

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система раннього виявлення псування продуктів у холодильному
обладнанні
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

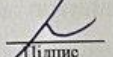
Шифр КвРКІ. 2301122.23.01.41 ПЗ

Виконав здобувач III курсу, група КІ2с-23-1


Підпис

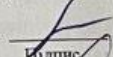
Андрій САК
Ініціали, прізвище

Керівник канд. фіз.-мат. наук, доцент
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер канд. фіз.-мат. наук, доц.
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

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


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

дата

Хмельницький 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

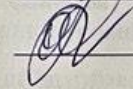
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІПС



Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Саку Андрію Михайловичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні

Керівник проекту (роботи) Кисіль Тетяна Миколаївна, к.ф-м.н, доцент.

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) _____

Теоретичні аспекти раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні

Проектування системи раннього виявлення псування продуктів

Реалізація системи раннього виявлення псування продуктів

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

Архітектура ПЗ проєкту

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Апаратне забезпечення проєкту

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 напряму 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 задач	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проектування системи раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – проектування системи раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

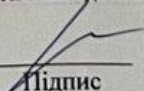
Здобувач


Підпис

Андрій САК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Тетяна КИСІЛЬ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні».

Автор роботи: Андрій САК.

Керівник роботи: Тетяна КИСІЛЬ.

Пояснювальна записка: 60 с., 12 рис., 3 дод., 53 джерела.

Графічна частина: 3 креслення.

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ХОЛОДИЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПСУВАННЯ ПРОДУКТІВ, МОНІТОРИНГ, СЕНСОРНИЙ ВУЗОЛ, ESP32, ГАЗОВИЙ ДАТЧИК.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та реалізації кіберфізичної системи раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні. Актуальність теми зумовлена потребою у своєчасному контролі умов зберігання харчових продуктів, оскільки навіть незначні відхилення температури, вологості або газового складу повітря можуть прискорювати небажані мікробіологічні та хімічні процеси. Традиційний контроль температури не завжди дає змогу оцінити реальний стан продуктів, тому в роботі розглянуто підхід, заснований на багатопараметричному сенсорному моніторингу.

Метою роботи є проектування, реалізація та перевірка програмно-апаратного засобу для збору, передавання, оброблення та відображення даних про стан середовища зберігання продуктів. Для досягнення поставленої мети проаналізовано особливості псування харчових продуктів, розглянуто сучасні підходи до моніторингу холодильного обладнання, обґрунтовано вибір сенсорної бази, розроблено архітектуру системи, структуру даних, алгоритм оцінювання ризику та вебінтерфейс для перегляду результатів.



Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Теоретичні аспекти раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні.....	6
1.1 Особливості зберігання харчових продуктів у холодильному обладнанні та фактори, що впливають на їх якість.....	6
1.2 Основні ознаки та процеси псування продуктів як об'єкт автоматизованого контролю.....	8
1.3 Огляд сучасних підходів і технічних рішень для моніторингу стану продуктів та холодильного обладнання.....	11
1.4 Кіберфізичні системи як основа побудови інтелектуальних систем контролю та моніторингу.....	14
1.5 Обґрунтування необхідності створення кіберфізичної системи раннього виявлення псування продуктів та постановка задачі роботи.....	17
2 Проектування системи раннього виявлення псування продуктів.....	19
2.1 Загальна архітектура системи моніторингу.....	19
2.2 Обґрунтування вибору технічних та програмних засобів реалізації.....	22
2.3 Розроблення структури даних та моделі системи.....	25
2.4 Організація обробки даних та алгоритму виявлення псування.....	28
2.5 Організація взаємодії користувача з системою та відображення результатів.....	32
3 Реалізація системи раннього виявлення псування продуктів.....	36
3.1 Формування апаратної частини сенсорного вузла системи.....	36
3.2 Реалізація програмної логіки збору та передавання сенсорних даних.....	40
3.3 Реалізація серверної частини та бази даних системи.....	45
3.4 Реалізація алгоритму оцінювання ризику псування продуктів.....	50
Висновки.....	56

КвРКІ. 2301122.23.01.41 ПЗ				
Зм	Арк	№ докум.	Підпис	Дата
Виконав		Андрій САК		
Перевід.		Тетяна КИСІЛЬ		
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		
Затвер.		Світлана ПАВЛОВА		
Кіберфізична система раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні			Літера	Аркуш
			у	72
ХНУ КІ2с-23-1				

Перелік джерел посилань	56
Додаток А Копія креслення «Архітектура ПЗ проєкту»	63
Додаток Б Копія креслення «Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи»....	64
Додаток В Копія креслення «Апаратне забезпечення проєкту»	65

					КВРКІ. 2301122.23.01.41 ПЗ	Арк. 2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Зберігання харчових продуктів у холодильному обладнанні є важливою частиною торговельної, складської, логістичної та побутової інфраструктури. Якість продуктів залежить не лише від справності холодильника або камери, а й від того, наскільки стабільно підтримуються умови всередині холодильного об'єму. Температура, вологість і газовий склад повітря безпосередньо впливають на швидкість мікробіологічних, хімічних і фізичних змін, які поступово призводять до втрати свіжості, погіршення запаху, зміни структури та скорочення терміну придатності продукції.

У більшості випадків контроль стану холодильного обладнання зводиться до періодичної перевірки температури або використання простого термостата. Такий підхід дає змогу підтримувати загальний температурний режим, однак не дозволяє своєчасно визначити початкові ознаки псування продуктів. Навіть за нормального середнього значення температури в різних ділянках холодильного об'єму можуть виникати локальні відхилення, пов'язані з нерівномірним розподілом холоду, відкриванням дверцят, порушенням циркуляції повітря або перевантаженням полиць. Крім цього, продукти можуть виділяти леткі сполуки, зокрема аміак, сірководень та інші газові маркери, які з'являються ще до помітних зовнішніх проявів псування.

Особливу практичну цінність має саме раннє виявлення небажаних змін. Якщо система повідомляє про ризик ще на початковому етапі, з'являється можливість вчасно перевірити стан продуктів, усунути порушення режиму зберігання або запобігти втраті всієї партії. Це важливо для магазинів, закладів харчування, складів, невеликих виробництв і побутових користувачів, оскільки псування продуктів пов'язане не тільки з фінансовими збитками, а й із ризиками для здоров'я споживачів.

Метою бакалаврської роботи є розроблення кіберфізичної системи раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні на основі

					КВРКІ. 2301122.23.01.41 ПЗ	Арк. 2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

багатопараметричного моніторингу температури, вологості та газових показників із подальшою обробкою даних і формуванням попереджень про підвищений ризик небажаних змін.

Для досягнення поставленої мети в бакалаврській роботі передбачено аналіз особливостей зберігання харчових продуктів у холодильному обладнанні, розгляд основних ознак і процесів псування, огляд сучасних технічних рішень для моніторингу стану продуктів, обґрунтування кіберфізичної архітектури системи, проектування її апаратних і програмних складових, розроблення структури даних, опис алгоритму обробки показників та організацію взаємодії користувача з вебінтерфейсом.

Об'єктом бакалаврської роботи є процес контролю умов зберігання харчових продуктів у холодильному обладнанні.

Предметом бакалаврської роботи є кіберфізична система раннього виявлення псування продуктів на основі сенсорного моніторингу температури, вологості та газових показників.

Практичне значення бакалаврської роботи полягає у можливості використання запропонованої системи для підвищення надійності контролю холодильного обладнання та своєчасного виявлення ризиків псування продуктів. Запропонований підхід може застосовуватися у холодильних камерах, торговельних вітринах, складських приміщеннях і побутових холодильниках, де важливо забезпечити стабільні умови зберігання та зменшити ймовірність втрати продукції.

У межах бакалаврської роботи розглянуто теоретичні аспекти зберігання харчових продуктів, обґрунтовано вибір сенсорних і програмних засобів, сформовано архітектуру системи, описано структуру даних, алгоритм виявлення ризику псування та спосіб подання результатів користувачу. У підсумку розроблена система розглядається як доступний програмно-апаратний засіб для переходу від простого контролю температури до більш повного й своєчасного моніторингу стану продуктів у холодильному обладнанні.

1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ПСУВАННЯ ПРОДУКТІВ У ХОЛОДИЛЬНОМУ ОБЛАДНАННІ

1.1 Особливості зберігання харчових продуктів у холодильному обладнанні та фактори, що впливають на їх якість

Зберігання харчових продуктів у холодильному обладнанні розглядається як технологічний процес, у межах якого стабільність мікроклімату безпосередньо визначає швидкість біохімічних і мікробіологічних змін. У сучасних умовах холодильні камери, торговельні вітрини та побутові холодильники вже сприймаються не лише як засіб охолодження, а як елемент цілісного ланцюга забезпечення якості та безпеки харчових продуктів. Практика експлуатації показує, що навіть незначні відхилення температурного режиму або вологості здатні прискорювати процеси псування, змінювати органолептичні властивості та скорочувати термін придатності продукції [24, 25]. Саме тому підтримання стабільних умов зберігання набуває ключового значення для збереження якості та споживчих властивостей.

Температура залишається базовим параметром, який визначає інтенсивність більшості процесів, що відбуваються у продуктах під час зберігання. Зниження температури сповільнює розвиток мікроорганізмів і ферментативні реакції, однак повністю не зупиняє їх. У реальних умовах експлуатації холодильного обладнання спостерігаються циклічні коливання температури, пов'язані з роботою компресора, відкриванням дверцят або нерівномірним розподілом холоду всередині камери. Такі коливання призводять до локальних зон перегріву або переохолодження, що створює неоднакові умови для різних груп продуктів і може викликати прискорене погіршення якості окремих позицій [29, 30].

Не менш важливим чинником вважається відносна вологість повітря у холодильному просторі. Надмірно низька вологість сприяє висиханню продуктів, втраті маси та зміні текстури, тоді як підвищена вологість створює

сприятливе середовище для розвитку плісняви та бактерій. У промислових і торговельних системах зберігання контроль вологості вже розглядається як обов'язковий елемент підтримання якості, однак у багатьох випадках цей параметр залишається поза постійним моніторингом, що знижує ефективність усього процесу зберігання [23, 24].

Окрему увагу привертає газовий склад повітря всередині холодильного об'єму. У процесі зберігання багатьох видів продуктів, зокрема м'яса, риби та молочних виробів, у повітря виділяються леткі сполуки, зокрема аміак, сірководень та біогенні аміни. Накопичення таких речовин не лише свідчить про початок небажаних процесів, а й може прискорювати подальше псування. У сучасних роботах газові маркери якості розглядаються як інформативний показник стану продукту, придатний для використання в автоматизованих системах контролю [11, 12]. Це дозволяє перейти від простого контролю температури до більш глибокої оцінки реального стану збереженості харчових продуктів.

Важливу роль відіграє також час зберігання та історія температурних впливів. Навіть за умови дотримання середнього температурного режиму короткочасні, але регулярні порушення можуть накопичуватись і призводити до поступового погіршення якості. У ланцюгах постачання та зберігання дедалі частіше застосовуються показники, що враховують інтегральний вплив температури в часі, оскільки саме вони більш точно відображають реальні умови, в яких перебував продукт [30, 31]. Такий підхід дозволяє оцінювати не лише поточний стан, а й прогнозувати можливі ризики втрати якості.

Конструктивні особливості холодильного обладнання також суттєво впливають на умови зберігання. Розташування вентиляційних каналів, тип системи охолодження, наявність зон примусового обдуву або статичного охолодження формують нерівномірний розподіл температури та вологості всередині камери. Унаслідок цього навіть у межах одного об'єму можуть виникати ділянки з різними умовами, що ускладнює забезпечення стабільної

якості для всіх продуктів одночасно [35, 42]. Це підтверджує доцільність використання багатоточкового контролю параметрів середовища.

У сучасних умовах дедалі більшого значення набуває інтеграція холодильного обладнання з цифровими системами моніторингу. Застосування датчиків температури, вологості та газового складу дозволяє перейти від періодичних перевірок до безперервного спостереження за станом середовища зберігання. Подібні підходи вже активно використовуються у холодових ланцюгах постачання та на промислових об'єктах, де критично важливо забезпечити простежуваність і своєчасне виявлення відхилень [33, 35]. У результаті формується підґрунтя для створення більш інтелектуальних систем контролю, здатних не лише фіксувати параметри, а й інтерпретувати їх з точки зору ризику псування.

Отже, якість зберігання харчових продуктів у холодильному обладнанні визначається сукупністю взаємопов'язаних факторів, серед яких ключову роль відіграють температура, вологість, газовий склад, час зберігання та конструктивні особливості обладнання. Урахування цих чинників у межах єдиної системи контролю дозволяє не просто підтримувати задані режими, а й своєчасно виявляти початкові ознаки небажаних змін, що створює основу для побудови кіберфізичної системи раннього виявлення псування продуктів.

1.2 Основні ознаки та процеси псування продуктів як об'єкт автоматизованого контролю

Псування харчових продуктів розглядається як сукупність взаємопов'язаних фізичних, хімічних і біологічних процесів, унаслідок яких змінюються властивості продукту та знижується його споживча цінність. У межах сучасних підходів до зберігання дедалі частіше використовується уявлення про псування не як про миттєву подію, а як про поступовий процес, що має чітко виражені проміжні стадії. Саме наявність таких стадій створює

можливість для раннього виявлення небажаних змін і застосування автоматизованих засобів контролю [10, 18].

Одним із ключових механізмів погіршення якості вважається мікробіологічна активність. Розмноження бактерій і мікроскопічних грибів супроводжується розкладом білків, жирів і вуглеводів, що призводить до появи сторонніх запахів, зміни консистенції та кольору продуктів. Навіть за умов охолодження ці процеси не припиняються повністю, а лише сповільнюються, що підтверджує необхідність безперервного спостереження за їх перебігом [11, 17]. У цьому контексті псування розглядається як динамічний процес, який може бути описаний через зміну певних вимірюваних параметрів.

Поряд із мікробіологічними чинниками важливу роль відіграють хімічні перетворення, зокрема окиснення жирів і деградація білкових сполук. Такі процеси часто супроводжуються утворенням летких речовин, серед яких аміак, сірководень та різні біогенні аміни. Поява й накопичення цих сполук у повітрі холодильного об'єму вже розглядається як надійний індикатор початкових стадій псування, що відкриває можливість їх використання у системах автоматизованого контролю [12, 50]. Фіксація змін газового складу дозволяє отримати інформацію не лише про факт псування, а й про його інтенсивність.

Фізичні ознаки також залишаються важливими показниками стану продуктів. До них належать зміни текстури, поява слизу на поверхні, порушення структури тканин, а також зміна кольору. Хоча частина таких ознак традиційно оцінюється візуально, сучасні підходи дедалі частіше орієнтуються на непрямі вимірювані параметри, які корелюють із цими змінами. Наприклад, коливання температури та вологості у поєднанні з часовим фактором дозволяють оцінити ризик прискореного погіршення якості ще до появи явно помітних дефектів [24, 31].

Окрему групу показників формують параметри, пов'язані з інтегральною оцінкою умов зберігання. У сучасних системах контролю вже використовується підхід, за якого враховується не лише поточне значення температури, а й уся

історія її змін за певний період. Така інформація дозволяє точніше описати реальні умови, в яких перебував продукт, і зробити висновки щодо ймовірності втрати якості в найближчому майбутньому [30, 33]. Це переводить задачу контролю з рівня простого вимірювання параметрів на рівень аналізу їх динаміки.

З огляду на різноманітність механізмів псування, сучасні підходи дедалі частіше спираються на багатопараметричний контроль. Поєднання даних про температуру, вологість і газовий склад середовища дозволяє сформувати більш повну картину стану продуктів, ніж використання лише одного показника. Досвід застосування електронних «нюхових» систем і газових сенсорів підтверджує, що комплексна оцінка параметрів середовища підвищує точність виявлення початкових стадій псування [7, 22]. Це створює підґрунтя для побудови систем, здатних не тільки реєструвати відхилення, а й інтерпретувати їх у контексті якості зберігання.

У межах автоматизованого контролю важливим стає питання формалізації ознак псування у вигляді вимірюваних сигналів. Такі сигнали можуть формуватися як безпосередньо з датчиків середовища, так і в результаті обробки та узагальнення даних за певний інтервал часу. Перехід від якісних описів стану продуктів до кількісних показників дозволяє інтегрувати процес контролю у кіберфізичні системи та реалізувати алгоритми раннього виявлення небажаних змін [1, 49]. Унаслідок цього псування перестає бути подією, що фіксується постфактум, і розглядається як процес, перебіг якого піддається безперервному спостереженню.

Отже, основні ознаки та процеси псування харчових продуктів характеризуються багатофакторною природою та поступовим розвитком у часі. Мікробіологічні, хімічні й фізичні зміни формують набір параметрів, придатних для інструментального контролю, що створює передумови для їх використання в автоматизованих системах моніторингу. Такий підхід дозволяє перейти від реактивного контролю якості до превентивного виявлення ризиків і закладає

основу для реалізації кіберфізичної системи раннього виявлення псування продуктів.

1.3 Огляд сучасних підходів і технічних рішень для моніторингу стану продуктів та холодильного обладнання

Одним із найпоширеніших рішень у сфері холодової логістики є багатоточковий температурний контроль у реальному часі. Наприклад, у низці холодильних складів використано мережу датчиків DS18B20, які розміщено у різних зонах камери, й дані передаються через Wi-Fi на центральний сервер для аналізу, датчик зображено на рисунку 1.1. Така система дозволяє відстежувати температурні коливання у кожній точці та визначати «теплі зони» в режимі онлайн [30]. Саме на основі подібних систем у великих супермаркетах і логістичних центрах формують графіки температурних профілів, що використовуються для оцінки загальної якості зберігання.

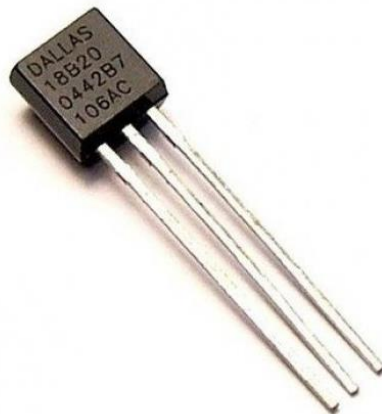


Рисунок 1.1 - DS18B20 [51]

Ще один приклад - використання індикаторів time-temperature indicators (ТТІ) у холодних ланцюгах для овочів і фруктів. Такі індикатори представляють собою мітки, які змінюють колір залежно від сумарного впливу температури протягом часу. В експериментальних впровадженнях на складах ягідників було

показано, що порівняння ТТІ-міток із даними традиційних логерів температури дозволяє більш точно ідентифікувати партії, які зазнали критичних відхилень, навіть якщо середнє значення температури залишалося в межах норми [29, 31].

У рамках промислового моніторингу кондиціонування та холодильних систем застосовано IoT-платформи, де дані із сенсорів температури й вологості збираються модулями на базі ESP32, який зображений на рисунку 1.2 та передаються через MQTT на хмарний сервер. Там графіки, тренди й попередження доступні через веб-інтерфейс. Подібні рішення впроваджено у ланцюгах постачання м'яса та молочних продуктів, де контроль мікроклімату необхідний 24/7, а віддалений доступ до показників дозволяє технічному персоналу оперативно реагувати на відхилення [35, 38].

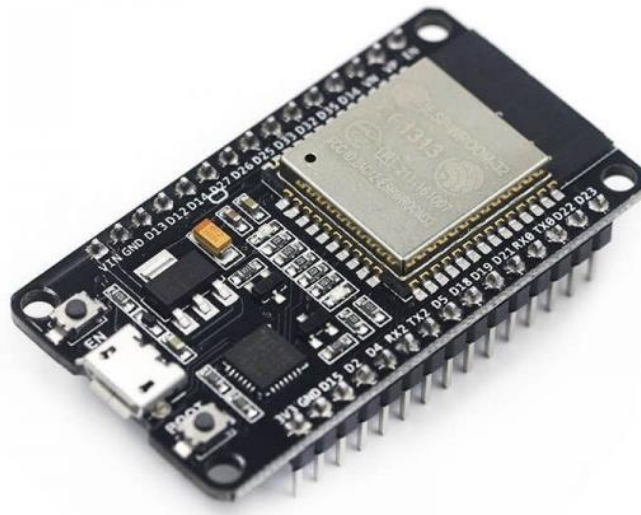


Рисунок 1.2 - ESP32 [52]

Конкретним прикладом використання RFID/NFC-міток для контролю умов зберігання є рішення, де кожна партія продуктів має наклеєну активну RFID-мітку з датчиком температури, яка під час проходження через точки контролю зчитується за допомогою портативних терміналів. При реалізації такої схеми на складах охолоджених морепродуктів стало можливим не лише відслідковувати історію температури партії в цілому, а й формувати базу даних для аналізу повторюваності відхилень при зберіганні конкретних позицій [28, 27].

Особливо цікавим є приклад системи електронного «нюху» (electronic nose) для оцінки свіжості м'яса та риби, яка реалізована на базі масиву газових сенсорів (наприклад, MQ-135, який зображений на рисунку 1.3, для аміаку, сірководню та VOC-газів). Дані сенсорів зчитуються через мікроконтролер та обробляються алгоритмом класифікації, що дозволяє розрізняти сигнали, характерні для свіжого й псованого продукту. Такі системи випробовувалися у лабораторних умовах холодильного обладнання й продемонстрували здатність відрізняти стадії псування м'яса ще до появи явних органолептичних ознак [7, 11].



Рисунок 1.3 - MQ-135 [53]

У холодових ланцюгах також застосовано LPWAN-мережі (LoRaWAN) для передачі даних від сенсорних вузлів у віддалених логістичних точках. Наприклад, у транспортних контейнерах, що переміщуються між складами, використовуються датчики температури й вологості, які через LoRa-шлюз передають дані на сервер для аналізу. Такий підхід дозволяє економно передавати дані на великі відстані без необхідності у Wi-Fi або мобільному зв'язку, що особливо актуально для міжнародних перевезень охолоджених продуктів [38, 39].

Для оцінки комплексного стану холодового обладнання й продуктів застосовано аналітику поточкових даних та виявлення аномалій. В одному з кейсів на базі моделей машинного навчання створено алгоритм, що аналізує не лише окремі значення температури чи вологості, а й їх динаміку, швидкість

зміни, частоту циклів компресора та інші характеристики. Така система дозволяє виявляти тенденції, які не завжди попадають у прості порогові значення, але вказують на потенційні проблеми, наприклад, несправність ущільнювача дверей холодильника або блок вентилятора. Завдяки цьому оператори отримують можливість раннього втручання до того, як відбудеться суттєве погіршення стану продуктів [33, 35].

Ці приклади ілюструють, що сучасні підходи до моніторингу холодильних умов не обмежуються простим вимірюванням температури, а використовують багатопараметричний контроль, бездротові технології, IoT-архітектури, сенсорні мітки та інтелектуальну обробку даних. Такий практичний досвід створює основу для побудови кіберфізичних систем, що здатні не лише фіксувати відхилення, а й прогнозувати потенційні ризики псування продуктів у реальному часі. Посилання на приклади.

1.4 Кіберфізичні системи як основа побудови інтелектуальних систем контролю та моніторингу

Кіберфізичні системи у сучасному технічному середовищі розглядаються як поєднання фізичних об'єктів, сенсорних засобів, обчислювальної частини та програмної логіки, що працюють у єдиному замкненому контурі. У межах такого підходу вимірювання параметрів середовища, їх передавання, обробка та формування керувальних або інформаційних впливів уже не існують окремо, а утворюють цілісну систему, орієнтовану на безперервну взаємодію з реальним об'єктом. Саме ця властивість робить кіберфізичні системи придатними для задач моніторингу, де важливо не лише фіксувати значення параметрів, а й інтерпретувати їх у контексті поточного стану та динаміки процесів [35, 33].

У задачах контролю умов зберігання харчових продуктів кіберфізичний підхід дозволяє об'єднати різноманітні джерела даних у єдину інформаційну модель. Температура, вологість, газовий склад повітря, події відкривання дверей

або зміни режимів роботи обладнання перестають бути окремими показниками і розглядаються як частини одного процесу. У результаті формується можливість не лише реєструвати відхилення, а й аналізувати причинно-наслідкові зв'язки між подіями та змінами параметрів середовища [23, 35]. Такий підхід особливо важливий для раннього виявлення небажаних тенденцій, коли окремі показники ще не виходять за допустимі межі, але їх спільна поведінка вже сигналізує про підвищений ризик.

Архітектурно кіберфізичні системи зазвичай будуються як розподілена структура, у якій на нижньому рівні розміщуються сенсорні вузли, що здійснюють безпосередній збір даних із фізичного середовища. Ці вузли передають інформацію до обчислювальної частини, де відбувається фільтрація, агрегація та аналіз показників, після чого результати відображаються у вигляді станів, попереджень або прогнозів. У практичних реалізаціях для таких задач уже активно використовується підхід IoT, що забезпечує масштабованість і можливість віддаленого доступу до даних з холодильного обладнання або складських приміщень [38, 35]. Завдяки цьому моніторинг перестає бути локальною функцією окремого пристрою й перетворюється на елемент інформаційної інфраструктури.

Важливою рисою кіберфізичних систем є наявність замкненого контуру «вимірювання - аналіз - реакція». Навіть у випадку, коли система не здійснює пряме керування обладнанням, а лише формує повідомлення або попередження, вона все одно впливає на процес експлуатації через зміну дій персоналу або режимів обслуговування. У сфері холодильного зберігання це означає можливість своєчасно виявити нестабільну роботу обладнання, порушення герметичності або нетипову динаміку параметрів і вжити заходів ще до того, як якість продуктів почне суттєво погіршуватися [33, 35]. Такий підхід переводить систему з пасивного реєстратора у роль активного елемента підтримки якості.

Ще однією суттєвою перевагою кіберфізичних систем вважається можливість інтелектуальної обробки даних. На практиці це означає

використання не лише порогових правил, а й методів аналізу трендів, виявлення аномалій та оцінки характерних шаблонів поведінки параметрів. У задачах моніторингу холодильного обладнання такі методи дозволяють, наприклад, відрізнити короткочасне допустиме коливання температури від систематичної проблеми, пов'язаної з несправністю або неправильним режимом експлуатації [33, 22]. У поєднанні з багатоканальними вимірюваннями це створює основу для більш надійної та стійкої системи контролю.

Кіберфізичний підхід також спрощує інтеграцію різних типів сенсорів і джерел даних. У межах однієї системи можуть одночасно використовуватися класичні датчики температури та вологості, бездротові сенсорні мітки, а також газові сенсори, орієнтовані на виявлення летких маркерів псування. Об'єднання таких даних у спільному інформаційному просторі дозволяє отримати більш повну картину стану як середовища, так і самих продуктів [7, 11]. Це особливо важливо для реалізації концепції раннього виявлення, коли рішення ґрунтується не на одному показнику, а на їх сукупності.

У сучасних реалізаціях кіберфізичних систем значну увагу приділяється питанням надійності, масштабованості та енергоефективності. Застосування бездротових технологій зв'язку та протоколів із низьким енергоспоживанням дозволяє розміщувати сенсорні вузли без складної інфраструктури та підтримувати їхню роботу протягом тривалого часу. Це особливо актуально для холодильних камер, складських приміщень і транспортних контейнерів, де прокладання кабелів є ускладненим або економічно недоцільним [38, 39]. Унаслідок цього кіберфізичні системи стають не лише функціонально ефективними, а й практично придатними для реального впровадження.

Отже, кіберфізичні системи формують технологічну основу для побудови інтелектуальних систем контролю та моніторингу, у яких поєднуються сенсорні вимірювання, обчислювальна обробка та логіка прийняття рішень. Застосування такого підходу у задачах зберігання харчових продуктів дозволяє перейти від фрагментарного контролю окремих параметрів до комплексної оцінки стану

середовища та продуктів, що створює передумови для реалізації ефективної системи раннього виявлення псування на базі кіберфізичної архітектури [35, 23].

1.5 Обґрунтування необхідності створення кіберфізичної системи раннього виявлення псування продуктів та постановка задачі роботи

Практика експлуатації холодильного обладнання показала, що традиційний контроль умов зберігання, зосереджений переважно на перевірці температури, вже не забезпечує належного рівня захисту якості харчових продуктів. Навіть за дотримання середніх нормативних значень спостерігаються ситуації, коли локальні коливання, повторювані короткочасні відхилення або нерівномірний розподіл холоду призводять до прискореного погіршення стану продукції.

Додатковим аргументом на користь такого підходу стала наявність прямих і непрямих маркерів псування, зокрема летких сполук, які з'являються ще на ранніх стадіях деградації продуктів. Сучасні роботи підтвердили, що газові показники можуть слугувати інформативним індикатором змін якості ще до появи виразних органолептичних ознак [11, 12]. Унаслідок цього контроль газового складу поряд із температурою та вологістю розглядається як перспективний напрям підвищення надійності систем зберігання.

Разом із цим у сфері холодних ланцюгів і складської інфраструктури вже сформувалася тенденція до використання розподілених сенсорних мереж і IoT-рішень для безперервного збирання та аналізу даних. Такі підходи дозволили перейти від періодичних перевірок до постійного спостереження за станом обладнання та середовища, а також до накопичення історії параметрів для подальшої аналітики [35, 33]. Однак у більшості наявних рішень основний акцент зроблено на реєстрації відхилень, тоді як задача раннього виявлення ризиків псування, заснована на інтерпретації сукупності показників, часто залишається другорядною.

Саме в цьому контексті кіберфізичний підхід набуває особливої актуальності. Поєднання сенсорних вимірювань, обчислювальної обробки та програмної логіки в єдиній системі створює можливість не лише фіксувати параметри, а й оцінювати їх взаємозв'язок і динаміку у часі. Такий підхід дозволяє переходити від реактивного контролю, коли проблема фіксується постфактум, до превентивного, коли система сигналізує про небезпечні тенденції ще до настання критичного стану [33, 22]. У сфері зберігання харчових продуктів це має особливе значення, оскільки навіть незначне випередження у часі може запобігти втратам партії продукції.

У межах цієї роботи сформульовано задачу створення програмно-апаратного засобу, який забезпечує безперервний збір даних про параметри середовища у холодильному обладнанні, їх обробку та інтерпретацію з позиції ризику псування продуктів. Передбачено реалізацію сенсорного рівня для вимірювання температури, вологості та газового складу, обчислювальної частини для аналізу показників і програмного модуля для візуалізації стану та формування попереджень. Такий підхід дозволяє розглядати систему не як набір окремих датчиків, а як цілісний кіберфізичний комплекс, орієнтований на підтримку якості зберігання.

У підсумку постановка задачі зводиться до розроблення кіберфізичної системи, здатної в реальному часі збирати та аналізувати багатопараметричні дані про умови зберігання і на їх основі виявляти початкові ознаки небажаних змін стану продуктів.

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ПСУВАННЯ ПРОДУКТІВ

2.1 Загальна архітектура системи моніторингу

У межах цієї бакалаврської роботи загальну архітектуру системи раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні сформовано як багаторівневу структуру, у якій поєднано процеси збору, передавання, обробки та візуалізації даних. Такий підхід дозволяє розглядати систему не як набір окремих компонентів, а як цілісний інформаційний механізм, орієнтований на безперервне спостереження за умовами зберігання та своєчасне виявлення небажаних змін.

Архітектура системи побудована за принципом розподілу функцій між окремими рівнями, кожен із яких виконує чітко визначену роль у загальному процесі обробки інформації. На нижньому рівні розташовано джерела даних, якими виступають сенсорні модулі, що здійснюють вимірювання параметрів середовища у холодильному обладнанні. До таких параметрів належать температура, відносна вологість та показники газового складу повітря, що дозволяють фіксувати як прямі, так і непрямі ознаки змін стану продуктів. Збір даних на цьому рівні здійснюється з певною періодичністю, що забезпечує формування послідовності вимірювань у часі та створює основу для подальшого аналізу.

Наступним елементом архітектури виступає рівень попередньої обробки та передавання даних. На цьому рівні здійснено інтеграцію сенсорних модулів із мікроконтролерним або вбудованим обчислювальним пристроєм, який виконує функції збору сигналів, їх первинної фільтрації та підготовки до передавання. Обробка на цьому етапі передбачає усунення шумів, перевірку коректності значень, нормалізацію показників та формування уніфікованої структури даних. Після цього інформація передається до серверної частини системи із

використанням мережевих протоколів, що забезпечують надійний обмін даними у реальному часі або з незначною затримкою.

Ключову роль у функціонуванні системи відіграє серверний рівень, на якому реалізовано основні функції зберігання, обробки та аналізу даних. Саме тут формується централізована база даних, у якій накопичуються результати вимірювань у вигляді часових рядів. Така організація зберігання дозволяє не лише відображати поточний стан параметрів, а й аналізувати їхню зміну у часі, виявляти закономірності та оцінювати тенденції. Обчислювальна частина серверного рівня виконує обробку отриманих даних відповідно до заданих алгоритмів, що передбачають виявлення відхилень, оцінку ризиків та формування сигналів попередження. Загальна архітектура системи раннього виявлення псування продуктів зображена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Загальна архітектура системи раннього виявлення псування продуктів

Важливим компонентом архітектури є модуль аналітики, який забезпечує інтерпретацію зібраних даних. У межах цього модуля реалізовано логіку, що враховує взаємозв'язок параметрів середовища, їх зміну у часі та відхилення від допустимих значень. Аналіз не обмежується перевіркою граничних умов, а передбачає оцінку динаміки показників, що дозволяє виявляти потенційно

небезпечні ситуації ще до досягнення критичних значень. Саме на цьому рівні формується інформаційна основа для раннього виявлення псування продуктів.

Окремий рівень архітектури становить підсистема взаємодії з користувачем, яка реалізована у вигляді веб-інтерфейсу або програмного додатка. У цьому інтерфейсі відображаються поточні значення параметрів, графіки змін, історичні дані та повідомлення про виявлені відхилення. Візуалізація інформації у зручному та наочному вигляді дозволяє швидко оцінити стан системи та прийняти відповідні рішення. Передбачено також можливість формування сповіщень у разі виникнення небезпечних ситуацій, що підвищує оперативність реагування.

З точки зору логіки функціонування, система працює за послідовністю «збір даних – передавання – збереження – аналіз – відображення». Кожен етап цього ланцюга є взаємопов'язаним і впливає на загальну ефективність роботи системи. Порушення або затримки на будь-якому з рівнів можуть призвести до втрати актуальності інформації або зниження точності оцінки стану середовища, що враховано при формуванні архітектурних рішень.

Важливою характеристикою запропонованої архітектури є її масштабованість та гнучкість. Система передбачає можливість підключення додаткових сенсорних вузлів, розширення функціоналу обробки даних та інтеграції з іншими інформаційними системами. Це дозволяє адаптувати рішення до різних умов експлуатації - від невеликих холодильних установок до складських комплексів або логістичних систем.

Сформована архітектура системи моніторингу забезпечує цілісний підхід до контролю умов зберігання харчових продуктів, поєднуючи збір даних, їх обробку та інтерпретацію у єдиному інформаційному середовищі. Це створює основу для реалізації ефективного механізму раннього виявлення псування, що підвищує надійність і практичну цінність системи у реальних умовах експлуатації.

2.2 Обґрунтування вибору технічних та програмних засобів реалізації

У межах цієї бакалаврської роботи вибір технічних і програмних засобів реалізації інформаційної системи раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні здійснено з урахуванням вимог до надійності, точності вимірювань, можливості безперервного моніторингу, вартості впровадження та зручності подальшої експлуатації. Основна увага приділена забезпеченню стабільної роботи системи в умовах підвищеної вологості, перепадів температури та обмеженого доступу до обладнання, що є характерним для холодильних камер і складських приміщень.

Формування технічної частини системи розпочато з вибору сенсорних елементів, які виступають основним джерелом даних. Для вимірювання температури обрано цифрові датчики, що забезпечують достатню точність і стабільність показників у діапазоні, характерному для холодильного обладнання. Використання цифрових сенсорів дозволяє мінімізувати вплив шумів і спрощує інтеграцію з обчислювальним модулем. Для контролю відносної вологості застосовано комбіновані датчики, які одночасно вимірюють температуру та вологість, що зменшує кількість компонентів і спрощує схему підключення. Такий підхід дозволяє отримати узгоджені дані про стан середовища та підвищити інформативність системи.

Особливу увагу приділено вибору газових сенсорів, оскільки саме вони забезпечують можливість раннього виявлення процесів псування продуктів. Обрано сенсори, чутливі до летких сполук, зокрема аміаку та органічних газів, які утворюються в процесі розкладу білків і жирів. Хоча такі датчики можуть мати певні обмеження щодо точності абсолютних значень, їх використання є доцільним у задачах виявлення тенденцій і змін, що відповідає логіці роботи системи. Поєднання температурних, вологісних і газових показників дозволяє сформувати більш повну картину стану середовища зберігання.

Як обчислювальну основу системи обрано мікроконтролерну платформу, яка забезпечує баланс між продуктивністю, енергоспоживанням і вартістю. Використання сучасних мікроконтролерів із вбудованими засобами бездротового зв'язку дозволяє реалізувати функції збору, первинної обробки та передавання даних без необхідності додаткових модулів. Такий підхід спрощує апаратну частину, зменшує кількість з'єднань і підвищує загальну надійність системи. Крім того, обрана платформа підтримує роботу з різними інтерфейсами підключення сенсорів, що забезпечує гнучкість при розширенні функціоналу.

Для організації передавання даних використано бездротову технологію зв'язку, яка дозволяє уникнути прокладання кабелів у складних умовах холодильного обладнання. Використання мережевих протоколів прикладного рівня забезпечує уніфікований формат обміну даними між клієнтською та серверною частинами системи. Передавання здійснюється з урахуванням можливих затримок і перебоїв у зв'язку, що передбачає буферизацію даних і повторну відправку у разі втрати з'єднання.

Програмна частина системи побудована за клієнт-серверною архітектурою, що дозволяє розділити функції збору даних і їх обробки. На стороні мікроконтролера реалізовано програмний модуль, який відповідає за зчитування показників сенсорів, їх попередню обробку та формування пакетів даних для передавання. Використання мови програмування, орієнтованої на вбудовані системи, дозволяє забезпечити ефективне використання ресурсів і стабільність роботи пристрою в реальному часі.

Серверна частина системи реалізована із застосуванням сучасних засобів розробки веб-додатків, що забезпечують обробку запитів, збереження даних і взаємодію з користувацьким інтерфейсом. Для зберігання інформації обрано базу даних, здатну ефективно працювати з часовими рядами, оскільки саме такий тип даних формується у процесі моніторингу. Це дозволяє зручно організувати історію вимірювань, виконувати запити до даних і будувати графіки змін параметрів у часі.

Для реалізації інтерфейсу користувача використано веб-технології, що забезпечують доступ до системи з різних пристроїв без необхідності встановлення спеціалізованого програмного забезпечення. У межах інтерфейсу передбачено відображення поточних значень параметрів, графіків змін, а також повідомлень про виявлені відхилення. Такий підхід дозволяє зробити систему зручною у використанні та забезпечити швидке реагування на потенційно небезпечні ситуації. Структура технічних і програмних засобів реалізації системи зображена на рисунку 2.2.

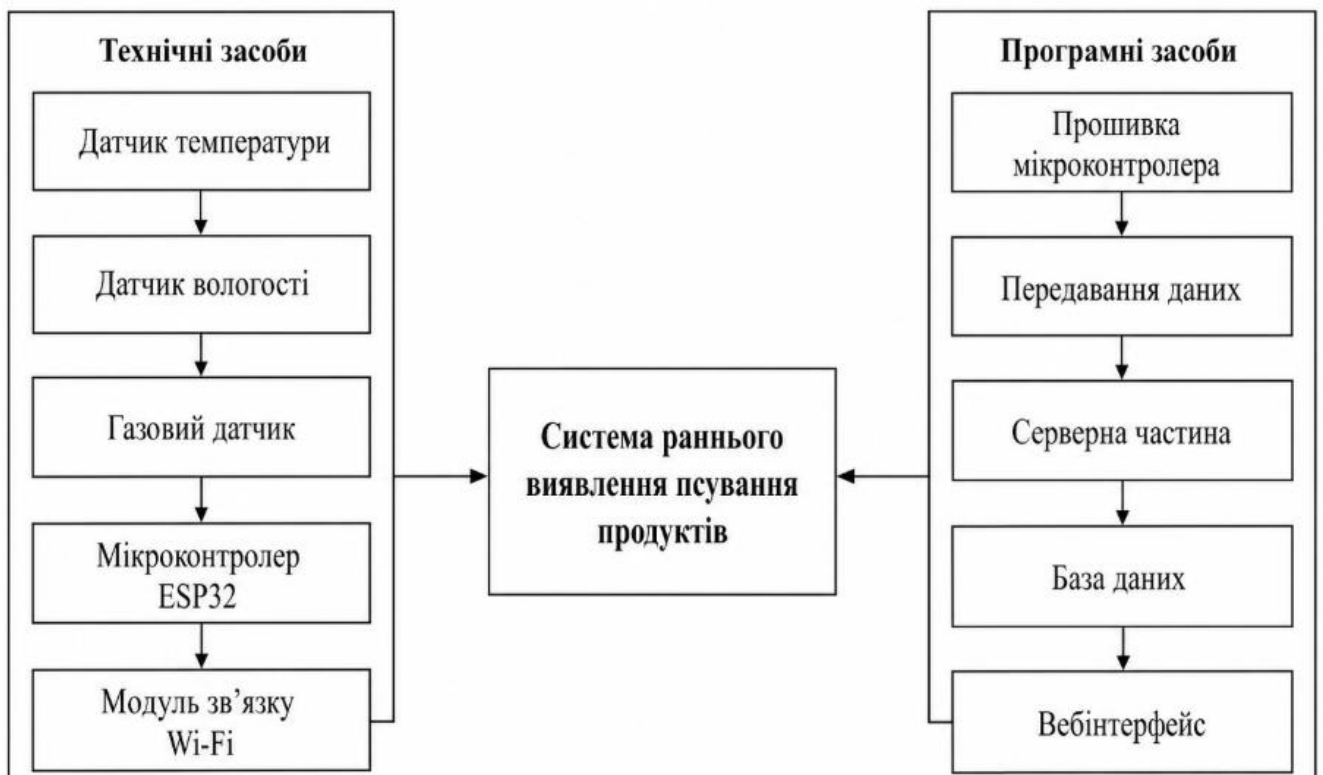


Рисунок 2.2 – Структура технічних і програмних засобів реалізації системи

Вибір усіх компонентів і технологій здійснено з урахуванням їх сумісності та можливості інтеграції в єдину систему. При цьому враховано вимоги до масштабованості, що дозволяє у подальшому розширювати систему за рахунок підключення нових сенсорних вузлів або додавання функцій обробки даних. У результаті сформовано програмно-апаратну основу системи, яка забезпечує

стабільний збір, передавання та аналіз даних, необхідних для раннього виявлення псування продуктів.

У підсумку обрані технічні та програмні засоби реалізації дозволяють забезпечити ефективну роботу системи в умовах реальної експлуатації холодильного обладнання, поєднуючи достатню точність вимірювань, надійність функціонування та можливість подальшого розвитку системи відповідно до поставлених задач.

2.3 Розроблення структури даних та моделі системи

Структура даних системи сформована таким чином, щоб забезпечити безперервне накопичення вимірювань, їх швидку обробку та можливість глибокого аналізу змін параметрів середовища у холодильному обладнанні. Основна ідея полягає у представленні всієї інформації у вигляді впорядкованих часових рядів, що дозволяє не лише фіксувати поточний стан, а й оцінювати тенденції, виявляти аномалії та формувати попередження на основі динаміки показників.

Інформаційна модель побудована як сукупність взаємопов'язаних сутностей, які відображають реальні об'єкти системи та процеси її функціонування. Базовою сутністю виступає холодильна установка або вузол моніторингу, який розглядається як окремий об'єкт спостереження. Для кожного такого вузла визначено унікальний ідентифікатор, назву, місце розташування та опис експлуатаційних умов. Це дозволяє системі працювати не лише з одним холодильником, а масштабуватися на декілька незалежних об'єктів, зберігаючи при цьому чітку структуру даних.

Другим ключовим елементом моделі виступають сенсори, підключені до вузла моніторингу. Кожен сенсор має власний ідентифікатор, тип (температурний, вологісний, газовий), одиницю вимірювання та технічні характеристики. Важливо, що сенсори не розглядаються як ізольовані пристрої,

а жорстко прив'язані до конкретного вузла, що дозволяє коректно інтерпретувати отримані дані. Для забезпечення гнучкості передбачено можливість підключення декількох сенсорів одного типу до одного вузла, що особливо актуально при контролі різних зон холодильного об'єму.

Основною структурною одиницею даних виступає запис вимірювання. Кожне вимірювання містить значення параметра, часову мітку, посилання на сенсор та вузол моніторингу. Такий запис формується циклічно з певним інтервалом часу, що визначається налаштуваннями системи. Наприклад, значення температури може фіксуватися кожні 10 секунд або 1 хвилину, що дозволяє отримати детальну картину змін. Збереження даних у вигляді послідовних записів забезпечує можливість побудови графіків, аналізу трендів і виявлення навіть незначних відхилень.

Особливістю організації даних є використання часових міток високої точності. Це дозволяє синхронізувати вимірювання з різних сенсорів і виконувати комплексний аналіз, наприклад, зіставляти зміну температури з ростом концентрації газів або зміною вологості. Такий підхід є критично важливим для реалізації алгоритмів раннього виявлення, оскільки дозволяє оцінювати не окремі значення, а взаємозв'язок параметрів у часі.

Для налаштування системи передбачено окрему структуру конфігураційних даних. У ній зберігаються допустимі діапазони температури, вологості та газових показників, а також параметри алгоритмів обробки. Наприклад, для різних типів продуктів можуть задаватися різні граничні значення та правила формування попереджень. Це дозволяє адаптувати систему до конкретних умов експлуатації без зміни програмного коду.

Логічна модель зв'язків між сутностями побудована за принципом ієрархії. Один вузол моніторингу може містити декілька сенсорів, кожен сенсор генерує множину вимірювань, а на основі цих вимірювань формуються події. Така структура забезпечує впорядкованість даних і спрощує виконання запитів, наприклад, отримання всіх вимірювань певного сенсора за заданий період або

аналіз подій для конкретного вузла. Логічна модель даних системи раннього виявлення псування продуктів подана на рисунок 2.3.

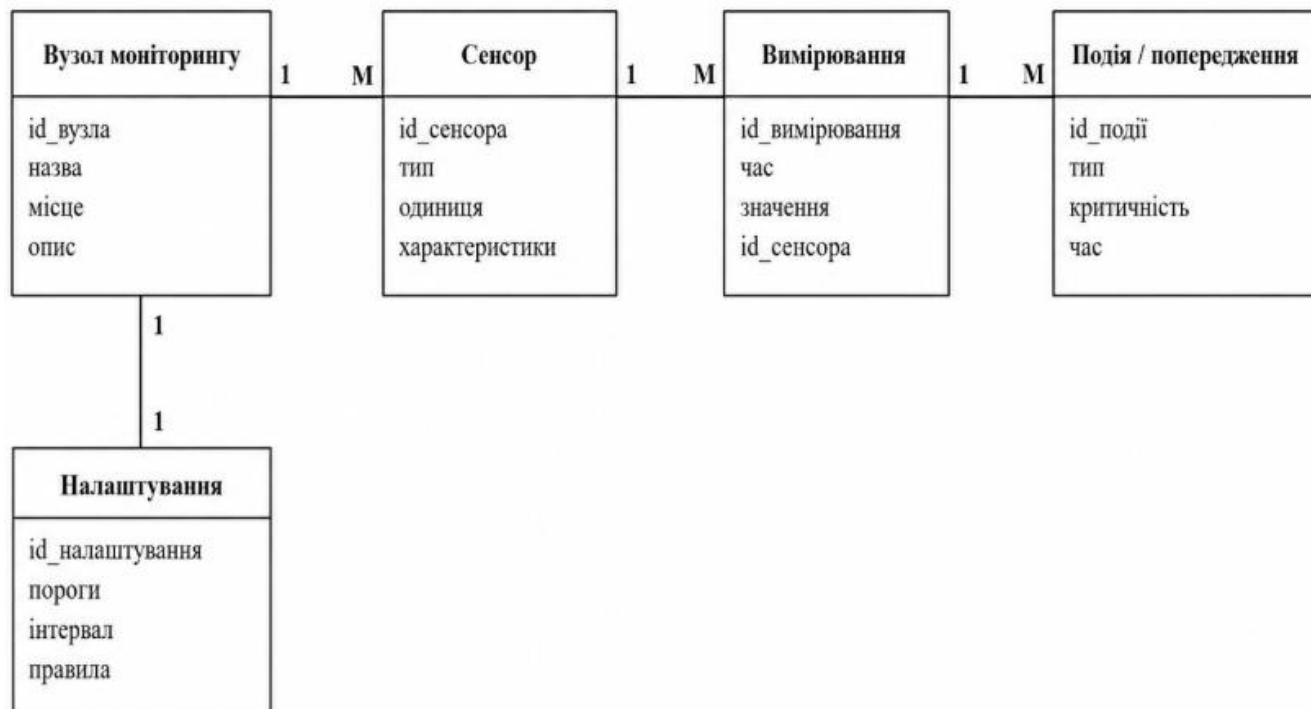


Рисунок 2.3 – Логічна модель даних системи раннього виявлення псування продуктів

З технічної точки зору модель даних орієнтована на використання бази даних, здатної ефективно працювати з часовими рядами. Це дозволяє оптимізувати зберігання великої кількості записів і забезпечити швидкий доступ до інформації. Для цього застосовано індексацію за часовими мітками та ідентифікаторами сенсорів, що суттєво прискорює виконання аналітичних запитів.

Додатково враховано питання цілісності та узгодженості даних. Перед збереженням значення проходять перевірку на допустимість, що дозволяє відфільтрувати некоректні або шумові вимірювання. Також передбачено механізми обробки пропущених значень, що можуть виникати через перебої зв'язку або тимчасову недоступність сенсорів.

З точки зору функціональної моделі, структура даних підтримує повний цикл роботи системи: від отримання сирих вимірювань до формування узагальнених висновків і попереджень. Дані, що надходять із сенсорів, зберігаються, аналізуються та використовуються для визначення стану середовища зберігання. На основі цього формується інформація, яка відображається користувачу у вигляді графіків, повідомлень і сигналів про потенційні ризики.

У підсумку розроблена структура даних забезпечує не лише ефективне зберігання інформації, а й створює основу для реалізації інтелектуальної обробки показників. Це дозволяє системі переходити від простого накопичення даних до їх змістовного аналізу та використання для раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні.

2.4 Організація обробки даних та алгоритму виявлення псування

Організацію обробки даних сформовано як багаторівневий процес, у межах якого кожен етап поступово підвищує інформативність отриманих вимірювань і переводить їх із сирого вигляду у форму, придатну для інтерпретації стану продуктів. Основною ідеєю такої організації визначено перехід від простого зчитування значень до їх глибокого аналізу з урахуванням динаміки змін, взаємозв'язку параметрів і накопиченого історичного контексту.

На початковому етапі обробки виконано приймання даних від сенсорних вузлів і їх первинну перевірку. Значення температури, вологості та газового складу приводяться до єдиного формату, синхронізуються за часовими мітками та проходять перевірку на допустимість. Це дозволяє відсікати явно некоректні або технічно неможливі значення, що можуть виникати через збої сенсорів або короточасні перешкоди. Додатково застосовано механізми фільтрації шумів, які усувають випадкові коливання, не пов'язані з реальними змінами середовища.

Для цього використано згладжування даних на основі ковзного середнього та обмеження різких стрибків значень між сусідніми вимірюваннями.

Наступним кроком виконано нормалізацію даних, що дозволяє привести показники різних сенсорів до узгодженого вигляду. Це особливо важливо при використанні декількох датчиків одного типу або при розміщенні сенсорів у різних зонах холодильного об'єму. Нормалізація враховує калібрувальні коефіцієнти та дозволяє зменшити вплив індивідуальних похибок вимірювальних пристроїв. У результаті формується узгоджений масив даних, який відображає реальний стан середовища з мінімальним рівнем спотворень.

Після цього виконано агрегацію даних, що передбачає об'єднання окремих вимірювань у більш узагальнені показники. Для кожного параметра визначаються середні значення за заданий інтервал часу, а також мінімальні, максимальні та дисперсійні характеристики. Це дозволяє оцінювати не лише поточний стан, а й стабільність середовища.

Важливим елементом обробки є аналіз відхилень від нормативних значень. Для кожного параметра визначено допустимі межі, що відповідають умовам зберігання певних типів продуктів. У разі перевищення цих меж формується сигнал про потенційно небезпечну ситуацію. Проте алгоритм не обмежується фіксацією факту перевищення.

Ключовим компонентом системи виступає алгоритм виявлення псування, який базується на багатофакторному аналізі. Логіка алгоритму передбачає, що оцінка стану продуктів формується на основі сукупності параметрів, а не окремих значень. Наприклад, одночасне підвищення температури, зростання вологості та збільшення концентрації газів створює більш вагомий сигнал, ніж будь-який із цих факторів окремо. Для реалізації такого підходу введено систему вагових коефіцієнтів, що визначають значущість кожного параметра у загальній оцінці стану.

Окрему увагу приділено аналізу швидкості зміни параметрів. Обчислення похідних значень дозволяє визначити темп змін і виявити аномальні ситуації, які

можуть бути неочевидними при аналізі абсолютних значень. Наприклад, різке зростання температури протягом короткого проміжку часу може свідчити про відкривання холодильника або відмову системи охолодження. Аналогічно, швидке збільшення концентрації газів може бути ознакою інтенсивного псування продуктів. Урахування швидкісних характеристик значно підвищує чутливість системи до ранніх змін. Алгоритм обробки даних та виявлення ризику псування продуктів зображено на рисунку 2.4.

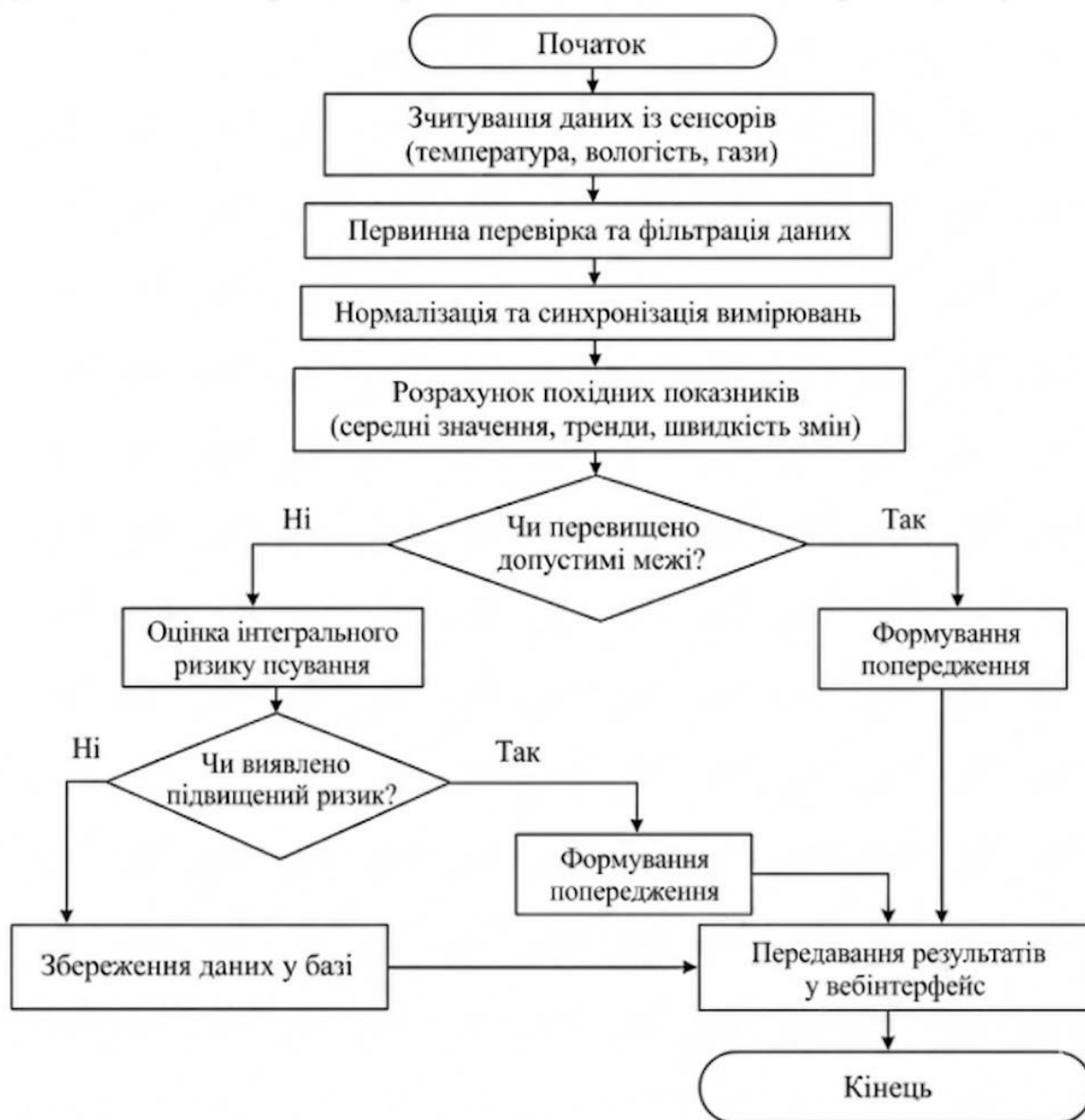


Рисунок 2.4 – Алгоритм обробки даних та виявлення ризику псування продуктів

Додатково реалізовано аналіз трендів, що дозволяє оцінювати довгострокові зміни параметрів. Для цього використано накопичені історичні дані, на основі яких визначаються тенденції зростання або зниження показників. Наприклад, поступове підвищення температури протягом кількох годин може залишатися в межах допустимих значень, але вказувати на потенційну несправність обладнання. Такий підхід дозволяє формувати попередження ще до досягнення критичних меж.

Алгоритм також враховує взаємозв'язок між параметрами. Аналіз кореляції дозволяє виявляти ситуації, коли зміна одного показника супроводжується зміною іншого. Наприклад, підвищення вологості разом зі зростанням температури може створювати сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів. Виявлення таких залежностей дозволяє більш точно оцінити ризик псування та зменшити кількість хибних спрацювань.

У процесі обробки даних сформовано інтегральний показник стану середовища, який відображає загальний рівень ризику псування продуктів. Цей показник обчислюється на основі нормалізованих значень параметрів, їх вагових коефіцієнтів і динаміки змін. Отримане значення дозволяє класифікувати стан як нормальний, попереджувальний або критичний. Така класифікація спрощує сприйняття інформації користувачем і дозволяє швидко оцінити ситуацію.

Результатом роботи алгоритму є формування подій і повідомлень, які передаються до інтерфейсу користувача. Кожне повідомлення містить інформацію про причину його формування, значення параметрів і часову мітку. Передбачено декілька рівнів критичності, що дозволяє диференціювати ситуації за ступенем небезпеки. Це забезпечує можливість оперативного реагування та мінімізує ризик втрати продуктів.

Загальна організація обробки даних побудована таким чином, щоб забезпечити безперервність процесу та мінімальні затримки між вимірюванням і формуванням результату. Дані обробляються у режимі, близькому до реального часу, що дозволяє системі оперативно реагувати на зміни. При цьому враховано

можливість тимчасових збоїв у передаванні даних, для чого передбачено механізми буферизації та відновлення інформації.

У підсумку запропонована організація обробки даних та алгоритм виявлення псування забезпечують перехід від простого моніторингу до інтелектуального аналізу середовища зберігання. Це дозволяє своєчасно виявляти початкові ознаки небажаних змін, підвищувати ефективність контролю та забезпечувати більш надійне збереження якості харчових продуктів у холодильному обладнанні.

2.5 Організація взаємодії користувача з системою та відображення результатів

Організацію взаємодії користувача з системою сформовано як окремий функціональний рівень, який забезпечує інтерпретацію результатів обробки даних та їх подання у зручному для сприйняття вигляді. Основною метою цього рівня визначено не лише відображення значень параметрів, а й забезпечення швидкого розуміння стану середовища зберігання, виявлення небезпечних тенденцій та підтримку прийняття рішень на основі отриманої інформації.

Взаємодію реалізовано через веб-інтерфейс, що дозволяє отримувати доступ до системи з різних пристроїв без встановлення додаткового програмного забезпечення. Такий підхід забезпечує універсальність і спрощує використання системи в умовах реальної експлуатації. Інтерфейс побудовано за принципом централізованої панелі моніторингу, на якій відображається інформація про всі контрольовані вузли та параметри у реальному часі.

Структура інтерфейсу передбачає розподіл інформації на логічні блоки. Основний екран містить узагальнену інформацію про стан системи, включаючи поточні значення температури, вологості та газових показників. Дані подаються у вигляді числових значень, що супроводжуються візуальними індикаторами стану, які дозволяють швидко оцінити відповідність параметрів допустимим

межам. Використання кольорового кодування дозволяє виділити нормальні, попереджувальні та критичні стани, що значно підвищує наочність інформації.

Окремий функціональний блок інтерфейсу призначено для відображення динаміки змін параметрів. Для цього використано графічне представлення даних у вигляді часових графіків, які дозволяють аналізувати поведінку параметрів протягом заданого періоду. Користувач має можливість обирати інтервали часу, що дозволяє переходити від детального аналізу короткочасних змін до оцінки довгострокових тенденцій. Відображення декількох параметрів на одному графіку створює можливість візуального аналізу їх взаємозв'язку.

Значну увагу приділено організації відображення подій та попереджень. У системі реалізовано механізм сповіщень, який інформує користувача про відхилення параметрів від нормальних значень або про виявлення потенційно небезпечних ситуацій. Повідомлення містять інформацію про тип події, її рівень критичності, час виникнення та параметри, що стали причиною спрацювання. Для підвищення оперативності передбачено можливість виведення сповіщень у реальному часі, що дозволяє швидко реагувати на зміну умов зберігання.

Інтерфейс також забезпечує доступ до історичних даних, що дозволяє виконувати аналіз попередніх подій і оцінювати ефективність роботи системи. Користувач має можливість переглядати архів вимірювань, фільтрувати дані за часовими інтервалами та окремими параметрами, а також аналізувати повторюваність відхилень. Такий функціонал створює основу для більш глибокого розуміння процесів, що відбуваються у холодильному обладнанні.

Окремим аспектом взаємодії є можливість налаштування параметрів системи. У відповідному розділі інтерфейсу передбачено зміну граничних значень, інтервалів збору даних, параметрів обробки та правил формування попереджень. Схема взаємодії користувача з вебінтерфейсом системи моніторингу зображена на рисунку 2.5.

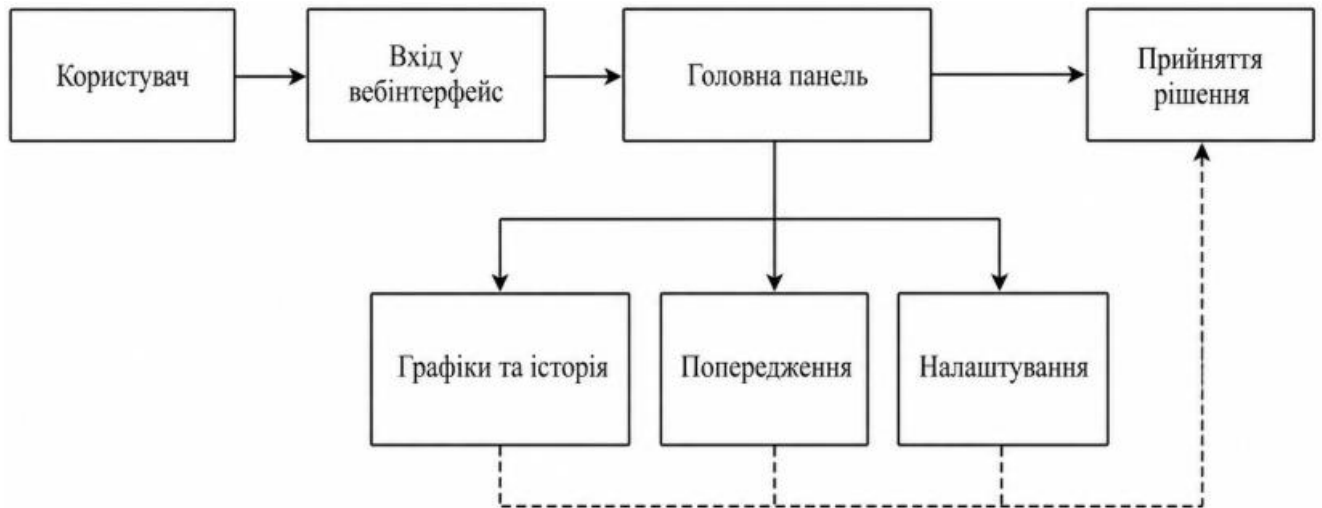


Рисунок 2.5 – Схема взаємодії користувача з вебінтерфейсом системи моніторингу

Для забезпечення зручності використання інтерфейс розроблено з урахуванням принципів простоти та інтуїтивності. Основні функції доступні безпосередньо з головного екрану, а навігація між розділами здійснюється через логічно структуроване меню. Це дозволяє зменшити час на освоєння системи та мінімізувати ймовірність помилок під час її використання.

Важливою складовою є забезпечення оперативного доступу до інформації. Система підтримує оновлення даних у режимі, близькому до реального часу, що дозволяє користувачу отримувати актуальні відомості про стан середовища без необхідності ручного оновлення сторінки. Це особливо важливо для задач раннього виявлення псування, де швидкість реагування має вирішальне значення.

Додатково в інтерфейсі передбачено логіку відображення не лише поточного стану, а й причини формування попередження. Це має важливе значення для практичного використання системи, оскільки користувач отримує не просто повідомлення про небезпечну ситуацію, а коротке пояснення, який саме параметр вплинув на зміну стану. Наприклад, попередження може бути пов'язане з підвищенням температури, збільшенням вологості, зростанням газового показника або одночасним відхиленням кількох параметрів. Завдяки

цьому взаємодія з системою стає більш зрозумілою, а отримані дані мають не лише інформаційний, а й пояснювальний характер.

Важливою частиною взаємодії є також розмежування станів системи за рівнем критичності. Нормальний режим свідчить про стабільні умови зберігання, попереджувальний режим указує на появу небажаних тенденцій, а критичний режим означає необхідність швидкого реагування. Така логіка дозволяє уникнути перевантаження користувача зайвими повідомленнями та водночас не пропускати ситуації, які можуть призвести до псування продуктів. У результаті інтерфейс працює не лише як засіб перегляду числових значень, а як інструмент швидкої оцінки стану холодильного середовища.

Окремо враховано можливість подальшого розширення інтерфейсу. У майбутній реалізації до нього можуть бути додані модулі формування звітів, експорт історичних даних, відображення статистики за певний період і підтримка повідомлень через мобільні канали зв'язку. Такий підхід робить систему придатною не тільки для демонстраційного використання, а й для практичного застосування у торговельних точках, складських приміщеннях або невеликих закладах харчування, де важливо мати простий доступ до інформації про стан продуктів та умови їх зберігання.

У підсумку організація взаємодії користувача з системою та відображення результатів забезпечує ефективне представлення даних і створює умови для швидкого прийняття рішень. Поєднання числових значень, графічного аналізу та системи попереджень дозволяє не лише контролювати стан середовища, а й своєчасно виявляти ознаки псування продуктів, що підвищує практичну ефективність використання системи у реальних умовах експлуатації.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ПСУВАННЯ ПРОДУКТІВ

3.1 Формування апаратної частини сенсорного вузла системи

Практичну реалізацію системи раннього виявлення псування продуктів розпочато з формування апаратної частини сенсорного вузла, оскільки саме цей рівень забезпечує безпосередній зв'язок між фізичним середовищем холодильного обладнання та програмною логікою подальшої обробки даних. Сенсорний вузол у межах бакалаврської роботи розглядається як компактний мікроконтролерний пристрій, який виконує зчитування параметрів середовища, первинну перевірку отриманих значень і підготовку даних до передавання на серверну частину системи. Його призначення полягає не лише у фіксації температури, а й у комплексному спостереженні за умовами зберігання, де важливими є температура, вологість і газові показники, що можуть змінюватися на ранніх стадіях псування продуктів [12, 34].

Основою апаратної частини обрано мікроконтролерну платформу ESP32, оскільки вона поєднує достатню продуктивність для обробки сенсорних даних, вбудований модуль Wi-Fi та зручну підтримку поширених інтерфейсів підключення. Використання ESP32 дозволяє зменшити кількість окремих комунікаційних модулів, спростити схему з'єднань і забезпечити можливість передавання даних до вебсервера без додаткового обладнання. Для системи, що працює у холодильному обладнанні або поруч із ним, це має практичне значення, оскільки надлишкова кількість дротів, перехідників і зовнішніх модулів знижує надійність та ускладнює обслуговування.

Для вимірювання температури в сенсорному вузлі передбачено цифровий датчик DS18B20. Його застосування пояснюється стійкістю до роботи в умовах зниженої температури, достатньою точністю для задач контролю холодильного середовища та можливістю підключення через інтерфейс OneWire. Цей датчик зручно використовувати в холодильному об'ємі, оскільки він може мати

герметичне виконання у металевій гільзі, що зменшує вплив вологи та конденсату на вимірювальний елемент. Підключення DS18B20 до ESP32 виконано через цифровий вхід із підтягувальним резистором, що забезпечує стабільне зчитування значень і мінімізує ймовірність випадкових помилок при передаванні сигналу.

Для контролю відносної вологості застосовано сенсор DHT22 або сумісний цифровий модуль, здатний одночасно фіксувати температуру та вологість повітря. У межах системи основний акцент цього датчика зроблено саме на вологості, оскільки надмірна сухість або підвищена вологість здатні прискорювати погіршення якості продуктів. Підвищена вологість створює умови для розвитку мікроорганізмів і плісняви, а також може впливати на інтенсивність накопичення сторонніх запахів у холодильному просторі. Дані вологості надалі використовуються не окремо, а разом із температурними та газовими показниками, що дозволяє формувати більш повну оцінку стану середовища.

Окремим компонентом сенсорного вузла виступає газовий датчик MQ-135, який використано для фіксації змін газового складу повітря. У задачі раннього виявлення псування продуктів цей сенсор відіграє важливу роль, оскільки реагує на наявність летких речовин, що можуть з'являтися під час розкладу органічних сполук. Йдеться не про точне лабораторне визначення концентрації конкретного газу, а про відстеження загальної динаміки газового показника. Якщо за стабільної температури або вологості газовий сигнал поступово зростає, система отримує додаткову ознаку того, що в холодильному об'ємі можуть відбуватися небажані процеси.

Під час формування апаратної частини враховано особливості живлення окремих компонентів. ESP32 працює з логічним рівнем 3,3 В, тоді як газові сенсори серії MQ зазвичай потребують живлення нагрівального елемента від 5 В. Через це передбачено розділення ліній живлення та узгодження сигналів, щоб напруга з аналогового виходу газового сенсора не перевищувала допустимого рівня для входу мікроконтролера. У макетній реалізації це може бути виконано

за допомогою подільника напруги або готового модуля з узгодженим виходом. Такий підхід підвищує безпеку підключення та зменшує ризик пошкодження мікроконтролера.

Сенсорний вузол сформовано як компактний блок, який може розміщуватися біля холодильного обладнання, а самі сенсори - у контрольованій зоні холодильного об'єму. Температурний датчик доцільно розташовувати ближче до середньої полиці або в зоні, де зберігається основна маса продуктів, оскільки саме там найкраще відображаються реальні умови зберігання. Датчик вологості розміщується так, щоб на нього не потрапляв прямий конденсат і струмінь холодного повітря від випарника. Газовий сенсор доцільно встановлювати у зоні, де повітря вільно циркулює навколо продуктів, але без прямого контакту з вологою або поверхнею харчових матеріалів. Для захисту сенсорів передбачено перфорований корпус або захисну сітку, яка не перешкоджає проходженню повітря, але знижує ризик механічного пошкодження.

У структурі сенсорного вузла також передбачено можливість підключення додаткових елементів індикації. Наприклад, світлодіод може використовуватися для відображення стану живлення, активності передавання даних або переходу системи у попереджувальний режим. У простій реалізації достатньо одного-двох індикаторів, оскільки основне відображення результатів виконується через вебінтерфейс. Проте локальна індикація залишається корисною під час налагодження, оскільки дозволяє швидко визначити, чи працює вузол і чи відбувається обмін даними.

Збирання апаратної частини виконано з урахуванням подальшого програмного керування. Кожен сенсор підключено до окремого входу мікроконтролера, що спрощує зчитування та діагностику. Для цифрових сенсорів використано відповідні бібліотеки, які забезпечують стабільну роботу з протоколами обміну, а для аналогового газового датчика застосовано вхід АЦП ESP32. Оскільки показники MQ-135 можуть змінюватися залежно від прогріву

сенсора та умов середовища, у системі передбачено початковий період стабілізації, після якого дані враховуються в алгоритмі оцінювання ризику. Це дозволяє уникнути хибних спрацювань одразу після ввімкнення пристрою.

На рисунку 3.1 наведено загальну структуру апаратної реалізації сенсорного вузла системи раннього виявлення псування продуктів. У схемі відображено основні вимірювальні компоненти, мікроконтролерну платформу, блок живлення та канал передавання даних до серверної частини. Така структура показує, що сенсорний вузол є нижнім рівнем кіберфізичної системи, який перетворює фізичні параметри холодильного середовища на цифрові дані для подальшого аналізу.



Рисунок 3.1 – Структура апаратної реалізації сенсорного вузла системи раннього виявлення псування продуктів

Живлення сенсорного вузла організовано від стабілізованого джерела постійної напруги. Для макетної перевірки може використовуватися USB-живлення або адаптер 5 В, однак у практичному виконанні доцільним є застосування окремого блока живлення з достатнім запасом струму, особливо з урахуванням споживання газового сенсора. У разі використання системи в холодильному обладнанні важливо забезпечити виведення кабелів так, щоб не

порушувати герметичність дверцят і не створювати додаткових теплових втрат. Тому сенсорна частина може бути винесена всередину камери тонкими провідниками, а мікроконтролерний блок розміщено зовні, у сухішій та безпечнішій зоні.

У результаті формування апаратної частини створено основу для подальшої реалізації програмної логіки системи. Запропонований сенсорний вузол забезпечує збір ключових параметрів середовища, підтримує передавання даних через бездротовий канал і може бути адаптований до різних типів холодильного обладнання. Поєднання температурного, вологісного та газового контролю дозволяє отримати більш інформативну картину стану зберігання, ніж у випадку використання лише одного датчика температури. Це створює практичну основу для реалізації алгоритмів раннього виявлення ризику псування продуктів на наступних етапах бакалаврської роботи.

3.2 Реалізація програмної логіки збору та передавання сенсорних даних

Програмну логіку збору та передавання сенсорних даних реалізовано як послідовний цикл роботи мікроконтролерного вузла, у якому кожна дія пов'язана з попередньою і забезпечує перехід від фізичного вимірювання параметрів середовища до формування структурованого пакета даних для серверної частини системи. Основне завдання цього програмного рівня полягає в тому, щоб сенсорний вузол не просто зчитував окремі значення температури, вологості та газових показників, а виконував їх первинну перевірку, узгодження, підготовку до передавання та контроль факту успішного обміну із сервером.

Основою програмної частини сенсорного вузла виступає прошивка мікроконтролера ESP32, яка забезпечує керування підключеними сенсорами, організацію бездротового з'єднання та формування пакетів даних. У програмній логіці передбачено окремі функціональні блоки: ініціалізацію апаратних інтерфейсів, підключення до мережі Wi-Fi, зчитування значень із датчиків,

первинну фільтрацію, формування інформаційного повідомлення та передавання даних на сервер. Такий розподіл дозволяє зробити роботу прошивки більш зрозумілою, а окремі її частини - незалежними для подальшого налаштування або розширення.

На першому етапі роботи програмного забезпечення виконано ініціалізацію мікроконтролера та всіх підключених модулів. Після подавання живлення ESP32 налаштовує цифрові входи для датчиків температури та вологості, активує аналоговий вхід для газового сенсора, перевіряє доступність сенсорів і запускає процедуру підключення до бездротової мережі. Для датчика температури DS18B20 використано обмін через цифрову шину OneWire, що дозволяє стабільно отримувати температурні значення з мінімальною кількістю з'єднань. Для датчика DHT22 реалізовано окреме опитування, у межах якого отримуються показники відносної вологості повітря. Газовий сенсор MQ-135 підключено до аналогового входу, тому його значення зчитуються через вбудований аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера.

Особливу увагу в програмній логіці приділено стабільності зчитування газового показника. Газові сенсори серії MQ мають інерційність і потребують певного часу для прогрівання після ввімкнення. Через це в прошивці передбачено початковий період стабілізації, протягом якого дані сенсора не використовуються для формування остаточної оцінки ризику. Такий підхід дозволяє уникнути хибних спрацювань одразу після запуску системи, коли значення газового сенсора ще не відповідають реальному стану повітря в холодильному об'ємі. Після завершення стабілізації показники MQ-135 враховуються як динамічний параметр, що відображає зміну газового складу середовища.

Зчитування сенсорних даних організовано циклічно з фіксованим інтервалом. Інтервал опитування обрано так, щоб система отримувала достатньо часті вимірювання для побудови часових рядів, але водночас не створювала надмірного навантаження на мікроконтролер і мережевий канал. Для задачі

контролю холодильного обладнання немає потреби передавати значення щосекунди, оскільки температура й вологість змінюються відносно повільно. Натомість регулярне вимірювання з інтервалом у кілька секунд або хвилин дозволяє виявляти поступові тенденції, фіксувати різкі відхилення та формувати достатню історію для подальшого аналізу.

Після отримання сирих значень виконано первинну перевірку коректності даних. У програмній логіці передбачено відсікання технічно неможливих або явно помилкових значень, які можуть виникати через тимчасовий збій сенсора, нестабільне з'єднання або перешкоди. Наприклад, якщо температурний датчик повертає службове значення помилки або вологість виходить за фізично можливі межі, такий результат не передається як достовірний. Замість цього система формує службову ознаку помилки, що дозволяє в подальшому відокремити проблему сенсора від реального погіршення умов зберігання.

Для зменшення впливу випадкових коливань реалізовано базове згладжування показників. Найпростішим і практично доцільним способом у межах мікроконтролерної реалізації стало використання усереднення кількох останніх вимірювань. Такий підхід не потребує значних обчислювальних ресурсів, але дозволяє знизити вплив одиничних стрибків, які не відображають реальної зміни середовища. Особливо важливим це є для аналогового газового сенсора, значення якого можуть коливатися сильніше, ніж показники цифрових температурних і вологісних датчиків.

Наступним етапом програмної логіки є формування структурованого пакета даних. У ньому передбачено збереження ідентифікатора сенсорного вузла, часової мітки або поточного часу вимірювання, значення температури, вологості, газового показника, а також службової інформації про стан пристрою. Така структура дозволяє серверній частині однозначно визначити, від якого вузла надійшли дані, коли вони сформовані та які параметри були зафіксовані. Для передавання використано текстовий формат JSON, оскільки він є зручним для взаємодії між мікроконтролером, серверною частиною та вебінтерфейсом.

Передавання даних реалізовано через бездротове з'єднання Wi-Fi. Після підключення до мережі мікроконтролер надсилає сформований пакет на сервер за допомогою HTTP-запиту або MQTT-повідомлення, залежно від обраної архітектури обміну. У простішій реалізації HTTP є зручним варіантом, оскільки сервер може приймати дані через окремий API-маршрут. MQTT краще підходить для систем, де передбачено багато сенсорних вузлів, часті повідомлення та потреба в легкому протоколі обміну. У межах розробленої логіки обидва підходи можуть бути використані без суттєвої зміни загальної структури системи, оскільки мікроконтролер формує однаковий зміст пакета даних.

У програмній частині також передбачено можливість тимчасової буферизації останніх вимірювань. Це дозволяє не втрачати інформацію при короткому збої мережі. Після відновлення з'єднання накопичені значення можуть бути передані на сервер у вигляді кількох послідовних записів. У спрощеній реалізації буфер може зберігатися в оперативній пам'яті мікроконтролера, а в розширеному варіанті - у внутрішній флешпам'яті або на зовнішньому носії. Такий механізм підвищує цілісність даних і забезпечує більш повну історію вимірювань.

Окремим елементом програмної логіки є контроль службового стану сенсорного вузла. У прошивці передбачено фіксацію таких подій, як помилка підключення до Wi-Fi, відсутність відповіді від сенсора, некоректне значення вимірювання або невдала спроба передавання. Ці службові стани можуть передаватися до серверної частини разом із основними даними або використовуватися для локальної індикації. Завдяки цьому система дозволяє відрізнити реальне погіршення умов зберігання від технічної несправності окремого елемента.

На рисунку 3.2 показано послідовність збору, попередньої обробки та передавання сенсорних даних у системі раннього виявлення псування продуктів. Схема відображає логіку руху інформації від фізичного вимірювання до

серверної частини та демонструє, що передавання даних виконується лише після перевірки та підготовки отриманих показників.

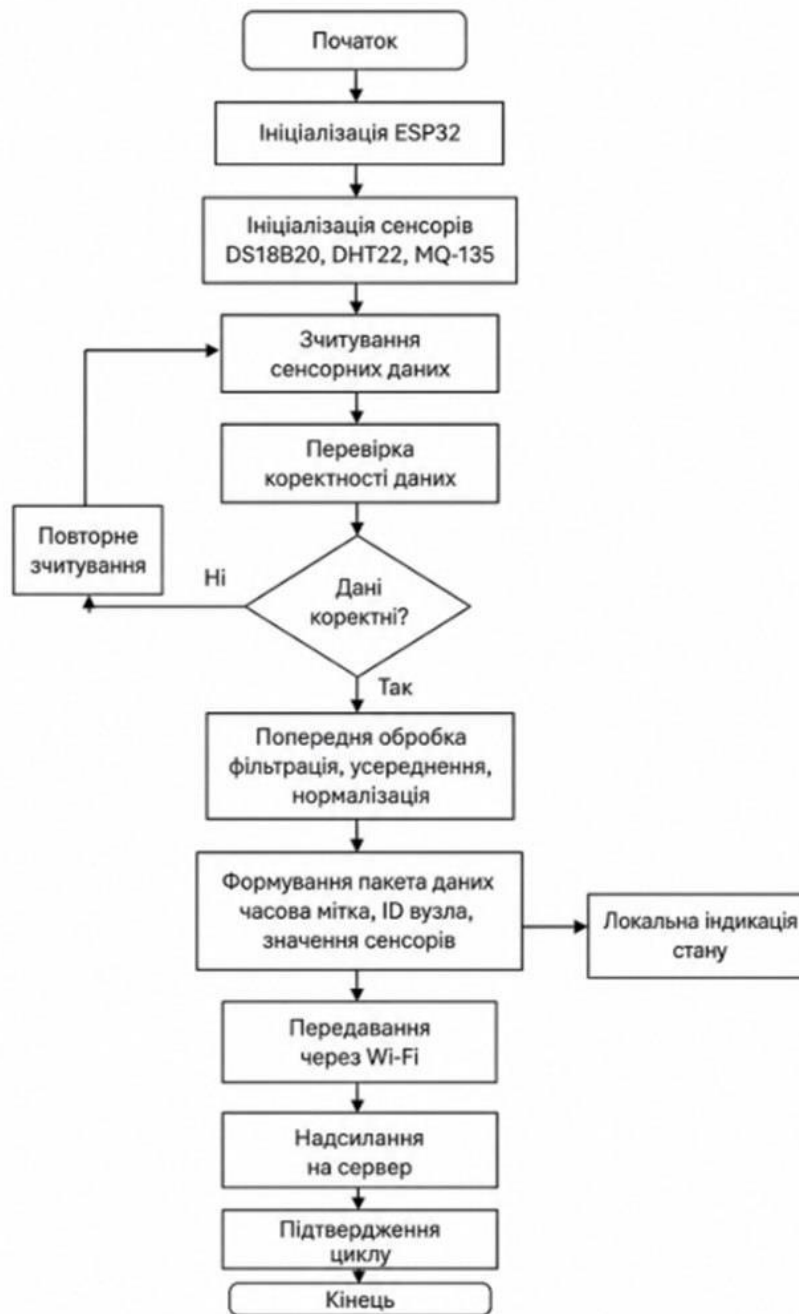


Рисунок 3.2 – Послідовність збору, попередньої обробки та передавання сенсорних даних

У результаті реалізації програмної логіки сенсорний вузол виконує повний цикл автономної роботи: зчитує показники температури, вологості та газового

складу, здійснює первинну перевірку, формує уніфікований пакет даних і передає його до серверної частини системи. Така організація дозволяє отримувати стабільний потік сенсорних даних, необхідний для подальшого збереження, аналізу та виявлення ризику псування продуктів. Поєднання циклічного опитування, перевірки коректності, базового згладжування та контролю передавання створює надійну основу для подальшої роботи алгоритму оцінювання стану холодильного середовища.

У межах реалізації важливо забезпечити правильну послідовність роботи всіх програмних дій. Спочатку система виконує ініціалізацію, потім перевіряє мережеве з'єднання, після цього зчитує сенсорні значення, перевіряє їхню коректність, формує пакет даних і передає його до серверної частини. Якщо на будь-якому етапі виникає помилка, вона не повинна повністю зупиняти роботу пристрою. Замість цього передбачено перехід до повторної спроби або пропуск лише проблемного вимірювання. Такий підхід підвищує стійкість системи та робить її придатною для тривалої роботи без постійного ручного втручання.

3.3 Реалізація серверної частини та бази даних системи

Серверну частину системи раннього виявлення псування продуктів реалізовано як центральний програмний рівень, який приймає дані від сенсорного вузла, виконує їх перевірку, зберігає у базі даних і надає підготовлену інформацію для подальшого відображення у вебінтерфейсі. У загальній структурі системи саме сервер виконує роль проміжної ланки між фізичним рівнем вимірювання та користувацьким рівнем аналізу результатів. Якщо сенсорний вузол відповідає за отримання первинних значень температури, вологості та газового показника, то серверна частина забезпечує впорядкування цих даних, їх накопичення та перетворення у форму, придатну для подальшої обробки.

Основна потреба у серверному рівні виникла через те, що дані сенсорів мають не одноразовий, а часовий характер. Для раннього виявлення ризику псування продуктів недостатньо знати лише поточне значення температури або вологості. Значно важливішим стає розуміння того, як ці параметри змінюються протягом певного часу, чи зростає газовий показник поступово, чи відбуваються короткочасні стрибки, чи повторюються відхилення після відкриття холодильника, а також чи зберігається стабільність середовища упродовж тривалого періоду. Через це серверна частина побудована з орієнтацією на збереження історії вимірювань і подальше формування часових рядів.

У межах практичної реалізації серверну частину сформовано за клієнт-серверним принципом. Сенсорний вузол на базі мікроконтролера ESP32 виступає клієнтом, який надсилає пакет даних після кожного циклу вимірювання. Сервер приймає ці пакети через окремий програмний маршрут, перевіряє структуру повідомлення та виконує первинну валідацію отриманих значень. Така схема дозволяє відокремити процес зчитування даних від процесу їх збереження й аналізу. Завдяки цьому збій на стороні вебінтерфейсу або тимчасове перевантаження сторінки не впливає безпосередньо на роботу сенсорного вузла.

Для обміну даними між мікроконтролером і сервером використано формат JSON. Такий формат обрано через його просту структуру, читабельність і зручність обробки у веборієнтованих системах. У пакеті даних передаються ідентифікатор вузла моніторингу, час формування вимірювання, температура, відносна вологість, газовий показник і службовий стан сенсорного вузла. Наявність ідентифікатора дозволяє в подальшому масштабувати систему та підключати декілька холодильних об'єктів без зміни загальної логіки роботи. Часова мітка забезпечує правильне розміщення вимірювання в історії, а службовий стан допомагає відрізнити реальні зміни середовища від технічних помилок сенсора або зв'язку.

Після приймання пакета сервер перевіряє повноту отриманих даних. Якщо в повідомленні відсутній обов'язковий параметр або значення має некоректний формат, такий запис не потрапляє до основної таблиці вимірювань. Замість цього система може зафіксувати службову подію, яка вказує на помилку передавання або неправильну структуру даних. Це важливо для збереження чистоти бази даних, оскільки некоректні записи здатні спотворювати графіки, заважати аналізу трендів і формувати хибні попередження. Якщо пакет проходить перевірку, сервер передає його до модуля збереження, де дані записуються у відповідні таблиці бази.

Базу даних системи реалізовано як структуроване сховище, у якому окремо збережено відомості про вузли моніторингу, сенсори, вимірювання, події та налаштування. Такий поділ забезпечує логічну впорядкованість інформації та дозволяє уникнути дублювання даних. Центральною таблицею виступає таблиця вимірювань, у якій для кожного запису зберігається час фіксації, ідентифікатор сенсора або вузла, значення параметра та ознака коректності. Саме ця таблиця формує основу для побудови графіків, аналізу динаміки та оцінювання ризику псування продуктів.

Окремо передбачено таблицю вузлів моніторингу, де зберігається інформація про конкретне холодильне обладнання або контрольовану зону. Для кожного вузла визначено назву, умовне місце розташування, опис і поточний стан активності. Це дозволяє працювати не лише з одним холодильником, а й із декількома об'єктами, наприклад з окремими камерами, полицями або торговельними вітринами. Така структура робить систему більш гнучкою та створює основу для подальшого масштабування.

Таблиця сенсорів пов'язана з таблицею вузлів моніторингу. У ній для кожного сенсора збережено його тип, одиницю вимірювання, опис і прив'язку до конкретного вузла. Наприклад, температурний сенсор, датчик вологості і газовий сенсор належать до одного вузла, але формують різні типи вимірювань. Це дозволяє серверній частині правильно інтерпретувати значення, адже одна

числова величина без вказання типу сенсора не має достатнього змісту. Значення 25 може означати температуру в градусах, вологість у відсотках або умовний газовий показник, тому зберігання типу сенсора є обов'язковим елементом інформаційної моделі.

Для фіксації небезпечних ситуацій створено окрему таблицю подій і попереджень. У ній зберігаються відомості про тип події, рівень критичності, час виникнення, пов'язаний вузол і короткий опис причини спрацювання. Наприклад, подія може бути сформована у разі перевищення температурного порога, різкого зростання газового показника або одночасного погіршення кількох параметрів. Завдяки окремому збереженню подій користувацький інтерфейс може швидко відображати історію попереджень без необхідності повторно аналізувати весь масив вимірювань.

Важливу роль відіграє таблиця налаштувань, у якій збережено допустимі межі параметрів та правила формування попереджень. Для різних типів продуктів або різних умов зберігання порогові значення можуть відрізнятися, тому винесення цих параметрів у базу даних робить систему адаптивнішою. Замість зміни програмного коду користувач або адміністратор може змінити пороги через інтерфейс, після чого серверна частина застосовує нові значення під час аналізу наступних вимірювань.

Серверна частина також реалізує набір програмних маршрутів для взаємодії з вебінтерфейсом. Один маршрут відповідає за приймання нових сенсорних даних, інший - за отримання останніх актуальних показників, ще один - за передавання історії вимірювань за обраний проміжок часу. Окремо передбачено отримання списку подій і попереджень. Такий підхід дозволяє розділити функції приймання даних, перегляду стану системи та аналізу історії. У результаті вебінтерфейс не працює напряму з базою даних, а отримує вже підготовлену інформацію через серверний API.

Для підвищення швидкодії запитів у базі даних передбачено впорядкування записів за часовими мітками та ідентифікаторами сенсорів.

Оскільки система працює з часовими рядами, найчастіше виконуються запити виду «показати значення за останню годину», «отримати графік за добу» або «знайти останнє вимірювання конкретного сенсора».

На рисунку 3.3 показано структуру роботи серверної частини та бази даних системи моніторингу. У схемі відображено надходження даних від сенсорного вузла, їх перевірку серверним модулем, запис у базу даних, формування подій і передавання підготовленої інформації до вебінтерфейсу. Така схема демонструє, що серверна частина виконує не лише роль сховища, а й роль активного обробного центру системи.

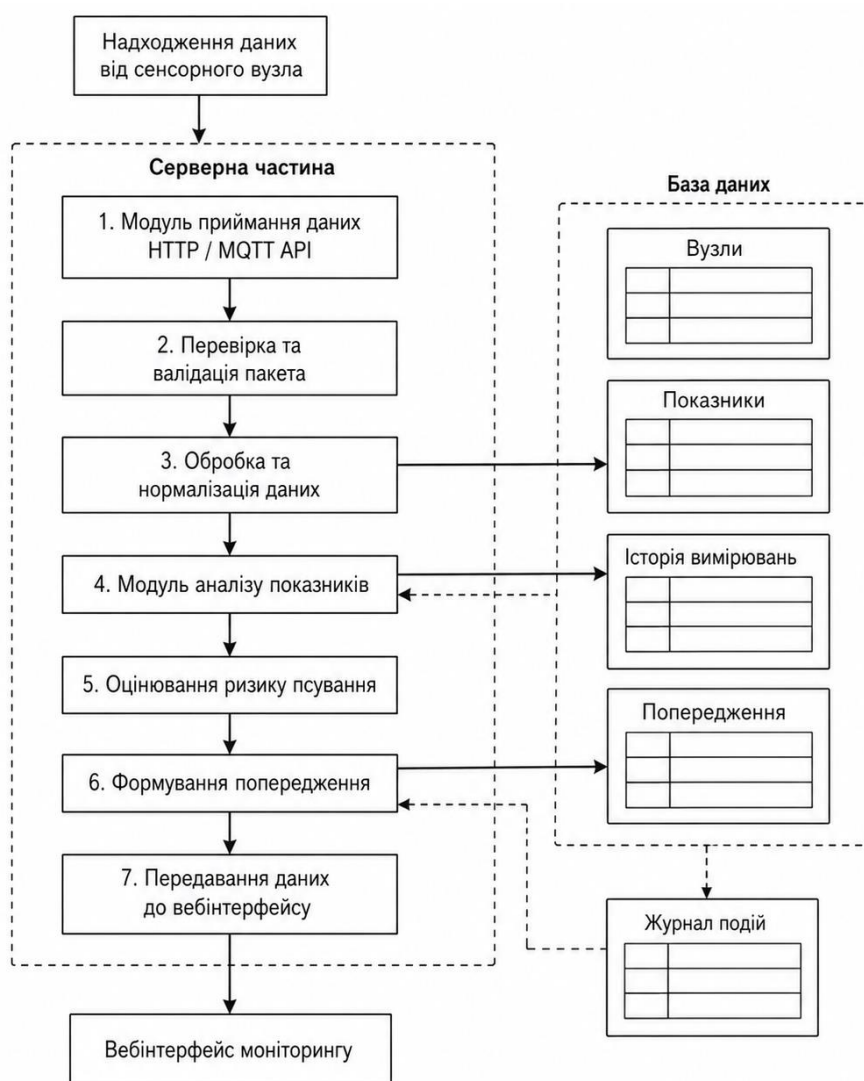


Рисунок 3.3 – Структура роботи серверної частини та бази даних системи моніторингу

У результаті реалізації серверної частини створено програмну основу, яка забезпечує стабільне приймання, збереження та підготовку сенсорних даних для подальшого аналізу. База даних організована таким чином, щоб підтримувати роботу з часовими рядами, подіями, налаштуваннями та декількома вузлами моніторингу. Це дозволяє системі не обмежуватися простим відображенням поточних значень, а накопичувати історію, виявляти повторювані відхилення та формувати інформаційну базу для алгоритму оцінювання ризику псування продуктів.

У серверній логіці також враховано можливість появи пропусків у даних. Якщо сенсорний вузол тимчасово не передає інформацію, система не повинна сприймати це як нормальний стабільний стан. Для цього передбачено перевірку часу останнього отриманого запису. Якщо дані не надходили протягом визначеного інтервалу, сервер формує службовий стан неактивності вузла або попередження про втрату зв'язку. Це дозволяє своєчасно виявляти не лише ризик псування продуктів, а й технічні проблеми самої системи моніторингу.

Окремо реалізовано механізм підготовки даних для відображення у вебінтерфейсі. Сервер не лише повертає “сирі” записи з бази даних, а й може формувати узагальнені значення за період, наприклад середню температуру, мінімальне і максимальне значення, останній газовий показник або поточний рівень ризику. Така попередня підготовка зменшує навантаження на клієнтську частину та дозволяє швидше оновлювати інформаційну панель. Для користувача це проявляється у вигляді оперативного відображення поточного стану, графіків і попереджень.

3.4 Реалізація алгоритму оцінювання ризику псування продуктів

Алгоритм оцінювання ризику псування продуктів реалізовано як центральний програмний механізм системи, який перетворює окремі сенсорні вимірювання у зрозумілу оцінку стану холодильного середовища. Його призначення полягає не лише у фіксації факту перевищення допустимих меж, а

й у визначенні небезпечних тенденцій, які можуть свідчити про початок небажаних процесів у продуктах. Такий підхід відповідає загальній логіці системи, у якій температура, вологість і газові показники розглядаються як взаємопов'язані параметри, а не як окремі незалежні значення.

Реалізацію алгоритму побудовано на основі даних, що надходять від сенсорного вузла та зберігаються у серверній частині системи. Після приймання нового пакета вимірювань сервер отримує значення температури, відносної вологості та газового показника, а також часову мітку і службову інформацію про стан сенсорного вузла. Перед початком оцінювання кожне значення проходить перевірку на коректність. Якщо показник виходить за фізично можливі межі або має ознаки технічної помилки, він не використовується для формування ризику псування. Це дозволяє уникнути ситуацій, коли збій окремого датчика помилково сприймається як реальне погіршення стану продуктів.

Першим етапом роботи алгоритму є нормалізація сенсорних показників. Оскільки температура, вологість і газовий сигнал мають різні одиниці вимірювання та різні діапазони значень, їх неможливо безпосередньо порівнювати між собою. Для цього кожен параметр переводиться у відносну оцінку, яка показує, наскільки поточне значення наближене до допустимої або небезпечної межі. Наприклад, температура в межах норми формує низький внесок у загальний ризик, тоді як її поступове наближення до верхньої межі підвищує значущість цього параметра. Аналогічно обробляються вологість і газовий показник.

Окреме значення в алгоритмі має температурний параметр, оскільки він безпосередньо впливає на швидкість мікробіологічних і хімічних процесів у продуктах. Якщо температура протягом певного часу залишається в допустимому діапазоні, система класифікує температурний стан як нормальний. Якщо значення наближається до граничного рівня або короткочасно перевищує його, формується попереджувальна ознака. У випадку тривалого перевищення

порога алгоритм переводить температурний фактор у критичний стан. При цьому враховується не лише саме перевищення, а й тривалість його збереження, оскільки коротке відкривання дверцят холодильника не повинно прирівнюватися до реальної несправності системи охолодження.

Показник вологості використано як додатковий фактор, який уточнює загальну оцінку стану середовища. Підвищена вологість може створювати сприятливі умови для розвитку плісняви та бактерій, а надто низька - призводити до висихання продуктів і зміни їх структури. У межах алгоритму вологість не розглядається як єдина підстава для висновку про псування, однак її відхилення підсилює ризик у поєднанні з температурним або газовим фактором. Саме така логіка дозволяє зробити оцінювання більш реалістичним, оскільки в реальних умовах псування рідко залежить лише від одного параметра.

Газовий показник відіграє важливу роль у ранньому виявленні небажаних змін. Сенсор MQ-135 не забезпечує лабораторного визначення конкретної речовини, проте дає змогу оцінювати загальну зміну газового складу повітря. У межах реалізованого алгоритму особлива увага приділяється не абсолютному значенню газового сигналу, а його динаміці.

Якщо газовий показник поступово зростає протягом кількох циклів вимірювання, система розглядає це як потенційну ознаку накопичення летких сполук, характерних для процесів псування. Якщо таке зростання відбувається одночасно з підвищенням температури або вологості, загальний рівень ризику збільшується значно швидше.

Інтегральний ризик псування розраховується як узагальнена оцінка на основі температурного, вологісного та газового факторів. Для кожного з них задано власну вагу, оскільки їх вплив на процес псування не є однаковим. Найбільшу вагу отримує газовий показник у поєднанні з температурою, оскільки саме така комбінація найкраще відображає можливий початок активних процесів розкладу. Вологість має уточнювальне значення, але при стабільному відхиленні також суттєво впливає на кінцеву оцінку. У результаті система формує не просте

повідомлення про перевищення порога, а зведений показник, який відображає загальний рівень небезпеки.

Практична логіка алгоритму реалізована так, щоб оцінювання виконувалося після кожного надходження нового пакета даних. Сервер отримує вимірювання, перевіряє його цілісність, порівнює з установленими порогоми, аналізує динаміку попередніх значень за певний проміжок часу та оновлює поточний рівень ризику. Якщо ризик залишається низьким, дані просто зберігаються в базі та відображаються у вебінтерфейсі в режимі реального часу. У разі виявлення переходу ризику в попереджувальний або критичний стан, система миттєво генерує відповідну подію, реєструє її в журналі бази даних та ініціює передачу сповіщення до інтерфейсу користувача.

Паралельно з цим запускаються механізми автоматичного реагування, що дозволяють мінімізувати затримку між виникненням загрози та вжиттям необхідних заходів. Такий підхід забезпечує безперервний моніторинг об'єкта, дозволяючи оператору не лише бачити поточну ситуацію, а й оперативно отримувати критичні попередження без необхідності постійного ручного оновлення системи..

Особливу увагу приділено роботі з історичними даними. Алгоритм використовує не лише останнє вимірювання, а й певне вікно попередніх значень. Це дозволяє визначати тренди, згладжувати випадкові коливання та оцінювати стабільність середовища.

Наприклад, якщо температура повільно зростає протягом тривалого часу, хоча ще не перевищує допустиму межу, система може сформувати попереджувальний стан. Такий механізм є важливим для раннього виявлення проблем, оскільки він дозволяє реагувати не після досягнення критичного значення, а ще на етапі формування небезпечної тенденції.

На рисунку 3.4 показано схему програмної реалізації алгоритму оцінювання ризику псування продуктів. У ній відображено основні етапи: приймання сенсорних даних, перевірка коректності, нормалізація, аналіз

порогів, оцінювання динаміки, розрахунок інтегрального ризику, класифікація стану та формування подій для вебінтерфейсу.

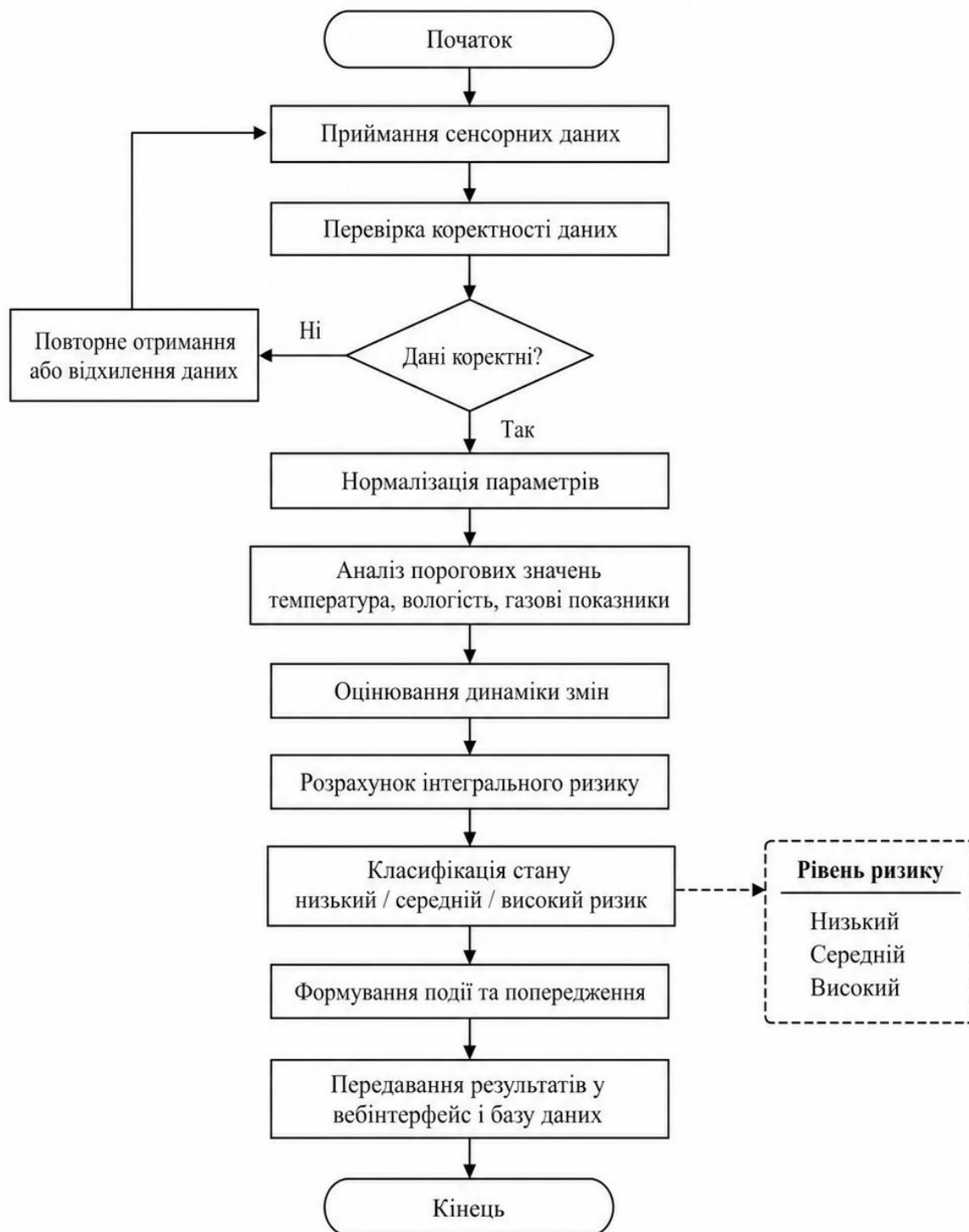


Рисунок 3.4 – Схема програмної реалізації алгоритму оцінювання ризику псування продуктів

У разі формування попередження алгоритм зберігає причину спрацювання. Це може бути перевищення температури, підвищення вологості, зростання газового показника або комбінована ознака. Такий підхід підвищує зрозумілість роботи системи, оскільки користувач бачить не лише сам факт ризику, а й причину його появи. Наприклад, повідомлення може вказувати, що попереджувальний стан сформовано через поступове зростання газового показника при нормальній температурі, або через одночасне підвищення температури й вологості. Це дозволяє швидше визначити можливу причину проблеми та перевірити стан холодильного обладнання або продуктів.

Для захисту від надмірної кількості повторних повідомлень реалізовано обмеження частоти формування попереджень. Якщо система вже створила подію про певний ризик, повторне повідомлення не формується після кожного нового вимірювання, доки стан не зміниться або не мине визначений інтервал часу. Це робить роботу інтерфейсу зручнішою та запобігає перевантаженню користувача однаковими сповіщеннями. Водночас критичний стан фіксується окремо, оскільки він потребує швидшого реагування.

У результаті реалізації алгоритму система отримала можливість переходити від простого відображення сенсорних значень до змістовної оцінки стану холодильного середовища. Поєднання температурного, вологісного та газового контролю дозволяє виявляти не лише явні порушення, а й початкові ознаки небажаних процесів. Це підвищує практичну цінність системи, оскільки вона не очікує моменту, коли псування стане очевидним, а формує попередження на основі сукупності вимірюваних ознак і їх зміни в часі.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розглянуто задачу створення кіберфізичної системи раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні. Актуальність обраної теми пов'язана з тим, що якість харчових продуктів залежить не лише від підтримання сталої температури, а й від сукупності параметрів середовища зберігання, серед яких важливу роль відіграють вологість, газовий склад повітря, тривалість зберігання та стабільність роботи холодильного обладнання. Простий температурний контроль не завжди дозволяє своєчасно виявити початкові ознаки псування, тому в роботі обґрунтовано необхідність переходу до багатопараметричного моніторингу.

У першому розділі проаналізовано особливості зберігання харчових продуктів у холодильному обладнанні та визначено основні фактори, які впливають на їх якість. Розглянуто процеси мікробіологічного, хімічного та фізичного псування, а також показано, що небажані зміни можуть розвиватися поступово й проявлятися ще до появи помітних зовнішніх ознак. Окрему увагу приділено летким сполукам, які виникають у процесі погіршення якості продуктів і можуть бути використані як додаткові інформаційні ознаки для автоматизованого контролю. Це дозволило обґрунтувати доцільність використання не лише температурних, а й вологісних та газових сенсорів.

У межах аналізу сучасних технічних рішень розглянуто підходи до моніторингу холодильного обладнання, використання IoT-засобів, сенсорних вузлів, газових датчиків, RFID/NFC-міток, індикаторів температурного впливу та електронних систем оцінювання свіжості.

У другому розділі спроєктовано загальну архітектуру системи раннього виявлення псування продуктів. Архітектуру побудовано як послідовність взаємопов'язаних рівнів: сенсорного, мікроконтролерного, комунікаційного, серверного, аналітичного та користувацького. Така структура дозволяє забезпечити безперервне збирання даних про температуру, вологість і газові

показники, їх передавання до серверної частини, збереження у базі даних, подальшу обробку та відображення результатів у вебінтерфейсі. Запропоноване рішення є гнучким і може бути адаптоване як для побутового холодильного обладнання, так і для торговельних вітрин або невеликих складських камер.

У третьому розділі реалізовано апаратну та програмну частини системи. Сформовано сенсорний вузол, який забезпечує зчитування температури, вологості та газового показника, виконано програмну логіку збору й передавання даних, а також реалізовано серверну частину для приймання, перевірки, збереження та підготовки інформації до відображення. Особливу увагу приділено перевірці коректності даних, базовому згладжуванню, обробці можливих помилок сенсорів і контролю стабільності передавання інформації. Це підвищує надійність роботи системи та зменшує ймовірність хибних спрацювань.

Практичне значення бакалаврської роботи полягає у створенні програмно-апаратної основи для доступної системи моніторингу холодильного обладнання. Запропонована система може використовуватися для контролю стану продуктів у холодильних камерах, торговельних вітринах, складських приміщеннях і побутових холодильниках. Її застосування дозволяє підвищити надійність зберігання, зменшити ризик втрати продукції та забезпечити більш своєчасне реагування на відхилення параметрів середовища.

У підсумку поставлену мету бакалаврської роботи досягнуто. Розроблено кіберфізичну систему раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні, яка поєднує сенсорний моніторинг, мікроконтролерну обробку, серверне збереження даних, алгоритм оцінювання ризику та веборієнтоване відображення результатів. Отримане рішення створює основу для подальшого вдосконалення, зокрема розширення набору сенсорів, додавання прогнозної аналітики, мобільних сповіщень і глибшого аналізу історичних даних.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Sabu A., et al. Advances in Food Spoilage Detection Through Gas Sensing. *Trends in Food Science & Technology*. 2026. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154326001201> (дата звернення: 26.02.2026).
2. Xu Y., et al. Integrated Smart Gas Tracking Device with Artificially Intelligent Management for Food Freshness Monitoring in Refrigerators. *Sensors*. 2023. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/19/8109> (дата звернення: 26.02.2026).
3. Naik A., et al. Smart Packaging with Disposable NFC-enabled Wireless Gas Sensors for Continuous Food Spoilage Monitoring . *Sensors (Basel)*. 2024. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11686504/> (дата звернення: 26.02.2026).
4. Ma M., et al. Applications of Gas Sensing in Food Quality Detection: A Review. *Foods*. 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10648483/> (дата звернення: 26.02.2026).
5. Damdam A. N., et al. IoT-Enabled Electronic Nose System for Beef Quality Monitoring: A Review . *Sensors (Basel)*. 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10252673/> (дата звернення: 26.02.2026).
6. Sun J., Chen H., et al. An electronic nose based on adaptive fusion of transformer-ELM with active temperature modulation algorithm for accurate odor detection in refrigerators . *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169923007317> (дата звернення: 26.02.2026).
7. Anisimov D. S., et al. Food Freshness Measurements and Product Distinguishing by Electronic Nose Approaches . *ACS Omega*. 2023. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c06386> (дата звернення: 26.02.2026).
8. Jayan H., et al. Intelligent Gas Sensors for Food Safety and Quality Monitoring: Recent Progress and Challenges . *Foods*. 2025. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/15/2706> (дата звернення: 26.02.2026).

9. Siciliano S., et al. Optical Gas Sensors in Smart Food Bio-Packaging . *Sensors International*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772275925000322> (дата звернення: 26.02.2026).

10. Ashiq J., et al. Advances in meat spoilage detection: A review of methods and emerging technologies . *Food Control*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0889157524003296> (дата звернення: 26.02.2026).

11. Schirone M., et al. Biogenic Amines in Meat and Meat Products: A Review . *Foods*. 2022. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8947279/> (дата звернення: 26.02.2026).

12. Recent Progress in Amine Gas Sensors for Food Quality Monitoring . *ACS Sensors*. 2022. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssensors.2c00639> (дата звернення: 26.02.2026).

13. Almeida C. M. R., et al. Biogenic amines detection in food: Emerging trends and electrochemical sensing strategies . *Talanta*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039914025004084> (дата звернення: 26.02.2026).

14. Xi X., et al. An ammonia sensor based on N-doped Ti₃C₂T_x/WS₂ heterojunction for rapid fish freshness detection . *Materials Today Chemistry*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468023025026112> (дата звернення: 26.02.2026).

15. Guo L., et al. A high-performance flexible ammonia sensing system with temperature decoupling for detecting fish freshness . *Chemical Engineering Journal*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894725127964> (дата звернення: 26.02.2026).

16. Xiaowei H., et al. Paper-Based Fluorescent NH₃ Sensor for Online Monitoring of Chilled Chicken Freshness . *Sensors (Basel)*. 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10757252/> (дата звернення: 26.02.2026).

17. Franceschelli L., et al. Sensing Technology for Fish Freshness and Safety: A Review . *Sensors*. 2021. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1373> (дата звернення: 26.02.2026).

18. Madhubhashini M. N., et al. Current applications and future trends of artificial senses in fish freshness evaluation . *Journal of Food Science*. 2024. URL: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1750-3841.16865> (дата звернення: 26.02.2026).

19. Kumaravel B., et al. Automated seafood freshness detection and preservation using machine learning with a paper-based pH indicator . *Scientific Reports*. 2025. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-08177-x> (дата звернення: 26.02.2026).

20. Sonwani E., et al. An Artificial Intelligence Approach Toward Food Spoilage Detection and Smart Food Management . *Frontiers in Public Health*. 2022. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2021.816226/full> (дата звернення: 26.02.2026).

21. Qin Y., et al. Development of electronic nose for cold-storage quality control: classification of early damage in strawberries at 4°C . *Frontiers in Nutrition*. 2023. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2023.1222988/full> (дата звернення: 26.02.2026).

22. Sanislav T., et al. A Comprehensive Review on Sensor-Based Electronic Noses for Food Quality and Safety . *Sensors*. 2025. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/14/4437> (дата звернення: 26.02.2026).

23. Protopappas L., et al. IoT Services for Monitoring Food Supply Chains: Temperature/Humidity Traceability with Low-Power Networks . *Applied Sciences*. 2025. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/13/7602> (дата звернення: 26.02.2026).

24. Aguiar M. L., et al. Real-Time Temperature and Humidity Measurements for Traceability in Horticultural Cold Chains . *Processes*. 2022. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/11/2286> (дата звернення: 26.02.2026).

25. Skawińska E., et al. Economic Impact of Temperature Control during Food Cold Chain Operations Using NFC Data Loggers . *Foods*. 2022. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/3/467> (дата звернення: 26.02.2026).

26. Wan Z., et al. Battery-free flexible wireless temperature sensing for food storage . *Digital Communications and Networks*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S245226272400103X> (дата звернення: 26.02.2026).

27. Nogues E., Mackowiack N., Hamdoun A., Latrach M. NFC/RFID sensor Tag for Wireless Temperature Monitoring in a Cold Chain . *E3S Web of Conferences*. 2022. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2022/18/e3sconf_icies2022_01038.pdf (дата звернення: 26.02.2026).

28. Zuo J., et al. RFID-based sensing in smart packaging for food applications: recent advances and challenges . *Sensors (Basel)*. 2022. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9576266/> (дата звернення: 26.02.2026).

29. Waldhans C., et al. Temperature Control and Data Exchange in Food Supply Chains: Applicability of Digitalized Time-Temperature Indicators . *Journal of Consumer Protection and Food Safety*. 2024. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41783-024-00165-2> (дата звернення: 26.02.2026).

30. Yar M. S., et al. Advances in intelligent time-temperature indicators for cold chain monitoring of perishable products . *Trends in Food Science & Technology*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092422442500264X> (дата звернення: 26.02.2026).

31. Lin Y. C., et al. Field verification of food quality monitoring in the cold chain by a laccase time-temperature indicator label . *International Journal of Food Science & Technology*. 2025. URL: <https://academic.oup.com/ijfst/article/60/1/vvae053/7943350> (дата звернення: 26.02.2026).

32. Yang L., et al. Exploration and application prospect of advanced time-temperature indicators for food and drug safety . *Textile Research Journal*. 2025. URL:

<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/00405175241266999> (дата звернення: 26.02.2026).

33. Gillespie J., et al. Real-Time Anomaly Detection in Cold Chain Transportation Based on Sensor Streams . *Sustainability*. 2023. URL: https://pure.ulster.ac.uk/files/113686805/sustainability_15_02255.pdf (дата звернення: 26.02.2026).

34. Lamberty A., et al. Technical, process-related and sustainability requirements for IoT-based temperature monitoring in fruit and vegetable supply chains . *Discover Food*. 2025. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44187-025-00427-1> (дата звернення: 26.02.2026).

35. Jiang S., et al. Internet of Things (IoT)-enabled framework for temperature monitoring and cold-chain management: design considerations and applications . *Heliyon*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024049417> (дата звернення: 26.02.2026).

36. Elngar A. A., et al. IoT Based Smart Cold Chain Temperature Monitoring with Data Analytics . *AIP Conference Proceedings*. 2023. URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article-pdf/doi/10.1063/5.0170641/18141536/050001_1_5.0170641.pdf (дата звернення: 26.02.2026).

37. Pambudi N. A., et al. Vaccine cold chain management and cold storage technology to address challenges in vaccination programs . *Heliyon*. 2021. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8706030/> (дата звернення: 26.02.2026).

38. Bonilla V., et al. A Systematic Literature Review of LoRaWAN: Sensors and Applications . *Sensors*. 2023. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/20/8440> (дата звернення: 26.02.2026).

39. Garcia A. F., et al. A LoRaWAN Multi-Network Server Application for Smartly Tracking Cold Chain . 2025. URL: <https://www.scitepress.org/Papers/2025/132116/132116.pdf> (дата звернення: 26.02.2026).

40. Enriko I. K. A., Gustiyana F. N. Implementation of Temperature and Humidity Monitoring System Using LoRaWAN for Pharmaceutical Industry . 2022. URL: <https://www.researchgate.net/publication/368485423> (дата звернення: 26.02.2026).

41. Puháč Bogadi N., et al. Food and Agriculture Defense in the Supply Chain: Integrating Monitoring with Food Safety Systems . *Applied Sciences*. 2025. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/20/11020> (дата звернення: 26.02.2026).

42. Liu P., et al. Design of shipborne cold chain monitoring system based on IoT nodes and environmental sensing . *IET Wireless Sensor Systems*. 2024. URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/wss2.12082> (дата звернення: 26.02.2026).

43. Dequilla-Pabiania M., et al. A Low-Cost Electronic Food Nose IoT-Based Fish Quality Monitoring System . *Chemical Engineering Transactions*. 2023. URL: <https://www.cetjournal.it/cet/23/106/082.pdf> (дата звернення: 26.02.2026).

44. Andrushko A., et al. Leveraging IoT Data for Accurate Temperature Forecasting in Food and Beverage Operations. 2024. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2024/dec/37366/252.pdf> (дата звернення: 26.02.2026).

45. Skibel P., Matiko F., Demkiv I. Prototype of IoT Monitoring System for Microclimate Parameters Based on ESP8266 with Web Visualization . 2025. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2025/dec/41531/jeecs-11-02-2025-paper-14.pdf> (дата звернення: 26.02.2026).

46. Kolomiets L. V., et al. Digitalization and Food Security of Ukraine: HACCP-based safety system perspectives . 2024. URL: <https://odatrya.org.ua/index.php/osatrq/article/download/315/321> (дата звернення: 26.02.2026).

47. Benty Z., et al. Continuous temperature monitoring in cold chains: compliance and traceability aspects . 2024. URL: <https://journals.economic-research.pl/tren/article/download/3774/2486> (дата звернення: 26.02.2026).

48. Jabbar W. A., et al. Development of LoRaWAN-based IoT system for real-time monitoring: architecture patterns and deployment lessons . *Expert Systems with Applications*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741742303364X> (дата звернення: 26.02.2026).

49. Lydia J., et al. Automated food storage monitoring system for warehouse environments based on IoT sensors . *Results in Engineering*. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665917422001064> (дата звернення: 26.02.2026).

50. Al-Asmari F., et al. Recent trends in organic colorimetric and fluorimetric sensors for ammonia and biogenic amines monitoring in food samples . *Nanoscale Research Letters*. 2025. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44442-025-00011-3> (дата звернення: 26.02.2026).

51. DS18B20. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/datchik-temperature-ds18b20>

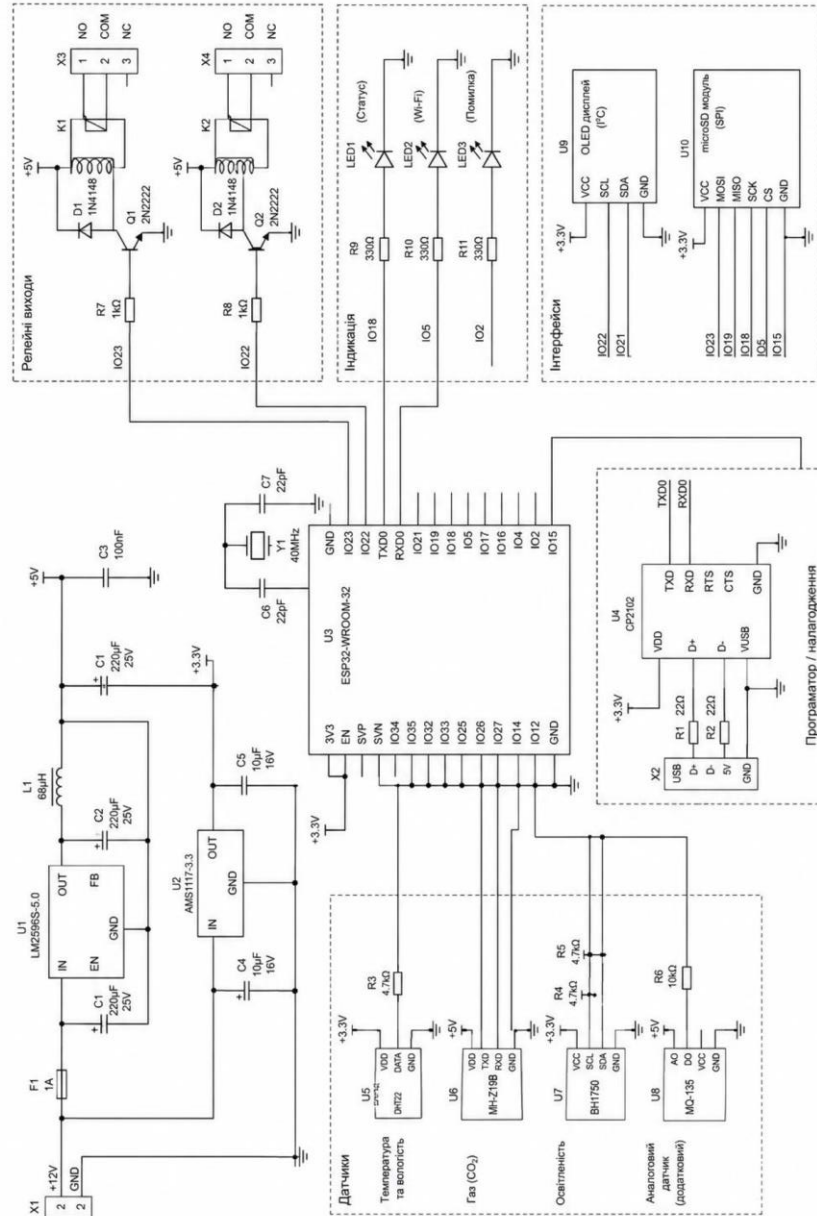
52. ESP32. URL: <https://ardushop.in.ua/arduino/developer-board-esp-wroom-32-esp-32-wi-fi-bluetooth>

53. MQ-135. URL: <https://arduino.com.ua/ua/p1373169561-datchik-modul-135.html>

ДОДАТОК В (обов'язковий)

Копія креслення «Апаратне забезпечення проєкту»

Схема електрична принципова



№ документа	Картка 2301122.23.01.41 ПЗ
Дата	
Версія	
Статус	
Склад	
Матеріали	
Замовник	
Виконавець	
ХНУ КІЕ-23-1	

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: Андрій САК

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні

Експерт: Тетяна КИСІЛЬ

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 1.67%

Коефіцієнт подібності 2: 0.46%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-27 21:01:50.0

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 процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-05-28

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. Помилоч в документах: 7%**

ID: 272545 Назва: БКР Кіберфізична система раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні Додано в БД: 2026-05-28 Автора: Андрій САК Керівники: Тетяна КИСІЛЬ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	101667	729	1119 (1%)	14 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Сак Андрій Михайлович

Тема: Кіберфізична система раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 60

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є проектування та реалізація мікроконтролерної кіберфізичної системи раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні на основі технологій інтернету речей .

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки та сучасних методів розробки: у першому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи проведено дослідження предметної області систем моніторингу умов зберігання продукції на основі технологій інтернету речей, проаналізовано особливості контролю параметрів середовища та біохімічних маркерів псування харчових продуктів у холодильних установках, розглянуто принципи побудови IoT-систем моніторингу, визначено основні вимоги до функціонування системи раннього виявлення псування продуктів та виконано постановку задачі дослідження. У другому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи виконано практичне проектування системи моніторингу стану продуктів, а саме: сформовано архітектуру системи, обґрунтовано вибір апаратних компонентів (мікроконтролера та відповідних датчиків), розроблено структуру мікроконтролерного IoT-вузла, організовано процес збору та обробки телеметричних даних, реалізовано механізм передавання інформації, до серверної частини,

визначено принципи взаємодії між вимірювальними вузлами та центральною системою, а також сформовано модель розподіленого кіберфізичного комплексу для контролю якості та умов зберігання. У третьому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи виконано реалізацію та перевірку роботи системи раннього виявлення псування продуктів у холодильному обладнанні, а саме: розроблено програмне забезпечення мікроконтролерного вузла, реалізовано серверну обробку телеметричних даних, створено інтерфейс контролю та моніторингу.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага аналізу предметної області; недостатньо чітко описано процес складання програмно-технічного засобу.

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 достатньому технічному рівні.

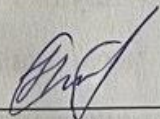
8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно (D/70)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Гетлик Наталія Сергіївна, д-р філософії
доцент кафедри КБ

“ 4 ” 06 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КІС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Андрій САК

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2с-23-1

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 Інформаційна система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із оптимізацією планування завдань

Автор Андрій САК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: к.ф.-м.н Тетяна КИСІЛЬ

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 укриття 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 1,67%; та системою Anti-Plagiarism складає 0,39%, 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

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Тетяна КИСІЛЬ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ