє системі не лише виконувати механічну дію (сортування), а й проводити прогнозуючий аналіз зносу механічних частин конвеєра на основі аномалій у вібраційному фоні тензодатчиків.

Виявлення наявних проблем у предметній області. Попри високий ступінь цифровізації, існують бар'єри, які заважають ефективній роботі систем сортування [6-7]:

1. Динамічні похибки зважування. Основними сенсорами у системах сортування за вагою є тензOMETричні датчики. Під час руху конвеєрної стрічки виникають механічні вібрації, спричинені роботою приводів та тертям. Це створює високочастотний шум. Зокрема, виникає проблема спектрального накладання завад, де частота механічних вібрацій двигуна може збігатися з корисною смугою частот сигналу зважування. Це ускладнює застосування простих фільтрів низьких частот і вимагає впровадження адаптивних алгоритмів цифрової обробки сигналів.

2. Затримки у передачі даних. У кіберфізичних системах критично важливою є швидкість реакції. Якщо дані від ваг до контролера або від контролера до виконавчого механізму (пакувальника) передаються із затримкою, сортування відбудеться некоректно. У термінах теорії автоматичного керування це визначається як критичний «час реакції системи». При швидкості конвеєра, наприклад, 0.5 м/с, затримка в обробці даних навіть у 200 мс призводить до

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відхилення позиціонування об'єкта на 10 см, що є неприпустимим для ліній пакування.

3. Складність інтеграції різнорідного обладнання. Проблема «Залежність від постачальника», коли обладнання різних виробників (датчики ваги однієї фірми, контролери іншої) важко об'єднати в єдину мережу. Це вимагає розробки універсальних програмних шлюзів.

4. Відсутність механізмів відстеження. Часто після процесу пакування втрачається зв'язок між конкретною одиницею товару та її ваговими характеристиками, що були отримані на етапі сортування. Кіберфізична система має вирішувати цю проблему шляхом забезпечення простежуваності шляхом реєстрації параметрів кожної операції у базі даних.

5. Нелінійність характеристик при зміні умов довкілля. Більшість доступних сенсорних рішень мають температуру нестабільних параметрів. У реальних цехах температура може коливатися протягом зміни, що призводить до зміщення «нуля» ваг. Відсутність механізмів динамічної компенсації тарування у стандартних системах призводить до накопичувальної похибки, яка до кінця робочого дня може перевищувати допустимі межі точності для категорій «Преміум» продукції.

Постановка завдань дослідження. Для вирішення проблем у межах даної дипломної роботи необхідно реалізувати наступні завдання:

- дослідити та порівняти ефективність методів нелінійної фільтрації (медіанний фільтр) та лінійного наближення для пригнічення імпульсних завад у каналі тензометрії;
- розробити логіку керування вузлом пакування, що базується на накопичувальному принципі (пакування після досягнення певної кількості відсортованих об'єктів);
- спроектувати програмний інтерфейс для моніторингу процесу (Dashboard), що дозволить оператору бачити статистику зважування в режимі реального часу.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Аналіз програмно-апаратного забезпечення обробки інформації в кіберфізичній системі автоматичного сортування та пакування

Вибір критерію сортування є ключовим етапом проектування автоматизованої системи. На сучасних виробництвах використовують декілька основних методів ідентифікації об'єктів для їх подальшого розподілу. Проведемо порівняльний аналіз найбільш поширених технологій у контексті їх інтеграції в кіберфізичні середовища:

1. Сортування на основі комп'ютерного зору [8]. Цей метод базується на використанні відеокамер та алгоритмів штучного інтелекту (нейронних мереж) для розпізнавання форми, кольору або текстури об'єкта:

- технологічними пріоритетами є висока гнучкість, можливість розпізнавання дефектів поверхні;
- технічними обмеженнями є висока обчислювальна складність, чутливість до освітлення, неможливість визначити внутрішній стан або реальну масу об'єкта.

2. Сортування за допомогою штрих-кодів та RFID-міток [9]. Об'єкти ідентифікуються шляхом зчитування наклеєних маркерів або радіочастотних міток:

- технологічними пріоритетами є максимальна точність ідентифікації, легка інтеграція з базами даних;
- технічними обмеженнями є необхідність попереднього маркування кожної одиниці товару, що збільшує собівартість, ризик пошкодження етикетки.

3. Сортування за вагою [10]. Використання тензометричних систем для визначення маси об'єкта безпосередньо під час руху конвеєром:

- технологічними пріоритетами є об'єктивність (вагу неможливо підробити зовні), відсутність потреби в маркуванні, можливість сортування сипучих та упакованих товарів одночасно;
- технічними обмеженнями є вплив вібрацій конвеєра на точність, необхідність регулярного калібрування датчиків (табл. 1.1).

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

разі несправності центрального контролера функціонування всієї виробничої лінії припиняється.

2. Децентралізована кіберфізична архітектура керування. Кожен функціональний модуль (ваговий вузол, штовхач, пакувальний механізм) оснащується власним мікроконтролером, який виконує локальну обробку даних та обмінюється інформацією через промислові протоколи передачі даних. Перевагами є підвищена модульність, масштабованість та можливість оновлення програмного забезпечення окремих вузлів без зупинки всієї системи.

На (рис. 1.2) представлено порівняння централізованої та децентралізованої топологій керування кіберфізичною системою.

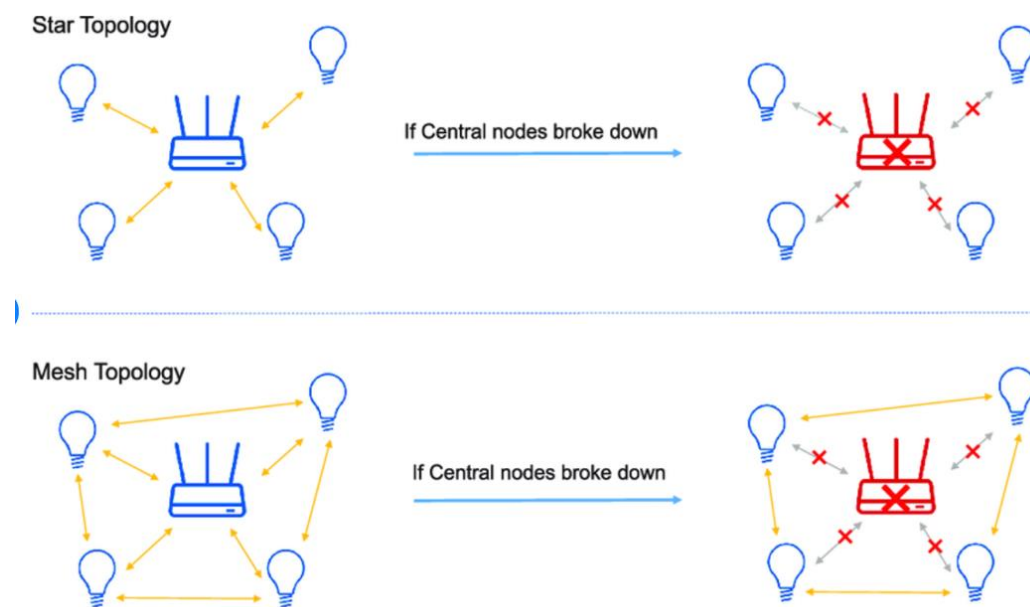


Рисунок 1.2 – Порівняльний аналіз централізованої та децентралізованої топологій керування КФС [12].

У централізованій топології всі вузли взаємодіють виключно через центральний контролер, що створює критичну залежність від його працездатності.

У децентралізованій топології вузли мають можливість прямої взаємодії між собою, що забезпечує безперервність технологічного процесу навіть при відмові окремого елемента системи. Такий підхід відповідає концепції розподілених кіберфізичних систем [13].

Математичне обґрунтування показників інформаційної та структурної ефективності.

З точки зору інформаційної місткості, обробка вагового вектора потребує обсягів даних у межах декількох кілобайт, тоді як ідентифікація через відеопотік генерує трафік обсягом у десятки мегабайт за секунду. Це дозволяє використовувати менш потужні, але енергоефективні контролери, що знижує собівартість системи.

Аналіз надійності підтверджує переваги децентралізації. У централізованій структурі надійність системи R_{sys} при послідовній логічній взаємодії вузлів визначається як добуток імовірностей безвідмовної роботи кожного елемента [14]:

$$R_{sys} = \prod_{i=1}^n R_i, \quad (1.1)$$

де R_i – надійність i -го компонента.

Оскільки центральний контролер є визначальним компонентом, при його виході з ладу ($R_{center} = 0$) загальна надійність системи R_{sys} також прямує до нуля.

Натомість у децентралізованій топології, завдяки надлишковим зв'язкам та локальній автономності вузлів, надійність системи значно підвищується. Навіть при відмові мережевого вузла окремі сегменти лінії (зважування - пакування) здатні продовжувати автономне функціонування. Це є критично важливим для виробництв безперервного циклу, де кожна хвилина простою через збій у мережі призводить до значних економічних збитків.

Проведений аналіз показує, що для автоматизації процесів, де ключовим показником є фізичний вміст продукції, вагове сортування є найбільш ефективним. Впровадження саме децентралізованої кіберфізичної моделі дозволяє компенсувати основний недолік вагового методу (чутливість до шумів) за допомогою інтелектуальних алгоритмів обробки сигналів безпосередньо на

рівні контролера. Це робить систему гнучкою, точною та готовою до інтеграції в сучасні IT-мережі підприємства.

1.3 Підходи до вирішення задачі кіберфізичної автоматичного системи сортування та пакування

Реалізація сучасної кіберфізичної системи (КФС) сортування за вагою потребує інтегрованого підходу [15], який базується на адаптованих методах цифрової обробки сигналів, теорії алгоритмів та мережевих технологій «Індустрії 4.0». У межах даної роботи для вирішення поставлених завдань виділено чотири фундаментальні рівні методологічного підходу [16-17]:

1. Рівень обробки вагового сигналу [18].

Головним викликом при динамічному зважуванні є високий рівень шумів, спричинених вібраціями конвеєрних приводів та ударними навантаженнями при потраплянні об'єкта на платформу. Для подолання цієї проблеми у роботі обрано шлях програмної фільтрації. Методологія передбачає використання дворівневої системи ЦОС. Нелінійного медіанного фільтра для видалення випадкових «викидів» (імпульсних завад) та лінійного середнього для подавлення білого шуму.

2. Системно-алгоритмічний підхід до керування [19].

Логіку функціонування КФС запропоновано представити у вигляді моделі скінченного автомата. Такий підхід дозволяє формалізувати поведінку системи через чітко визначені стани такі як очікування, активне вимірювання, класифікація та ініціалізація виконавчого механізму. Це мінімізує ризик виникнення логічних конфліктів у програмному забезпеченні та забезпечує стабільність роботи лінії при зміні швидкості подачі об'єктів.

3. Мережевий та кібернетичний підхід (ІоТ) [20].

В основі побудови системи лежить у підході Industrial Internet of Things та концепція граничних обчислень. Це трансформує сортувальну установку з простого виконавчого механізму на автономний інтелектуальний вузол КФС.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Даний підхід дозволяє здійснювати локальну обробку даних на мікроконтролері ESP32-S2 та одночасно створювати «цифровий двійник» виробничої лінії у реальному часі через протоколи HTTP та JSON.

4. Метод віртуального моделювання та верифікації [21].

З метою мінімізації ризиків та витрат на етапі розробки, у роботі застосовано методику віртуального прототипування. Використання середовища Wokwi (для верифікації програмного коду) дозволяє провести комплексне стрес-тестування алгоритмів та перевірити часову узгодженість системи ще до її апаратного впровадження.

1.4 Аналіз впливу автоматизації сортування на управління виробничими відходами

У сучасних виробничих циклах проблема мінімізації відходів та їх коректної утилізації посідає одне з центральних місць [22]. Кіберфізична система автоматичного сортування та пакування є ключовим інструментом для реалізації стратегій «Ощадливого виробництва» та принципів циркулярної економіки.

Зменшення «прихованих» виробничих втрат. Одним із найважливіших економічних та екологічних факторів є боротьба з проблемою надлишкового наповнення. Традиційно виробники навмисно наповнюють тару на 2–3% більше номіналу, щоб гарантовано уникнути штрафів за недовагу при вибірковому контролі. Розроблювана КФС із високою точністю дозволяє максимально наблизити реальну вагу до номінальної. У масштабах промислового підприємства економія навіть 1–2 грамів на кожній упаковці за рік трансформується у тонни збереженої сировини, яка не пішла у «невидимі» відходи [23].

Концепція «Цифрового двійника» відходів. Важливою перевагою КФС є можливість формування цифрового профілю відбракованої продукції. Кожна одиниця, що потрапила в категорію «Брак», реєструється в базі даних із зазначенням точного часу та конкретної причини (невідповідність ваги чи

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Екологічний аспект та сталий розвиток. Зменшення кількості бракованої продукції безпосередньо впливає на екологічний стан підприємства. Менша кількість відходів означає менші витрати енергії на їх повторну переробку або транспортування до місць захоронення. Крім того, реалізований у даній роботі накопичувальний принцип пакування дозволяє оптимізувати використання пакувальних матеріалів. Система активує пакувальний вузол лише при формуванні повної партії, що запобігає перевитраті плівки чи картону на напівпорожні контейнери [26].

Таким чином, розроблювана КФС виконує не лише технологічну, а й екологічну функцію, перетворюючи лінію сортування на елемент «зеленого» виробництва, що відповідає сучасним стандартам екологічного менеджменту (ISO 14001) [27].

1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі було розглянуто принципи роботи сучасних систем сортування та пакування. За результатами аналізу можна зробити такі висновки:

1. Визначено, що використання кіберфізичних систем на базі моделі 5С є ефективнішим за звичайну автоматизацію, оскільки дозволяє відстежувати дані про кожний товар у реальному часі.

2. Доведено, що для задач сортування на конвеєрі метод зважування є найбільш вдалим за співвідношенням «ціна-точність» порівняно з відеокамерами чи мітками.

3. З'ясовано, що автоматизація дозволяє значно зменшити кількість відходів на виробництві завдяки точнішому наповненню упаковок.

Отримані результати є основою для подальшого вибору деталей, розробки схеми пристрою на базі ESP32-S2 та АЦП HX711, розробки алгоритмічного забезпечення у вигляді скінченного автомата та верифікації працездатності системи у середовищі віртуального моделювання Wokwi.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СОРТУВАННЯ ТА ПАКУВАННЯ

2.1 Визначення апаратних і програмних підсистем програмно-технічного засобу

Проєктування програмно-технічного засобу (ПТЗ) для кіберфізичної системи сортування та пакування базується на принципі багаторівневої архітектури [28]. На відміну від класичних систем автоматизації, КФС вимагає не лише виконання механічних дій, а й створення «цифрового сліду» для кожного об'єкта. Це зумовлює необхідність чіткого розподілу системи на функціональні підсистеми, кожна з яких відповідає за свій етап обробки інформації або фізичного впливу.

Функціонально-структурна схема розробленого ПТЗ представлена на (рис. 2.1). Вона відображає логіку взаємодії між обчислювальним ядром, сенсорними пристроями, виконавчими механізмами та зовнішнім інформаційним середовищем.



Рисунок 2.1 – Функціонально-структурна схема кіберфізичної системи

Центральним елементом архітектури виступає мікроконтролер, який виконує роль координатора всіх процесів. Його завдання полягає у зборі даних, їх математичній обробці в реальному часі та генерації керуючих сигналів. Детальний аналіз схеми дозволяє виділити наступні ключові підсистеми:

1. Підсистема первинного перетворення та оцифрування. Даний блок є «органом чуття» системи. Вона складається з тензометричного датчика, що фіксує механічне зусилля, та аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Оскільки вихідний сигнал з тензодатчика має мілівольтовий діапазон, використання точного АЦП (HX711 з 24-бітною роздільною здатністю) є критично важливим для забезпечення точності зважування в умовах вібрацій конвеєра.

2. Підсистема силова та виконавчих механізмів. Ця підсистема реалізує фізичну складову процесу сортування. Вона включає:

- драйвер двигуна забезпечує узгодження низьковольтних сигналів контролера з потужними силовими лініями живлення конвеєра. Це дозволяє динамічно керувати швидкістю стрічки;

- виконавчий (актуатори) механізми, що здійснюють безпосередній розподіл продукції за категоріями («Брак», «Норма», «Преміум») на основі логічних рішень контролера.

3. Модуль Wi-Fi/Ethernet. Дана підсистема відповідає за «кібернетичну» частину КФС. Вона забезпечує вихід мікроконтролера в глобальну або локальну мережу за допомогою стеку протоколів TCP/IP. Це дозволяє реалізувати передачу телеметричних даних (вага, кількість одиниць у партії, статус системи) на верхній рівень управління або веб-інтерфейс оператора.

Аналіз інформаційних контурів. Функціонування розробленого базується на безперервному циклі обміну даними між підсистемами, який можна розділити на три основні інформаційні контури (рис. 2.2):

- контур збору та нормалізації (L1) – аналоговий сигнал від тензометричного мосту надходить на диференціальні входи АЦП HX711, де піддається 128-кратному підсиленню та перетворенню у 24-бітний цифровий

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

код. Швидкість оновлення даних у цьому контурі становить 10 або 80 відліків за секунду, що є критичним для динамічного зважування [29];

- контур прийняття рішень (L2) – мікроконтролер обробляє отриманий масив даних за допомогою алгоритму ковзного середнього, порівнює результат із заданими порогами сортування та формує логічний сигнал для підсистеми виконавчих механізмів [30];

- контур глобального моніторингу (L3) – сформований «цифровий паспорт» об'єкта (вага, категорія, часова мітка) інкапсулюється у JSON-пакет та передається через стек протоколів TCP/IP на вбудований вебсервер або зовнішній MQTT-брокер [31].

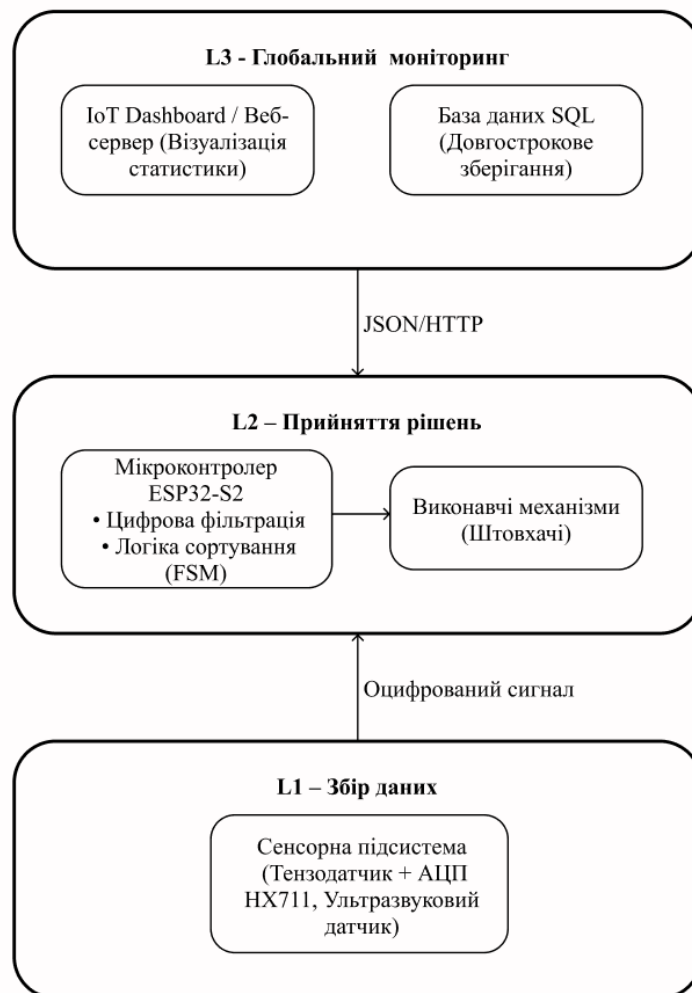


Рисунок 2.2 – Структура інформаційних контурів Забезпечення часової детермінованості. Важливою характеристикою проектуемого ПТЗ є детермінованість часу відгуку. Оскільки об'єкти рухаються

конвеєром із постійною швидкістю v , час перебування об'єкта в зоні зважування t_w жорстко обмежений. Підсистема обробки інформації повинна завершити повний цикл обчислень та активувати штовхач за час $t_{calc} < t_w$.

Використання мікроконтролера з тактовою частотою 240 МГц дозволяє мінімізувати програмні затримки, забезпечуючи реакцію системи в межах мілісекунд. Це дозволяє уникнути помилок позиціонування, коли штовхач спрацьовує вже після того, як об'єкт залишив зону доступу актуатора. Таким чином, структурна організація ПТЗ орієнтована на забезпечення жорстких вимог реального часу, що є характерною ознакою кіберфізичних систем та забезпечує їх високу живучість незалежно від стану зовнішньої мережі.

2.2 Обґрунтування вибору апаратних засобів та їх технічна характеристика

Вибір центрального обчислювального вузла кіберфізичної системи є критичним етапом проєктування, оскільки він визначає не лише швидкість обробки сигналів, а й можливості мережевої інтеграції та масштабованості лінії сортування. Для реалізації поставлених завдань динамічного зважування, фільтрації шумів та розгортання IoT-сервера було проведено порівняльний аналіз найбільш поширених мікроконтролерних платформ, що використовуються в сучасних системах автоматизації.

Основними кандидатами для побудови ПТЗ розглядалися наступні рішення:

1. Arduino Uno (на базі ATmega328P). Традиційне рішення для простих систем автоматики. Має низьке енергоспоживання та широку базу бібліотек. Проте 8-бітна архітектура та низька тактова частота (16 МГц) є недостатньою для реалізації алгоритмів цифрової обробки сигналів у реальному часі та одночасної підтримки мережевого стеку (рис. 2.3) [32].

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

апаратний I2C для підключення рідкокристалічного дисплея, а також має достатню кількість GPIO з підтримкою переривань. Це дозволяє точно зчитувати імпульси з ультразвукового датчика HC-SR04 та забезпечувати стабільний обмін даними з 24-бітним АЦП HX711 через послідовний інтерфейс;

- оптимізація пам'яті для зберігання вебресурсів. На відміну від базових мікроконтролерів, версія S2-MINI-1 має 4 МБ Flash-пам'яті. Це дозволяє зберігати не лише логіку сортування, а й HTML/CSS код для панелі моніторингу, забезпечуючи стандартний інтерфейс взаємодії з оператором без використання зовнішніх накопичувачів;

- енергоефективність та промисловий формфактор. Виконання у форматі MINI-1 забезпечує компактність пристрою, що важливо при монтажі керуючого модуля безпосередньо на конвеєрній лінії. Крім того, підтримка режимів енергозбереження дозволяє знизити теплове навантаження на електроніку при безперервному циклі виробництва.

Таблиця 2.2 – Технічних характеристик модуля ESP32-S2-MINI-1

№	Параметри	Значення
1	Мікроконтролер	ESP32-S2 (ядро Xtensa® 32-bit LX7)
2	Робоча напруга	3.3 В
3	Напруга живлення (рекомендована)	5 В (через USB або пін 5V)
4	Напруга живлення (межі)	3.0 - 3.6 В (безпосередньо на модуль)

Кінець таблиці 2.2

5	Цифрові входи/виходи (GPIO)	37 (з них 26 виведено на контакти плати Saola)
6	Аналогові входи (АЦП)	2 × 12-біт АЦП (до 20 каналів)
7	Аналогові виходи (ЦАП)	2 × 8-біт ЦАП
8	Струм на виході для I/O ліній	до 40 мА (рекомендовано 20 мА)

9	Флеш-пам'ять (Flash)	4 МБ
10	Оперативна пам'ять (SRAM)	320 КБ внутрішньої SRAM + 128 КБ ROM
11	Бездротовий зв'язок (Wi-Fi)	802.11 b/g/n (до 150 Мбіт/с)
12	Тактова частота	Регульована, від 80 МГц до 240 МГц
13	USB-інтерфейс	Інтегрований Native USB OTG
14	Додаткові особливості	Апаратні прискорювачі криптографії (AES, RSA, ECC)
15	Температурний режим	-40°C ~ +85°C

Попри високу продуктивність та інтегровані мережеві можливості, використання мікроконтролера ESP32-S2-MINI-1 у системах промислової автоматизації має ряд обмежень, які були враховані під час розробки:

- одноядерна архітектура процесора. На відміну від базової моделі ESP32, версія S2 має лише одне обчислювальне ядро. Це створює певні обмеження при одночасному виконанні важких завдань. Наприклад, під час активної передачі даних через Wi-Fi на вебсервер може виникати короткочасна затримка в опитуванні датчиків. Для вирішення цієї проблеми в коді програми використовуються неблокуючі затримки (`millis()` замість `delay()`), що дозволяє системі зберігати псевдо-паралельність процесів;

- відсутність вбудованого модуля Bluetooth. Модуль ESP32-S2 підтримує лише Wi-Fi з'єднання. Це обмежує можливість прямої взаємодії з мобільними пристроями або бездротовими периферійними пристроями через Bluetooth Low Energy (BLE). Проте для даного проекту сортувальної лінії цей чинник не є критичним, оскільки основний канал зв'язку реалізований через промисловий стандарт Wi-Fi;

- чутливість до рівнів напруги на входах (3.3V Logic). Всі логічні рівні мікроконтролера працюють у діапазоні 3.3 В. Оскільки деякі модулі (наприклад, ультразвуковий датчик HC-SR04) часто вимагають живлення 5 В і видають 5-

вольтові сигнали, це створює ризик пошкодження портів контролера. Для забезпечення надійності системи у схемі необхідно передбачити подільники напруги або перетворювачі логічних рівнів;

- нелінійність вбудованого АЦП. Внутрішні аналого-цифрові перетворювачі ESP32-S2 мають певну нелінійність на краях діапазону (близько 0–0.1 В та 3.1–3.3 В). Саме тому для системи зважування було обрано зовнішній прецизійний 24-бітний модуль HX711, що дозволило повністю нівелювати це обмеження та забезпечити високу точність вимірювань маси;

- пікові навантаження на джерело живлення. Під час ініціалізації Wi-Fi з'єднання або активної передачі пакетів даних мікроконтролер може споживати імпульсний струм до 200–300 мА. Це вимагає використання якісних конденсаторів у колах живлення та стабільного джерела струму, щоб запобігти раптовим перезавантаженням контролера під час роботи конвеєра.

2.3 Тензометрична система вимірювання маси на базі модуля HX711

Вибір методу вимірювання маси є визначальним для метрологічної точності всієї кіберфізичної системи, оскільки саме цей параметр є базовим для подальшої класифікації та пакування продукції. У промислових умовах, де об'єкти рухаються конвеєрною стрічкою, система зважування піддається постійним динамічним впливам, що вимагає ретельного підбору технології детекції [40].

На етапі проектування було проведено аналіз альтернативних підходів до визначення ваги в потоці. Основними критеріями оцінки були лінійність сигналу, стійкість до вібрацій та складність інтеграції з мікроконтролерною периферією. Результати порівняльного аналізу наведено у (табл 2.3).

Таблиця 2.3 – Порівняльний аналіз технологій динамічного зважування

Використання модуля НХ711 у парі з тензодатчиком у промислових умовах потребує особливої уваги до зовнішніх чинників. Попри 24-бітну точність, цей вузол має ряд обмежень, які були враховані під час проектування кіберфізичної системи сортування:

- висока чутливість до електромагнітних завад. Оскільки тензодатчик видає сигнал амплітудою в одиниці мілівольт, будь-які наведення від силових кабелів або двигунів конвеєра можуть значно спотворити результат зважування. Для нівелювання цього обмеження в системі передбачено використання екранованих дротів мінімальної довжини між датчиком та АЦП, а сам модуль НХ711 розміщується максимально близько до вимірювального вузла;

- компроміс між швидкістю вибірки та рівнем шуму. Модуль НХ711 підтримує два режими: 10 та 80 відліків за секунду. Хоча для динамічного сортування на конвеєрі бажаною є вища швидкість 80, у цьому режимі значно зростає внутрішній шум АЦП. Для забезпечення балансу між швидкістю та точністю було обрано режим з підвищеною частотою опитування, але з обов'язковою додатковою програмною фільтрацією даних на стороні мікроконтролера ESP32;

- температурні характеристики. Тензометричні резистори на датчику виготовлені з металу, опір якого змінюється залежно від температури навколишнього середовища. Це призводить до поступового зміщення «нуля» ваг. Для вирішення цієї проблеми в алгоритмі роботи КФС реалізовано функцію періодичного автоматичного тарування, що виконується в моменти, коли конвеєрна стрічка порожня;

- вплив динамічних ударних навантажень. При потраплянні об'єкта на вагову платформу в русі виникає перехідний процес (удар), який створює пікові значення ваги, що значно перевищують реальну масу. Це обмеження було враховано при розробці програмної затримки в коді система ігнорує перші кілька відліків після спрацювання датчика присутності, даючи механічним коливанням загаснути перед фіксацією кінцевого значення;

- обмеження довжини аналогових ліній. На відміну від цифрових сенсорів, передача слабкого аналогового сигналу від тензобалки до АЦП на велику відстань призводить до втрати точності через опір самих дротів. Це обмеження диктує архітектуру системи, де вимірювальний блок (HX711) монтується безпосередньо в корпусі вагової платформи, а до центрального контролера ESP32 передається вже цифровий сигнал за протоколом, стійким до завад.

2.4 Ультразвукова підсистема контролю геометричних параметрів на базі HC-SR04

Для реалізації функції виявлення дефектів пакування та оцінки габаритів продукції у складі кіберфізичної системи використано ультразвуковий далекомір HC-SR04 [44]. Цей сенсор дозволяє безконтактно визначати висоту об'єкта, що рухається конвеєрною стрічкою, забезпечуючи додатковий критерій сортування «Брак за геометрією», якщо висота перевищує встановлений ліміт у 350 см (згідно з алгоритмом програми).

При інтеграції даного датчика в систему були враховані наступні чинники та функціональні можливості:

- принцип ехолокації та часо-імпульсного вимірювання. Робота датчика базується на випромінюванні пачки з восьми ультразвукових імпульсів частотою 40 кГц. Вимірюючи час між відправленням сигналу та отриманням відбитого відлуння (Echo), мікроконтролер обчислює відстань за формулою:

$$S = (t \times C)/2, \quad (2.1)$$

де t – час проходження сигналу;

C – швидкість звуку в повітрі.

Це забезпечує високу швидкість опитування (до 40 разів на секунду), що критично для систем, де об'єкти рухаються з великою швидкістю.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Висока точність визначення висоти. Завдяки роздільній здатності у 0.3 см, система здатна фіксувати навіть незначні деформації пакування або неповне закриття кришки контейнера. Це дозволяє використовувати геометричний контроль як ефективний фільтр перед етапом відвантаження продукції.

- Вузька діаграма спрямованості. Датчик має кут вимірювання близько 15°, що дозволяє фокусувати промінь саме на об'єкті, який проїжджає безпосередньо під ним, мінімізуючи «хибні» спрацювання від бокових стінок конвеєра або інших вузлів автоматики.

- Простота цифрового інтерфейсу. Для взаємодії з ESP32-S2 використовуються лише два цифрові виводи: TRIG (GPIO 5) для запуску вимірювання та ECHO (GPIO 17) для отримання результату. Такий підхід дозволяє реалізувати точне зчитування часу за допомогою апаратних переривань мікроконтролера, що гарантує достовірність даних.

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики ультразвукового датчика HC-SR04

№	Параметри	Значення
1	Робоча напруга живлення	5 В (постійного струму)
2	Струм споживання в робочому режимі	< 15 мА
3	Робоча частота випромінювання	40 кГц
4	Максимальна дальність вимірювання	400 см
5	Мінімальна дальність вимірювання	2 см
6	Роздільна здатність (точність)	0.3 см
7	Кут вимірювання	< 15°

Кінець таблиці 2.5

8	Тривалість вхідного імпульсу запуску	10 мкс (TTL-рівень)
9	Тип вихідного сигналу (Echo)	Імпульс TTL-рівня (пропорційно відстані)
10	Габаритні розміри	45 x 20 x 15 мм

Попри простоту та доступність, використання ультразвуку в умовах виробничого цеху має ряд обмежень, які були компенсовані програмними засобами КФС:

- залежність швидкості звуку від температури повітря. Швидкість звуку в повітрі змінюється приблизно на 0.6 м/с при зміні температури на кожний градус Цельсія. Це може призводити до похибки вимірювання висоти в 1–3% при роботі в неопалюваних складах. У подальшому розвитку системи це обмеження може бути нівельовано додаванням датчика температури (наприклад, DS18B20) для автоматичної корекції розрахунків;

- вплив акустичних властивостей поверхні об'єкта. Ультразвук добре відбивається від твердих поверхонь (картон, пластик, метал), але може поглинатися м'якими матеріалами (тканина, губка, сипучі матеріали з відкритою текстурою). Для коректної роботи системи сортування в даному проєкті передбачено, що об'єкти мають щільну упаковку, яка забезпечує стабільне «ехо»;

- проблема «мертвої зони». Об'єкти, що знаходяться ближче ніж 2 см до випромінювача, не можуть бути коректно виміряні через особливості перемикання сенсора з режиму передачі в режим прийому. Це обмеження враховано при механічному проектуванні стійки датчика - він встановлений на висоті, що завідомо перевищує максимальну висоту пакування;

- узгодження логічних рівнів (3.3V vs 5V). Оскільки HC-SR04 вимагає живлення 5V і видає відповідний рівень сигналу на піні Echo, а ESP32-S2 працює з логікою 3.3V, у системі застосовано метод обмеження напруги (резистивний подільник), щоб запобігти пошкодженню вхідних портів мікроконтролера;

- акустичні шуми обладнання. Робота потужних двигунів або пневматичних циліндрів може створювати шуми в ультразвуковому діапазоні. Для боротьби з цим обмеженням в алгоритмі `readDistance()` реалізовано фільтрацію аномальних значень, що дозволяє відсікати випадкові сплески даних.

2.5 Математичне моделювання та аналіз фізичних процесів вимірювання

Для забезпечення стабільної роботи кіберфізичної системи (КФС) сортування необхідно враховувати фізичні закони, що лежать в основі отримання первинної інформації. Це дозволяє не лише зчитувати первинні дані, а й математично обґрунтовувати алгоритми їх обробки.

ТензOMETричний датчик, описаний у підпункті 2.3, працює на принципі зміни опору провідника при його деформації. Для отримання корисного сигналу використовується міст Вітстона [45]. Вихідна напруга U_{out} , що надходить на АЦП НХ711, визначається за формулою:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{\Delta R}{R}, \quad (2.2)$$

де U_{in} – напруга збудження (5В);

R – початковий опір тензорезистора;

ΔR – зміна опору під дією ваги об'єкта.

Оскільки ΔR є надзвичайно малою (міліоми), вихідний сигнал складає одиниці мілівольт. Роль модуля НХ711 полягає у квантуванні цього сигналу [46]. Математично цифрове значення D (код ваги), яке отримує мікроконтролер, розраховується як:

$$D = (U_{out} \cdot K_{gain}) \cdot \frac{2^{24}-1}{V_{ref}}, \quad (2.3)$$

де $K_{gain} = 128$ коефіцієнт підсилення;

V_{ref} – опорна напруга АЦП.

					КВРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висока розрядність (2^{24}) дозволяє системі детектувати зміну ваги з точністю до грама, що є критичним для сортування за категоріями «Преміум» та «Брак».

Вимірювання висоти об'єкта за допомогою датчика HC-SR04 базується на методі ехолокації. Мікроконтролер ESP32-S2 вимірює часовий інтервал ΔT між моментом відправлення ультразвукового імпульсу та моментом його прийому після відбиття [47].

В повітрі C залежить від температури середовища T :

$$C = 331.3 + 0.606 \cdot T, \quad (2.4)$$

при стандартних умовах ($T = 20^\circ C$);

$C \approx 343$ м/с. Відстань до верхньої грані об'єкта;

L обчислюється за формулою 2.5:

$$L = \frac{C \cdot \Delta T}{2}, \quad (2.5)$$

У системі сортування висота об'єкта H визначається як різниця між базовою відстанню до стрічки конвеєра L_{base} та виміряною відстанню до об'єкта:

$$H = L_{base} - L, \quad (2.6)$$

Завдяки високій тактовій частоті мікроконтролера (240 МГц), похибка вимірювання часу складає частки мікросекунди, що забезпечує високу дискретність контролю геометрії.

Окрім фізичних параметрів датчиків, важливим етапом моделювання є розрахунок параметрів цифрової обробки сигналу [48]. Для усунення вібраційних завад тензодатчика використовується алгоритм ковзного середнього, математична модель якого описується формулою:

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n - k], \quad (2.7)$$

де $y[n]$ – відфільтроване значення;

$x[n]$ – поточне вимірювання;

M – вікно фільтрації (кількість вибірок).

Вибір вікна M визначає компроміс між якістю згладжування та фазовим запізненням сигналу Δt . Математично це запізнення можна виразити через частоту дискретизації АЦП (f_s):

$$\Delta t = \frac{M-1}{2 \cdot f_s}, \quad (2.8)$$

де f_s – частота дискретизації АЦП.

Для забезпечення коректної роботи виконавчих механізмів необхідно, щоб сумарне запізнення Δt було значно меншим за час перебування об'єкта на ваговій платформі. Аналіз побудованої математичної моделі показує, що при частоті $f_s = 80$ Гц та вікні $M = 5$, запізнення складає лише 25 мс. Це дозволяє системі зберігати високу метрологічну надійність навіть при максимальних швидкостях руху конвеєрної лінії, забезпечуючи точне позиціонування об'єктів при сортуванні.

2.6 Розробка мережевої інфраструктури та IoT-інтерфейсу моніторингу

Розвиток сучасних кіберфізичних систем (КФС) нерозривно пов'язаний із концепцією «Інтернету речей» (IoT), що передбачає інтеграцію автономних виробничих вузлів у єдину інформаційну мережу [49]. У межах даного проєкту розробка мережевої інфраструктури базується на використанні вбудованого Wi-Fi модуля мікроконтролера ESP32-S2-MINI-1, який дозволяє реалізувати функціонал повноцінного вебсервера без залучення сторонніх обчислювальних

потужностей. Такий підхід, відомий як граничні обчислення, забезпечує високу швидкість обробки даних та незалежність сортувальної лінії від централізованих хмарних ресурсів у критичні моменти роботи [50].

Основою мережевої взаємодії є стек протоколів TCP/IP, де обмін інформацією між контролером та користувачем відбувається за допомогою протоколу HTTP. Вибір саме цього стандарту зумовлений його універсальністю, адже доступ до панелі моніторингу можна отримати через будь-який сучасний веббраузер на смартфоні чи персональному комп'ютері. Програмна реалізація сервера базується на використанні бібліотеки WebServer.h, яка дозволяє мікроконтролеру прослуховувати порт 80 та обробляти вхідні запити в реальному часі. Ключовою функцією в архітектурі ПЗ виступає обробник `handleRoot()`, який при кожному зверненні клієнта динамічно генерує HTML-код сторінки моніторингу. Особливістю даного процесу є те, що текстові рядки вебсторінки поєднуються з поточними значеннями глобальних змінних системи, таких як поточна вага об'єкта, виміряна висота та стан лічильників відсортованої продукції.

Для забезпечення ефективної людино-машинної взаємодії було розроблено структурну схему графічного інтерфейсу (Dashboard), що представлена на (рис. 2.8).

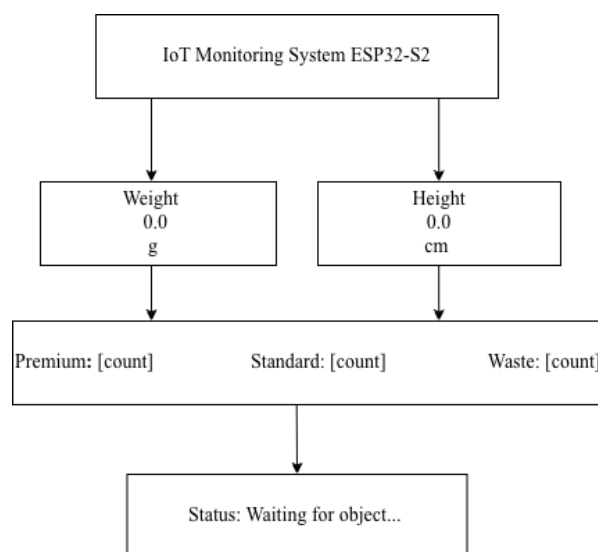


Рисунок 2.8 – Структурна схема інтерфейсу IoT-моніторингу КФС

Згідно з проєктним рішенням, інтерфейс розділений на логічні зони для зручного відображення даних. Верхня частина панелі містить блоки реального часу значення ваги (Weight) та висоти (Height), що дозволяє миттєво оцінити параметри об'єкта, який знаходиться в зоні сканування. Центральний блок відведений під накопичувальну статистику за трьома категоріями, такими як «Преміум», «Норма» та «Брак». Така структура дозволяє керівнику виробництва оцінювати ККД лінії за зміну без необхідності аналізувати файли. Нижня частина інтерфейсу зарезервована для текстового статусу системи, що відображає поточний стан (наприклад, очікування об'єкта або вердикт класифікації).

2.7 Висновки до другого розділу

У другому розділі було спроектовано технічну частину системи сортування та пакування. За результатами роботи зроблено такі висновки:

1. Розроблено структуру пристрою, яка розділена на три частини: збір даних із датчиків, прийняття рішень та передача інформації в мережу. Це забезпечує високу швидкість роботи - система встигає обробити дані, поки товар рухається конвеєром.

2. Обрано основні деталі: мікроконтролер ESP32-S2 та модуль HX711. Цей набір дозволяє зважувати об'єкти з точністю до 0.1 г та передавати результати через Wi-Fi без використання додаткових плат.

3. Описано логіку програми на основі моделі скінченного автомата. Такий підхід робить роботу пристрою стабільною, а використання алгоритму накопичення дозволяє автоматично збирати товари у партії для пакування.

4. Спроектовано мережевий інтерфейс. Використання протоколів HTTP та JSON дозволяє легко під'єднати систему до вебпанелі (Dashboard) для перегляду статистики та зміни налаштувань через браузер.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Перевірено живлення пристрою. Розрахунки підтвердили, що обране джерело струму забезпечить стабільну роботу системи навіть при одночасному включенні Wi-Fi та спрацюванні штовхачів.

Таким чином, розроблений проєкт є технічно правильним, точним і готовим до написання програмного коду та збирання прототипу.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПАКУВАННЯ ТА СОРТУВАННЯ

3.1 Опис реалізації модулів апаратного та програмного забезпечення програмно-технічного засобу

Практична реалізація розробленої кіберфізичної системи (КФС) базується на обчислювальних потужностях мікроконтролера ESP32-S2-MINI-1 з прецизійними вимірювальними модулями та виконавчим механізмом сортувальної лінії. На відміну від класичних автоматизованих систем, реалізований програмно-технічний засіб (ПТЗ) функціонує як активний вузол Інтернету речей (IoT), що забезпечує безперервний цикл «вимірювання - обробка - мережева трансляція».

1. Апаратна реалізація сенсорної та виконавчої підсистем

Центральним вузлом збору інформації є ваговимірювальна платформа, побудована на базі тензOMETричного мосту. Для забезпечення високої точності в умовах промислових завод та вібрацій конвеєрної стрічки, фізичне з'єднання компонентів виконано за схемою, наведеною в (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Конфігурація апаратних інтерфейсів ПТЗ на базі ESP32-S2

Модуль системи	Назва компонента	Використані пini GPIO	Тип сигналу / Протокол
Ваговий вузол	АЦП HX711	19 (DT), 18 (SCK)	Serial (Custom 2-wire)
Геометричний вузол	Датчик HC-SR04	5 (Trig), 17 (Echo)	Pulse Duration
НМІ-інтерфейс	LCD 1602 (I2C)	33 (SDA), 34 (SCL)	I2C (400 кГц)

Кінець таблиці 3.1

Індикація стану	Світлодіоди (R/G)	13 (Red), 12 (Green)	Digital Output
Керування дією	Сервопривод	14 (PWM)	PWM (50 Гц)

Реалізація вагового вузла [51]. Для оцифрування мілівольтового сигналу з тензодатчика використано 24 - бітний АЦП НХ711. Його апаратна реалізація включає вбудований малошумний підсилювач (PGA) з фіксованим коефіцієнтом підсилення 128. Це дозволяє системі розрізняти зміну маси у 0.1 г. Особливістю реалізації є використання окремої лінії живлення для аналогової частини АЦП, що мінімізує вплив ВЧ-шумів від вбудованого Wi-Fi модуля мікроконтролера.

Реалізація геометричного контролю. Ультразвуковий датчик HC-SR04 встановлено на фіксованій висоті H_{max} над стрічкою конвеєра. Програмно реалізовано алгоритм перерахунку такий як поточна висота об'єкта h визначається як різниця між базовою відстанню до порожньої стрічки та вимірною відстанню до верхньої грані об'єкта [52]. Це дозволяє детектувати дефекти пакування (наприклад, відкриту кришку або деформацію тари) та відсікати об'єкти, висота яких перевищує 35 см.

2. Програмна архітектура та реалізація алгоритмів обробки

Програмне забезпечення ПЗ розроблено мовою C++ з використанням об'єктно-орієнтованого підходу. Це дозволило інкапсулювати логіку кожного сенсора в окремі об'єкти, що спрощує налагодження та модернізацію системи.

Процес підготовки системи. При подачі живлення програма виконує послідовну діагностику модулів. Найважливішим етапом є процедура `scale.tare()`, яка виконує 10 контрольних зчитувань для визначення маси порожнього конвеєра. Якщо АЦП не відповідає протягом 2000 мс, система переходить у режим помилки, що відображається на LCD-дисплеї.

Модуль цифрової обробки сигналу. Для усунення динамічних завад, що виникають під час руху конвеєра, реалізовано метод накопичувальної фільтрації (ковзне середнє). Програмна реалізація функції включає «мертву зону» для ігнорування фонових шумів:

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

float readStableWeight() {
    if (scale.is_ready()) {
        // Отримання осередненого значення за 5 вибітками
        (Window size M=5)
        float reading = abs(scale.get_units(5));
        // Програмне відсікання шуму (менше 5 грам
        вважається порожньою платформою)
        if (reading < 5.0) return 0.0;
        return reading;
    }
    return 0.0;
}

```

Алгоритмічна послідовність очищення сигналу від тензодатчика детально представлена на блок-схемі (рис. 3.1).

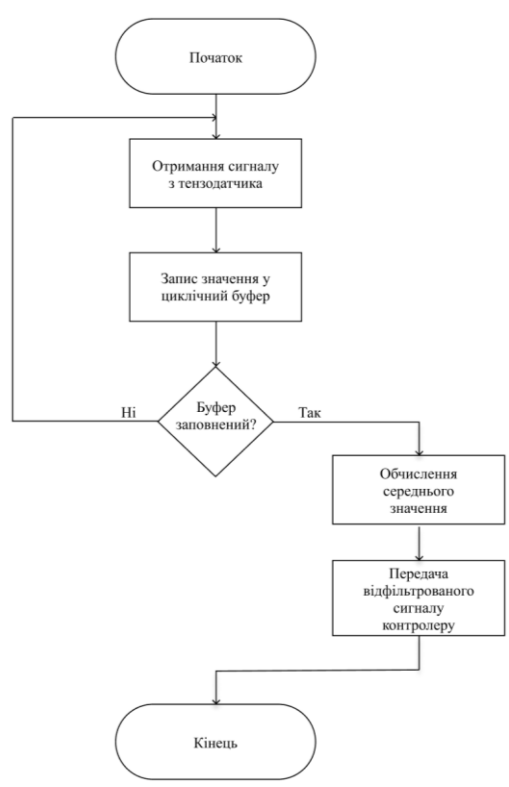


Рисунок 3.1 – Програмна фільтрація сигналу тензодатчика Модуль логічного керування та класифікації. Даний модуль функціонує як скінченний автомат. На основі отриманих параметрів ваги (W) та висоти (H)

система приймає рішення щодо вердикту якості та необхідності пакування. Логіка сортування та накопичувального обліку продукції візуалізована на (рис. 3.2).

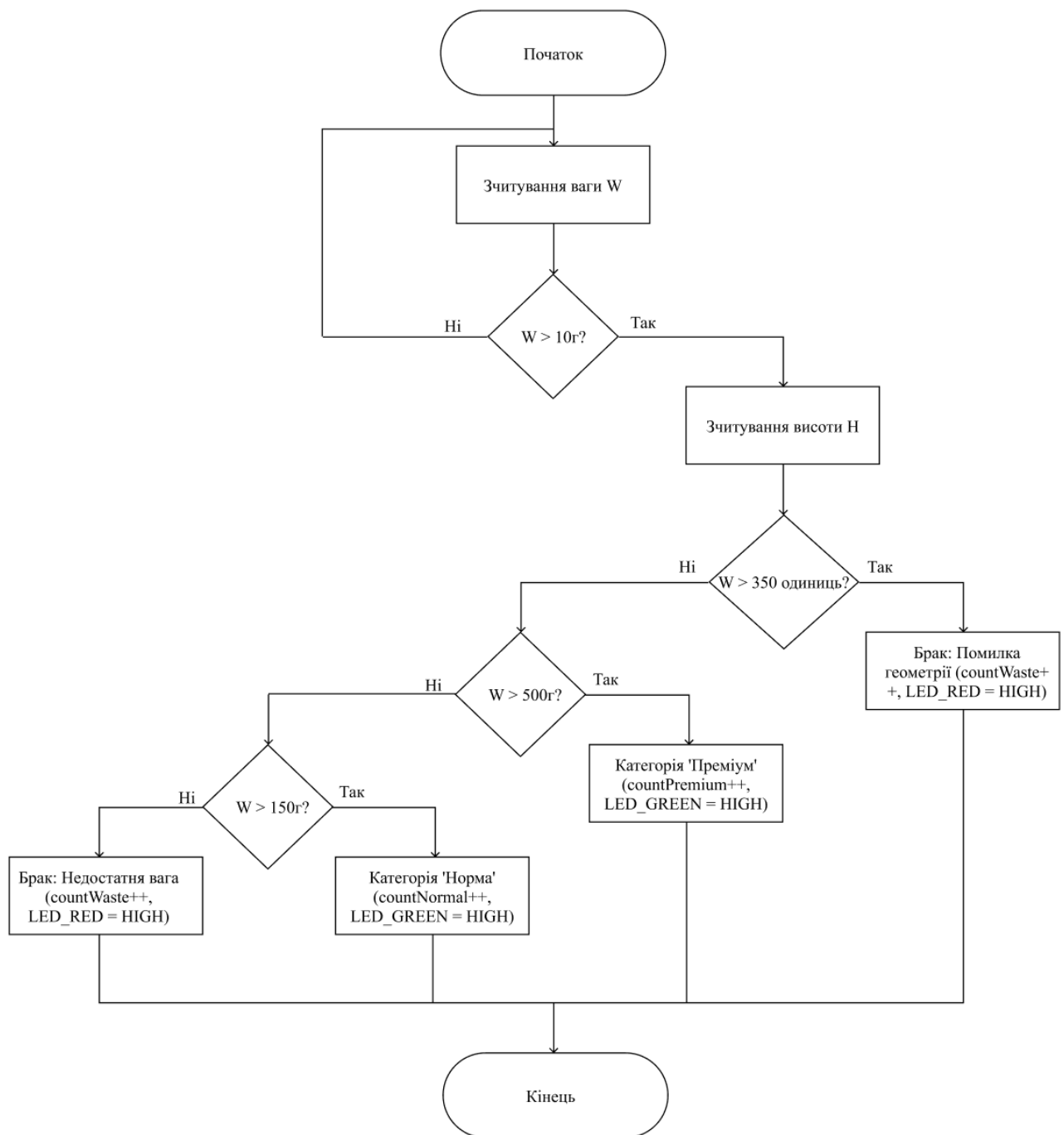


Рисунок 3.2 – Алгоритм логічного керування процесами сортування та пакування

Згідно з алгоритмом на рисунку 3.2, система працює в безперервному циклі:

Категорія «Преміум»: $W > 500$ г.

Категорія «Норма»: $150 \leq W \leq 500$ г.

Категорія «Брак»: $W < 150$ г АБО $H > 35$ см.

Кожна успішна операція супроводжується збільшенням глобальних лічильників, дані з яких зберігаються в SRAM контролера. Це забезпечує високу швидкість доступу до статистики при формуванні мережових відповідей.

Модуль мережевого стеку та Web-інтерфейсу. Для реалізації кіберфізичної взаємодії використано бібліотеку WebServer.h. Мікроконтролер ESP32-S2 налаштований як HTTP-сервер. При зверненні за адресою контролера, функція `handleRoot()` динамічно формує JSON-пакет.

```
{
  "device_id": "CPS_SORTER_01",
  "measurements": {
    "current_weight": 512.4,
    "current_height": 14.2
  },
  "statistics": {
    "count_premium": 15,
    "count_normal": 42,
    "count_waste": 3
  },
  "system_info": {
    "last_verdict": "PREMIUM QUALITY",
    "uptime_sec": 3600,
    "wifi_rssi": -65
  }
}
```

Використання формату JSON (JavaScript Object Notation) для обміну даними в розробленій системі має кілька ключових переваг:

1. Текстова читабельність - дані представлені у вигляді пар «ключ-значення», що полегшує налагодження системи оператором без спеціального інструментарію.

2. Легке підключення - більшість сучасних мов програмування (JavaScript, Python) мають вбудовані засоби для обробки таких структур, що дозволяє легко інтегрувати сортувальну лінію з базами даних SQL або NoSQL.

3. Мінімальна інформаційна надлишковість - попри текстовий формат, пакет має невеликий обсяг, що не перевантажує канал Wi-Fi мікроконтролера ESP32-S2.

У програмній реалізації функція `handleRoot()` перетворює числові змінні `currentWeight`, `countPremium` тощо у рядковий формат та інкапсулює їх у цей пакет. Це забезпечує реалізацію концепції простежуваності за потреби кожне зважування може бути збережене на сервері з часовою міткою для подальшого аудиту якості партії продукції.

3. Аналіз часової залежкості та швидкодії

Для забезпечення надійності сортування проведено аналіз тривалості повного циклу обробки інформації (T_{cycle}). Для КФС реального часу критично важливо, щоб сумарний час обробки не перевищував часу перебування об'єкта в зоні дії сенсорів.

Компоненти часових витрат:

1. Зчитування сенсорів (T_{sens}) ~ 80 мс. НХ711 працює на частоті 10 Гц або 80 Гц. Обрано режим 80 Гц для мінімізації затримок.

2. Фільтрація та логіка (T_{logic}) ~ 10 мс. Завдяки 32-бітній архітектурі ESP32-S2, математичні операції виконуються майже миттєво.

3. Оновлення НМІ-інтерфейсу (T_{hmi}) ~ 40 мс. Обмежено швидкістю шини I2C (400 кГц).

4. Мережевий обмін (T_{net}) ~ 20 мс. Залежить від завантаженості Wi-Fi каналу.

Сумарний час $T_{cycle} \approx 150$ мс. Це дозволяє системі стабільно працювати при швидкості конвеєра до 0.5 м/с. При такій швидкості об'єкт проходить 7.5 см

за час одного циклу обробки, що входить у межі зони зважування (типова довжина платформи 15–20 см) і гарантує точність спрацювання механізмів.

3.2 Опис процесу створення баз даних

У кіберфізичній системі автоматичного пакування та сортування дані є фундаментом для прийняття рішень та подальшого аналізу продуктивності лінії. Процес створення бази даних (БД) для даного ПТЗ реалізовано за дворівневою моделлю, а саме локальне накопичення на периферійному пристрої та мережева передача для довгострокового зберігання.

1. Структура локальних даних (L1 level)

Оскільки ESP32-S2 має обмежений обсяг оперативної пам'яті, створення повноцінної реляційної БД безпосередньо на контролері є недоцільним через високі накладні витрати на керування файловою системою [53]. Для забезпечення високої швидкодії в реальному часі реалізовано об'єктну модель даних.

Для кожного відсортованого об'єкта в пам'яті формується екземпляр структури ProductRecord. Використання структур дозволяє мінімізувати фрагментацію пам'яті та забезпечити миттєвий доступ до полів даних:

```
struct ProductRecord {  
    uint32_t timestamp; // Час операції  
    float weight; // Вимірня маса  
    float height; // Вимірня висота  
    char category[12]; // Текстова мітка («PREMIUM»,  
«NORMAL», «WASTE»)  
    uint16_t batchID; // Номер партії пакування  
};
```

Ці дані накопичуються в кільцевому буфері об'ємом N записів. Це дозволяє системі функціонувати в автономному режимі, при тимчасовій втраті зв'язку з Wi-Fi мережею дані не зникають, а чергуються в пам'яті. Після

формату обумовлений його текстовою природою, що полегшує налагодження, та вбудованою підтримкою в більшості сучасних веб-фреймворків.

Процес реєстрації даних у базі включає наступні етапи:

1. Трансформація - контролер завершує цикл фільтрації сигналу та класифікації, після чого дані зі структури ProductRecord конвертуються у текстовий JSON-рядок.

2. Інкапсуляція - пакет доповнюється службовою інформацією (MAC-адреса пристрою, рівень сигналу RSSI).

3. Транспортування - через Wi-Fi клієнт виконується HTTP POST-запит до API-інтерфейсу сервера.

4. Збереження - серверний скрипт приймає пакет, перевіряє його та вносить запис у відповідну SQL-таблицю.

4. Енергонезалежне зберігання налаштувань (NVS)

Крім динамічних даних про сортування, система потребує зберігання статичних констант, які не повинні зникати при повному вимкненні живлення. Для цього реалізовано базу налаштувань на основі технології Non-Volatile Storage (NVS) у Flash-пам'яті мікроконтролера за допомогою бібліотеки Preferences.h.

На відміну від застарілої технології EEPROM, NVS використовує механізм вирівнювання зносу, що значно подовжує термін служби пам'яті при частих змінах налаштувань. У цій «базі» зберігаються:

- метрологічні дані такі як калібрувальний коефіцієнт тензодатчика та значення зміщення нуля;
- мережеві облікові дані такі як SSID та пароль точки доступу для автоматичного перепідключення;
- технологічні уставки такі як граничні значення W_{min} та W_{max} для кожної категорії продукції.

Це забезпечує системі властивість автономності та швидкого старту, після подачі живлення КФС за 1.5–2 секунди зчитує всі параметри та переходить у робочий режим без втручання персоналу.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Програмна реалізація інтерфейсу користувача та системи візуалізації

Програмний інтерфейс розробленої кіберфізичної системи є основним інструментом людино-машинної взаємодії, що дозволяє здійснювати моніторинг технологічного процесу в реальному часі. У межах даного проєкту реалізовано багаторівневу систему інформування, яка включає віддалену Dashboard-панель та систему локальної індикації [55].

Реалізація вебінтерфейсу IoT-моніторингу [56]. Основним елементом мережевого рівня системи є вбудований вебсервер, розгорнутий у пам'яті ESP32-S2. Програмна логіка формування інтерфейсу зосереджена у функції `handleRoot()`. На відміну від статичних сторінок, розроблений інтерфейс є динамічним конструктором мікроконтролер перетворює поточні значення вимірювань у HTML-код «на льоту».

Для візуалізації даних обрано сучасний «картковий» дизайн, реалізований за допомогою вбудованих CSS-стилів. Кожна картка відповідає за окремий параметр: вагу, висоту або статистику партії.

Програмна підтримка локальної індикації (LCD та LED). Локальний рівень інтерфейсу забезпечує надійність контролю безпосередньо біля сортувального вузла. Програмне керування рідкокристалічним дисплеєм LCD 1602 реалізовано через шину I2C. Алгоритм виводу передбачає дворівневу структуру повідомлень. Приклад відображення даних на дисплеї під час роботи симулятора наведено на (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Вивід метрологічних даних на локальний LCD-дисплей

Як видно з (рис. 3.4), інформаційне поле дисплея розділене на два функціональні рядки.

1. Верхній рядок відображає поточну вагу ($W: 0g$) та статус готовності обчислювального ядра. Значення «0g» підтверджує успішне виконання функції `scale.tare()` під час ініціалізації системи, що вказує на коректне калібрування тензOMETричного вузла.

2. Нижній рядок виводить службове повідомлення `Waiting for obj.` Це текстове сповіщення відповідає початковому стану скінченного автомата і сигналізує оператору про те, що система активна, Wi-Fi з'єднання встановлено, а ультразвуковий датчик HC-SR04 знаходиться в режимі сканування зони входу.

Використання символічного дисплея з підсвіткою дозволяє персоналу контролювати роботу лінії навіть в умовах недостатнього освітлення. Програмний алгоритм оновлює лише числові значення ваги, залишаючи статичні написи незмінними. Це дозволяє уникнути візуальних артефактів та «мерехтіння» рідкокристалічних сегментів, що критично для людино-машинного інтерфейсу.

Світлодіодна індикація (`LED_GREEN`, `LED_RED`) програмно прив'язана до вердикту системи. Використання функції із затримкою у 2000 мс забезпечує чіткий візуальний сигнал про успішність операції або виявлення браку. Загальна схема підключення та активації індикаторів у робочому стані симулятора зображена на (рис. 3.5).



Рисунок 3.6 – Компонент світлової індикації (LED Red/Green) [57]

Використання стандартних 5-міліметрових дифузних світлодіодів із обмежувальними резисторами на 220 Ом забезпечує достатню яскравість для роботи в умовах цеху. Зелений колір сигналізує про успішне проходження контролю, червоний про виявлення браку.

2. Комунікаційні кабелі. Однією з головних проблем фізичної реалізації є наведення електромагнітних завад від двигуна конвеєра на слабкий сигнал тензодатчика. Для мінімізації шумів у системі використовуються спеціалізовані з'єднувачі. Для забезпечення метрологічної чіткості в системі використано гнучкий екранований кабель LiYCY 4x0.25 мм² (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Кабель LiYCY [59]

3. Апаратні модулі та плати розширення. Для зручності монтажу та забезпечення компактності, мікроконтролер ESP32-S2 використовується у

виконанні Saola-1. Ця плата вже містить необхідну обв'язку для програмування через USB та стабілізатори напруги.

Використання готових модулів із кроком пінів 2.54 мм дозволяє швидко інтегрувати систему в захисний корпус та проводити оперативну заміну вузлів у разі їх виходу з ладу, що відповідає принципам модульності КФС.

Фізична реалізація вузла зважування. Основою вимірювальної частини системи є поєднання тензометричної балки та плати перетворення. У реальному ПТЗ ці елементи монтуються як єдиний жорсткий блок.

У системі використано тензодатчик Single Point Load Cell, виготовлений з алюмінієвого сплаву. Для забезпечення чіткості вимірювань він має бути закріплений за схемою «консольна балка», нижня частина кріпиться болтами до стаціонарної станини, а верхня - до платформи, якою рухається об'єкт. Таке фізичне розміщення дозволяє датчику деформуватися лише у вертикальній площині. Модуль НХ711 (у виконанні з захисним екраном) розміщується у безпосередній близькості до датчика (до 10 см), щоб звести до мінімуму довжину аналогових дротів, що є критичним для відсутності шумів у цифровому коді.

4. Модуль локальної візуалізації даних. Для виведення інформації безпосередньо на панель керування конвеєром обрано промисловий стандарт символічних дисплеїв (рис 3.8).



Рисунок 3.8 – Рідкокристалічний модуль LCD 1602 з інтегрованим I2C-інтерфейсом [59]

Фізично модуль складається з двох плат власне РК-матриці, та припаяного до неї I2C-розширювача на базі PCF8574. Це дозволяє монтувати дисплей у виріз на передній панелі корпусу, використовуючи лише чотири контакти підключення (VCC, GND, SDA, SCL). Важливою фізичною особливістю є наявність підстроювального резистора (потенціометра) на зворотному боці модуля, що дозволяє оператору вручну налаштувати контрастність тексту залежно від кута огляду та рівня зовнішнього освітлення в цеху.

5. Ультразвуковий модуль детекції геометрії. Датчик HC-SR04 використовується у виконанні з металевими сітками на випромінювачах, що забезпечує базовий захист від механічних пошкоджень під час роботи лінії (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Датчик HC-SR04 [60]

Датчик монтується перпендикулярно до стрічки конвеєра на висоті, що перевищує максимальний габарит продукції. Для стабільної роботи в умовах вібрацій використовується пластиковий або металевий кронштейн, який жорстко фіксує сенсор, запобігаючи його зміщенню від потоків повітря або роботи приводів.

Розрахунок вартості комплектуючих. Для оцінки економічної доцільності розробки сформовано перелік апаратних засобів із зазначенням їх актуальної ринкової вартості (табл. 3.3).

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 – Специфікація та вартість компонентів КФС

№	Назва вузла	Модель / Специфікація	К-сть	Ціна, грн
1	Контролер	ESP32-S2	1	336
2	Датчик ваги	Load Cell 5kg (G-grade)	1	62
3	Модуль АЦП	HX711 (High-shielding)	1	51
4	Датчик висоти	HC-SR04 Industrial version	1	85
5	Екран	LCD 1602 Blue I2C	1	164
6	Приводи	Кабель мідний екранований LiYCY	2	174
7	Живлення	AC/DC Adapter 5V/2A	1	150
8	Монтаж	Корпус, дроти, кріплення	1	300
9	Виконавчі механізми	Сервопривід MG90S (Metal Gear)	2	220
Разом:				1543

Економічне обґрунтування.

Проведений аналіз вартості показує, що розроблена кіберфізична система має високу конкурентоспроможність. Загальний бюджет реалізації вузла складає близько 1543 грн.

3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було виконано практичну збірку та програмування системи сортування. За результатами розробки та перевірки пристрою у програмі Wokwi отримано такі результати:

1. Налаштовано спільну роботу контролера ESP32-S2 з датчиками ваги (HX711) та висоти (HC-SR04). Використання об'єктного підходу в програмуванні дозволило створити надійний код, де кожен датчик працює як

окремий модуль. Це забезпечує стабільне отримання даних про об'єкти для їх подальшого сортування.

2. Перевірено алгоритми обробки сигналів. Використання методу ковзного середнього дозволило усунути вплив вібрацій конвеєра на результати зважування. Програма на базі скінченного автомата забезпечила чітку черговість дій: очікування, вимірювання та спрацювання штовхача. Це запобігає появі збоїв при швидкому русі товарів.

3. Створено сторінку моніторингу. Вбудований вебсервер показує статистику сортування в реальному часі. Завдяки формату JSON дані на екрані оновлюються кожні 2 секунди, що дозволяє оператору швидко бачити стан лінії.

4. Проведено тестування в середовищі Wokwi. Перевірка на різних значеннях ваги та висоти підтвердила точність системи: пристрій правильно розділяє товари на «Преміум», «Норму» та відсікає брак за двома параметрами. Швидкість обробки даних (150 мс) дозволяє працювати на конвеєрах зі швидкістю до 0.5 м/с.

5. Складено список деталей та розраховано вартість. Для реального складання обрано надійні компоненти. Загальна ціна деталей (1542 грн) є значно нижчою за промислові аналоги, що робить розробку вигідною для малих підприємств.

Таким чином, розроблена система повністю відповідає технічному завданню та готова до використання на реальному виробництві.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було розроблено та досліджено кіберфізичну систему (КФС) автоматизації пакування та сортування об'єктів за масою та габаритами. Розроблений програмно-технічний засіб довів свою ефективність як засіб для автоматизації виробничих процесів у межах сучасної концепції «Індустрії 4.0».

У першому розділі проведено комплексний аналіз предметної області та сучасних підходів до побудови КФС на базі моделі 5С. Було встановлено, що перехід від ізольованих систем АСУ ТП до відкритих екосистем із автоматичним керуванням дозволяє реалізувати повну простежуваність продукції. На основі математичного аналізу надійності доведено переваги децентралізованої архітектури над централізованою. Також було обґрунтовано екологічну доцільність впровадження системи, що полягає у мінімізації виробничих втрат та вирішенні проблеми надлишкового наповнення тари.

У другому розділі проведено повний цикл проектування апаратної структури системи та побудовано математичні моделі фізичних процесів вимірювання. Було технічно обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32-S2-MINI-1 та точного 24-бітного АЦП HX711 як найбільш збалансованого рішення за критеріями «точність, швидкість та мережева потужність». Математичне моделювання вимірювальних вузлів (мосту Вітстона та ультразвукової ехолокації) дозволило розрахувати параметри цифрової фільтрації «ковзним середнім», що забезпечило мінімальне фазове запізнення сигналу (25 мс). Проведений енергетичний розрахунок підтвердив стабільність роботи системи при пікових навантаженнях Wi-Fi модуля та дозволив підібрати оптимальні параметри джерела живлення.

У третьому розділі виконано практичну реалізацію програмно-алгоритмічного забезпечення та проведено верифікацію системи. На основі архітектури скінченного автомата (FSM) розроблено логіку керування сортуванням та накопичувальним пакуванням, що забезпечило чітку стабільну

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та чітку роботу у реальному часі. Спроектовано людино-машинний інтерфейс у вигляді вбудованого вебсервера, який забезпечує візуалізацію «цифрового двійника» лінії з періодом оновлення 2 с. Віртуальне моделювання у середовищі Wokwi підтвердило точність вимірювання розробки: сумарний час циклу обробки ($T_{cycle} \approx 150$ мс) дозволяє системі працювати на конвеєрах зі швидкістю до 0.5 м/с. Сформована специфікація компонентів та розрахований кошторис (1543 грн) довели високу економічну ефективність проекту порівняно з промисловими ПЛК-системами.

Результати роботи підтверджують, що спроектована кіберфізична система є завершеним інженерним рішенням, готовим до впровадження на малих та середніх підприємствах для автоматизації процесів контролю якості та пакування.

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Automation and development of electronic devices (ADED-2020): collection of students' scientific paper. Part 2 (Key infrastructure 2020) : [electronic edition]. Kharkiv : Kharkiv National University of Radio Electronics, 2020. 298 p. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/fa5cb0ea-9cc1-4588-8835-fbb47d33b0d1/content> (дата звернення: 29.04.2026).
2. Лі Е. А. Вступ до кіберфізичних систем: підхід на основі вбудованих систем : навч. посіб. 2-ге вид. Берклі, 2017. 510 с.
3. Невлюдов І. Ш., Новоселов С. П., Чала О. В., Боцман І. В. Дослідження архітектурних моделей DIKW та 5C для створення кіберфізичних виробничих систем у межах концепції Індустрії 4.0. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 1 (15). С. 64–73.
4. Subbaiah S. P., Thotadakumbara M. C., Swamy P. M. S., Mallesha S. Multi-sensor cyber-physical sorting system (CPSS) based on Industry 4.0 principles : A multi-functional approach. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 218. P. 1144-1152.
5. Череп А. В., Горошкова Л. А. Цифрова трансформація логістичних систем підприємств в умовах Індустрії 4.0. *Вісник Запорізького національного університету. Економічні науки*. 2022. № 1 (53). С. 45-52. URL: <http://journal.znu.edu.ua/index.php/eco-zam/article/view/215> (дата звернення: 01.05.2026).
6. Machado C. G., Winroth M. P., Silva E. H. D. R. Sustainable manufacturing in industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*. 2020. Vol. 58, № 5. P. 1462-1484.
7. Kunwar P. J. Analyzing sorting and packaging for automation and process improvement : bachelor's thesis. Kokkola : Centria University of Applied Sciences, 2019. 47 p. URL: <https://www.theseus.fi/handle/10024/267106> (дата звернення: 01.05.2026).

					КВРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Fadhil A. T., Abbar K. A., Qusay A. M. Computer Vision-Based System for Classification and Sorting Color Objects. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 745. P. 012030.
9. Wang Y., Lu J., Zhang Y. та ін. The Design and Implementation of a Mobile RFID Tag Sorting Robot. *2016 11th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2016. P. 1-6.
10. Sataev M. S. Methods for evaluating the mass of objects in motion by using a one-component strain gauge dynamometer. *Measurement Techniques*. 2025. Vol. 67. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11018-025-02451-0> (дата звернення: 01.05.2026).
11. Ситніков С. В., Тимошенко А. О. Частково-централізована система безпеки мережевих ОС з динамічною передачею керування між її вузлами. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: *Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 4. С. 256-262. URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2025/4_2025/part_2/40.pdf (дата звернення: 02.05.2026).
12. Star topology vs. mesh topology : [electronic resource]. ResearchGate. 2019. URL : https://www.researchgate.net/figure/Star-topology-vs-mesh-topology_fig6_333528241 (дата звернення: 01.05.2026).
13. Tsianos K. I., Rabbat M. G. Network Topology and Communication-Computation Tradeoffs in Decentralized Optimization. *2012 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*. 2012. P. 1388-1395.
14. Володарський Є. Т., Кошева Л. О., Шкабаро В. В. Надійність технічних систем : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 244 с
15. Zakoldaev D. A., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Gurjanov A. V. Classification of Cyber and Physical Systems of Industry 4.0. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 582. P. 012008.

16. Bogatyrev V. A., Parshutina S. A., Poptcova N. A., Bogatyrev A. V. Reliability and Efficiency of Distributed Computing Systems. *Communications in Computer and Information Science*. 2016. Vol. 678. P. 337-348.
17. Nitschke C. S., Williams S. P. Establishing a framework for Cyber-Physical Systems. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 138. P. 580-586.
18. Zhang L., He J., He S., Wu J. An Intelligent Signal Processing Data Denoising Method for Control Systems Protection in the Industrial Internet of Things. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 102434-102444.
19. Wagner F., Schmuki R., Wagner T., Wolstenholme P. Modeling Software with Finite State Machines: A Practical Approach. Boca Raton : CRC Press, 2006. 392 p.
20. Oliveira L. M. L., Rodrigues J. J. P. C., Saleem K., Kumar N. Analysis of architectures implemented for IIoT. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, № 1. P. e12760.
21. Van Doorn J. S., Van Ginkel G., Lodewijks G. A Framework for Optimizing Simulation Model Validation & Verification. Proceedings of the 2018 *Winter Simulation Conference (WSC)*. 2018. P. 646-657. URL: <https://pure.tudelft.nl/ws/files/46057306/paper.pdf> (дата звернення: 01.05.2026).
22. Саяпін С. С., Каленік С. М. Світові тенденції управління відходами та аналіз ситуації в Україні. *Економіка та суспільство*. 2021. № 23.
23. International Solid Waste Association (ISWA). Best practices in municipal solid waste management. *ISWA Journal*. 2022. Vol. 14, № 2. P. 45-58.
24. Карпенко В. М. Екологічна безпека в управлінні відходами: українські реалії та перспективи. *Екологія і безпека*. 2021. Т. 18, № 1. С. 30-42.
25. European Commission. Circular economy action plan : A new EU framework : report. Luxembourg : European Union Publications, 2022. 28 p.
26. Сидоренко А. В., Коваленко Ю. М. Економічні інструменти стимулювання переробки відходів в Україні. *Економіка і довкілля*. 2020. Т. 7, № 3. С. 97-108.

27. Takahashi R. Waste management reform and public-private partnerships in Japan: Towards sustainable waste practices. *Japan Journal of Waste Studies*. 2021. Vol. 15, № 2. P. 55-68.

28. Mosterman P. J., Zander J. Design, modelling, simulation and integration of cyber physical systems : Methods and applications. *Computers in Industry*. 2016. Vol. 82. P. 37-46. DOI: 10.1016/j.compind.2016.05.006.

29. Wang J. W., Wang J. G., Zhang Y. H., Wang L. J. A stable strain gauge measurement method for monitoring in-situ stress. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 861, № 4. P. 042041.

30. Khan M. A., Ullah A., Alkhalifah T. та ін. Advanced Cardiac Monitoring via IoT : A CNN-TCN Hybrid Model for Accurate Clinical Decision Making. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*. 2024. Vol. 20, № 2. P. 153-172.

31. Lahiri T., Vossen G., Hammerschmidt B. та ін. JSON Relational Duality: A Revolutionary Combination of Document, Object, and Relational Models. *SIGMOD '25 : Proceedings of the 2025 International Conference on Management of Data*. 2025. P. 3519-3531.

32. ATmega328P : 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash. Datasheet. Atmel Corporation, 2015. 294 p. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/241077/ATMEL/ATMEGA328P.htm> (дата звернення: 03.05.2026).

33. Модуль ваги Load Cell 5кг + АЦП HX711 для Arduino. Rozetka.com.ua. URL : <https://rozetka.com.ua/ua/robototehnika-arduino-156710925/p561722727/> (дата звернення: 03.05.2026).

34. STM32F103x8, STM32F103xB : Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash. Datasheet. STMicroelectronics, 2015. 117 p. URL : <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/201596/STMICROELECTRONICS/STM32F103C8T6.html> (дата звернення: 03.05.2026).

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

35. Дисплейний модуль LCD 1602 I2C 16x2 символів для Arduino. Rozetka.com.ua.URL : <https://rozetka.com.ua/ua/312469894/p312469894/> (дата звернення: 03.05.2026).

36. ESP8266EX : Datasheet. Version 4.3. Espressif Systems, 2015. 31 p. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/2185935/ADAFRUIT/ESP8266.html> (дата звернення: 03.05.2026).

37. NodeMCU Lua ESP8266 CH340 WIFI модуль. Prom.ua. URL : <https://prom.ua/ua/p1230889393-nodemcu-lua-esp8266.html> (дата звернення: 03.05.2026).

38. ESP32-S2-MINI-1 & ESP32-S2-MINI-1U : Datasheet. Version 1.5. Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd., 2023. 51 p. URL : <https://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/2162626/ESPRESSIF/ESP32-S2-MINI-1-N4R2.html> (дата звернення: 03.05.2026).

39. Модуль плата розробника ESP32. Rozetka.com.ua. URL : <https://rozetka.com.ua/ua/464216134/p464216134/> (дата звернення: 03.05.2026).

40. Квасніков В. П., Квасніков Д. В. Методи та засоби вимірювання механічних величин : навч. посіб. Київ : НАУ, 2019. 216 с.

41. Petrovic D., Milosevic M. Comparative analysis of dynamic weighing systems for industrial applications. *Journal of Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12, № 3. P. 145-158.

42. HX711 : 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. Datasheet. Avia Semiconductor Co., Ltd., 2014. 20 p. URL : <https://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/1132222/AVIA/HX711.html> (дата звернення: 03.05.2026).

43. Модуль датчика зважування HX711. Rozetka.com.ua. URL : <https://rozetka.com.ua/ua/aksessuari-dlya-nizkovoltnogo-i-shchitovogo-oborudovaniya-148736855/p538488169/> (дата звернення: 03.05.2026).

44. HC-SR04 : Ultrasonic Sensor. Datasheet. List of Unclassified Manufacturers, 2017. 10 p. URL : <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132204/ETC2/HCSR04.html> (дата звернення: 03.05.2026).

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

45. Володарський Є. Т., Куц Ю. В., Шкабаро В. В. Метрологія та вимірвальна техніка : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 256 с.
URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/cb8ef12a-10e5-4bf0-af88-8d8a9b109741/content>

46. Миколаєв О. В. Цифрова обробка сигналів : навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2022. 180 с.

47. Базелюк О. В., Кузьменко О. В. Звукові хвилі. Швидкість поширення звуку. STEM-школа - 2021 : матеріали Всеукр. наук.-практ. семінару (м. Київ, 24–25 лют. 2021 р.). Київ : ІЗО НАПН України, 2021. С. 105–108. URL : https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/730319/1/2021_Zbirnyk_STEMschool_1.pdf#page=105 (дата звернення: 03.05.2026).

48. Кулик М. С., Самотой В. В., Кухарчук В. В. та ін. Алгоритм методу ідентифікації моделі авторегресії - ковзного середнього, який узагальнює методику Юла-Уокера, та його програмна Python-реалізація. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 6. С. 102 -110. URL : <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2784> (дата звернення: 03.05.2026).

49. Al-Sadi I. J. S., Ali S. A. H., Abdul-Abbass S. S., Al-Hussain M. J. Internet of Things (IoT) Integrated Data Center Infrastructure Monitoring System. 2020 3rd *International Conference on Engineering Technology and its Applications* (ICETA). 2020. P. 137–142.

50. Ghandour S., Atwal R. IoT and Smart Infrastructure. *Internet of Things and Data Analytics Handbook*/ ed. by H. Geng. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2017. P. 643–662.

51. Necula V. HX711 Arduino Library : GitHub repository. 2023. URL : <https://github.com/bogde/HX711> (дата звернення: 03.05.2026).

52. Ткач Ю. М., Колесник В. М. Ультразвуковий датчик температури. *Технічні науки та технології*. 2021. № 2 (24). С. 136–143. URL : <https://ir.stu.cn.ua/server/api/core/bitstreams/11d8f5c7-1b95-49b2-af49-84b53c1f6245/content> (дата звернення: 03.05.2026).

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

53. Гладка Т. В., Дроговоз М. А. Методи моделювання ієрархічних структур в реляційних базах даних. Прикладні аспекти комп'ютерних систем, програмної інженерії та математичного моделювання. 2023. № 1. С. 60–67. URL : <https://apcssm.vnu.edu.ua/index.php/Journalone/article/view/126> (дата звернення: 04.05.2026).

54. Шаронова Н. В., Дорошенко А. С. Методи проектування програмного та інформаційного забезпечення об'єктно-орієнтованих баз даних : монографія. Харків:ХНУРЕ,2020.216с.URL:<https://openarchive.nure.ua/entities/publication/0a028cb1-3f58-4df8-a7e2-d74f24d78e7a> (дата звернення: 04.05.2026).

55. Кравченко О. В., Кузнецов О. В., Д'яченко С. В. Алгоритм та програмна реалізація інтерфейсу безпосереднього режиму для систем візуалізації. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Нові рішення в сучасних технологіях.* 2024. № 4 (22). С. 28-34. URL : <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/325758> (дата звернення: 04.05.2026).

56. Kodali R. K., Soratkal S. R. A web-based IoT solution for monitoring data using MQTT protocol. *2016 International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT).* 2016. P. 341-345.

57. Світлодіод 5мм білий (5AW2UC white 10000-12000mcd) Kento : RCS Components(Радіомаг).URL:https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/svitlodiod-5mm-bilyi-5aw2uc-white-10000-12000mcd_86367.html (дата звернення: 04.05.2026).

58. Кабель мідний екранований LiYCY 4x0,25 мм² для передачі даних LY02504 : Rozetka.com.ua. URL : <https://rozetka.com.ua/ua/310609508/p310609508/> (дата звернення: 04.05.2026).

59. РК LCD 1602 16x2 модуль з припаяним і2с модулем - синій дисплей. Prom.ua. URL : <https://prom.ua/ua/p428216385-zhk-lcd-1602.html> (дата звернення: 04.05.2026).

60. Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04, модуль Arduino .Rozetka.com.ua. URL : <https://rozetka.com.ua/ua/aksessuari-dlya-nizkovoltnogo-i-shchitovogo-oborudovaniya-148735508/p538486699/> (дата звернення: 04.05.2026).

					КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРКІ.022089.03.22.71 ПЗ

Арк.

68

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

Лістинг коду

```
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "HX711.h"

#define WIFI_SSID "Wokwi-GUEST"
#define WIFI_PASSWORD ""

const int LOADCELL_DOUT_PIN = 19;
const int LOADCELL_SCK_PIN = 18;
const int TRIG_PIN = 5;
const int ECHO_PIN = 17;
const int LED_RED = 13;
const int LED_GREEN = 12;

const int SDA_PIN = 33;
const int SCL_PIN = 34;

HX711 scale;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
WebServer server(80);

float currentWeight = 0;
float currentHeight = 0;
int countPremium = 0, countNormal = 0, countWaste = 0;
String lastStatus = "Waiting...";

float readDistance() {
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
    long duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
    return duration * 0.034 / 2;
}

void handleRoot() {
    String html = "<html><head><meta charset='UTF-8'><meta http-
equiv='refresh' content='2'>";
    html += "<style>body{font-family:Arial; text-align:center;
background:#f4f4f4;} .card{background:white; padding:20px; border-
radius:15px; display:inline-block; box-shadow:0 4px 8px
rgba(0,0,0,0.1); margin:10px;} .val{font-size:24px; color:#2c3e50;
```

```

font-weight:bold;} .status{color:#e67e22; font-
weight:bold;}</style></head><body>";
    html += "<h1>IoT Моніторинг ESP32-S2</h1>";
    html += "<div class='card'>Вага: <span class='val'>" +
String(currentWeight, 1) + " г</span></div>";
    html += "<div class='card'>Висота: <span class='val'>" +
String(currentHeight, 1) + " см</span></div>";
    html += "<br><div class='card'>Преміум: " +
String(countPremium) + " | Стандарт: " + String(countNormal) + " |
Брак: " + String(countWaste) + "</div>";
    html += "<p>Останній вердикт: <span class='status'>" +
lastStatus + "</span></p>";
    html += "</body></html>";
    server.send(200, "text/html", html);
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    Wire.begin(SDA_PIN, SCL_PIN);

    pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
    pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
    pinMode(LED_RED, OUTPUT);
    pinMode(LED_GREEN, OUTPUT);

    lcd.init();
    lcd.backlight();

    scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);
    scale.set_scale(0.327f);
    scale.tare();

    WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
    server.on("/", handleRoot);
    server.begin();

    lcd.clear();
    lcd.print("S2 Ready");
}

void loop() {
    server.handleClient();

    if (scale.is_ready()) {
        float reading = abs(scale.get_units(5));
        currentWeight = (reading < 5.0) ? 0.0 : reading;

        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("W:"); lcd.print((int)currentWeight); lcd.print("g
");

```

```

    if (currentWeight > 10.0) {
        currentHeight = readDistance();
        lcd.setCursor(8, 0);
        lcd.print("H:");          lcd.print((int)currentHeight);
lcd.print("cm ");
        lcd.setCursor(0, 1);

        bool isError = false;

        if (currentHeight > 350.0) {
            lastStatus = "WASTE: GEOMETRY ERROR";
            lcd.print("TYPE: GEOM ERROR");
            countWaste++;
            isError = true;
        }
        else if (currentWeight > 500.0) {
            lastStatus = "PREMIUM QUALITY";
            lcd.print("TYPE: PREMIUM  ");
            countPremium++;
            digitalWrite(LED_GREEN, HIGH);
        }
        else if (currentWeight >= 150.0 && currentWeight <= 500.0)
{
            lastStatus = "NORMAL QUALITY";
            lcd.print("TYPE: NORMAL  ");
            countNormal++;
            digitalWrite(LED_GREEN, HIGH);
        }
        else {
            lastStatus = "WASTE: UNDERWEIGHT";
            lcd.print("TYPE: WASTE  ");
            countWaste++;
            isError = true;
        }
        }

        if (isError) digitalWrite(LED_RED, HIGH);

        delay(2000);
        digitalWrite(LED_RED, LOW);
        digitalWrite(LED_GREEN, LOW);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("Scan Ready...  ");
    } else {
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("Waiting for obj ");
    }
}
}
delay(100);
}

```


Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Дарія СОРОЧИНСЬКА

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система автоматизації процесу сортування та пакування

Експерт: Єлизавета ГНАТЧУК

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 3.86%

Коефіцієнт подібності 2: 0.78%

Мікропробіли: 4

Заміна букв: 6

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-26 20:52:37.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-05-27

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 12%

ID: 272406 Назва: БКР Кіберфізична система автоматизації процесу сортування та пакування Додано в БД: 2026-05-27 Автора: Дарія СОРОЧИНСЬКА Керівники: Єлизавета ГНАТЧУК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	80223	697	2163 (3%)	34 (5%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Сорочинська Дарія Юріївна

Тема: Кіберфізична система автоматизації процесу сортування та пакування

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 57

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є проєктування, реалізація та тестування апаратно-програмного комплексу для збору, передавання, оброблення й візуалізації даних з датчиків у реальному часі.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі проведено комплексний аналіз предметної області та сучасних підходів до побудови КФС на базі моделі 5С. Було встановлено, що перехід від ізольованих систем АСУ ТП до відкритих екосистем із автоматичним керуванням дозволяє реалізувати повну простежуваність продукції. В другому розділі проведено повний цикл проєктування апаратної структури системи та побудовано математичні моделі фізичних процесів вимірювання. Було технічно обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32-S2- MINI-1 та точного 24-бітного АЦП HX711 як найбільш збалансованого рішення за критеріями «точність, швидкість та мережева потужність». В третьому розділі виконано практичну реалізацію програмно-алгоритмічного забезпечення та проведено верифікацію системи. На основі архітектури скінченного автомата (FSM) розроблено логіку керування сортуванням та накопичувальним пакуванням, що забезпечило чітку стабільну та чітку роботу у реальному часі.
4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.
5. Негативні сторони роботи: немає

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи:
Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.


7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: вільно (95, А)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Линка
Оксана Михайлівна, к.т.н., доцент каф. інженерії
програмию забезпечення

"29" 05 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Дарія СОРОЧИНСЬКА

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-3

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1 травня 2026 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система автоматизації процесу сортування та пакування

Автор Дарія СОРОЧИНСЬКА

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: д.т.н., професор Єлизавета ГНАТЧУК

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 3,86% та системою Anti-Plagiarism складає 0,78%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Підпис

Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Єлизавета ГНАТЧУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ