

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій ім. С.З.Гжицького
Факультет механіки, енергетики та інформаційних технологій
Кафедра інформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого бакалаврського рівня на тему:

«РОЗРОБКА ІоТ-СИСТЕМИ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЛОГІСТИКОЮ
ЛІНІЇ З ВИРОБНИЦТВА МАКАРОННИХ ВИРОБІВ»

Виконав: студент групи Акт-41
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

Возна І.Р.

Керівник роботи:

Запорожцев С.Ю.

ДУБЛЯНИ-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Освітній ступінь «Бакалавр» за спеціальністю –
151 – „Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри _____
д.т.н., проф. А.М. Тригуба
“ ____ ” _____ 202_ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту
Возній Ірині Романівні

1. Тема роботи

«Розробка IoT-системи для управління логістикою лінії з виробництва макаронних виробів»

Керівник роботи: Запорожцев Сергій Юрійович, к.т.н., доцент.

затверджена наказом по університету від “ 25 ” лютого 2025 р., № 123/к-с.

2. Строк подання студентом роботи: 10.06.2025 р.

3. Початкові дані до роботи:

Технологічні вимоги та обмеження при розробці IoT-системи управління логістикою лінії та САР мікрокліматом складу

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Технологічний процес виробництва макаронних виробів

1.2 Якість сировини та її вплив на виробничий результат

1.3 Основи забезпечення стабільної якості в харчовому виробництві

1.4 Сучасні IoT-рішення для моніторингу умов зберігання

2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Логістичний процес зберігання та переміщення сировини

2.2 Визначення параметрів керування мікрокліматом складу

2.3 Оцінка впливу вологості на логістичні рішення

2.4 Вимоги до САР вологості та логістики

3 РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Математична модель процесу зміни вологості

3.2 Підбір та розрахунок розміщення сенсорів для приміщення складу

3.3 Вибір RFID-системи та її інтеграція

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

ВИСНОВКИ**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Аналіз предметної області. Математичне моделювання об'єкту керування.
Результати моделювання САР мікроклімату. Особливості регулювання. RFID-
системи. Принцип роботи контролера. Вибір технічних засобів САР
мікроклімату складу. Вибір технічних засобів моніторингу логістики сировини.
Висновки.

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	Запорожцев С.Ю., доцент кафедри інформаційних технологій		
4	Городецький І.М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва		

7. Дата видачі завдання __ ____ 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Написання першого розділу та означення головних завдань роботи	25.02 - 21.03.25	
2	Виконання другого розділу та формування початкових даних	22.03 - 11.04.25	
3.	Виконання третього розділу та узагальнення отриманих результатів роботи	12.04 - 11.05.25	
4.	Написання розділу: «Охорона праці»	12.05 - 17.05.25	
5.	Вартісне оцінення ефективності пропозицій роботи	18.05 - 23.05.25	
6.	Завершення роботи в цілому	24.05 - 10.06.25	

Студент _____ Возна І.Р.
 (підпис)

Керівник роботи _____ Запорожцев С.Ю.
 (підпис)

РЕФЕРАТ

УДК 004.8:005.932]:664.691

Розробка IoT-системи для управління логістикою лінії з виробництва макаронних виробів

Возна І.Р. Кафедра ІТ – Дубляни, ЛНУВМБ ім. С.З. Гжицького, 2025.

Кваліфікаційна робота: 69 с. текст. част., 18 рис., 5 табл., 13 джерел.

Об'єкт дослідження – логістичний процес лінії з виробництва макаронів.

Мета роботи – розробка IoT-системи для управління логістикою технологічної лінії з виробництва макаронних виробів.

У роботі проаналізовано особливості логістики в харчовому виробництві, з акцентом на сегмент макаронних виробів. Розглянуто архітектуру логістичного процесу, ключові етапи транспортування, зберігання та контролю якості продукції. Особливу увагу приділено мікроклімату на складах, зокрема вологості та температурі, що впливають на збереження продукції. Запропоновано інтеграцію системи мікроклімату до загальної IoT-інфраструктури. Описано сучасні IoT-рішення для автоматизації логістики та використання RFID-технологій для відстеження продукції. Обґрунтовано вибір технічних засобів, зокрема сенсорів, контролерів та RFID-компонентів. Побудовано структурну і функціональну схеми системи, описано принцип її роботи та впровадження. Проведено економічний аналіз ефективності автоматизації та розглянуто питання охорони праці й екології.

Ключові слова: IoT-система, логістика, макаронне виробництво, RFID-технологія, автоматизація, мікроклімат, регулювання вологості.

Keywords: IoT system, logistics, pasta production, RFID technology, automation, microclimate, humidity control.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	7
1.1 Технологічний процес виробництва макаронних виробів	7
1.2 Якість сировини та її вплив на виробничий результат	11
1.3 Основи забезпечення стабільної якості в харчовому виробництві	16
1.4 Сучасні IoT-рішення для моніторингу умов зберігання	19
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ’ЄКТА	
КЕРУВАННЯ	22
2.1 Логістичний процес зберігання та переміщення сировини	22
2.2 Визначення параметрів керування мікрокліматом складу	25
2.3 Оцінка впливу вологості на логістичні рішення	30
2.4 Вимоги до САР вологості та логістики	34
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ	
АВТОМАТИЗАЦІЇ	41
3.1 Математична модель процесу зміни вологості	41
3.2 Підбір та розрахунок розміщення сенсорів для приміщення складу	48
3.3 Вибір RFID-системи та її інтеграція	57
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	62
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ	
АВТОМАТИЗАЦІЇ	64
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	68

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку харчової промисловості виробники шукають інноваційні рішення для забезпечення стабільної якості продукції, ефективного управління процесами та відповідності санітарно-гігієнічним вимогам. Це особливо актуально для виробництва макаронних виробів, де значну роль відіграють логістика, зберігання та контроль якості сировини й готової продукції.

Важливою складовою сучасного виробництва є впровадження автоматизованих IoT-систем, які забезпечують моніторинг логістичних процесів, оптимізацію переміщення продукції, зниження витрат і реагування на зміни мікроклімату. Контроль вологості, температури й циркуляції повітря на складах критично важливий для збереження якості виробів і запобігання їх псуванню.

Також актуальним є впровадження RFID-систем для автоматизованого обліку та відстеження продукції в режимі реального часу. Це дозволяє мінімізувати людський фактор, підвищити прозорість логістичного ланцюга та забезпечити вищий рівень безпеки харчових продуктів.

Автоматизація логістики позитивно впливає на економічну ефективність: зменшуються втрати через простої, нераціональне зберігання й помилки в обліку. Контроль мікроклімату у сховищах сприяє збереженню якості продукції та підвищує прибутковість.

Крім практичних переваг, впровадження IoT-рішень стимулює технологічний розвиток галузі: зростає кваліфікація персоналу, інтегруються цифрові системи обліку та розширюються можливості оперативного реагування на зміни ринку.

Отже, розробка IoT-системи для управління логістикою на підприємстві з виробництва макаронних виробів є актуальним напрямом підвищення ефективності, якості та конкурентоспроможності. Саме цьому й присвячена дана кваліфікаційна робота.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Технологічний процес виробництва макаронних виробів

Виробництво макаронів - це складний багаторівневий процес, який вимагає чіткого слідування технологічним параметрам на кожному етапі від підготовки сировини до перевезення готової продукції. [1, 2] Стабільна якість макаронних виробів, форми, структури та часу зберігання залежить як від характеристик борошна, так і від точності дотримання технологічного режиму. Зважаючи на це, макарони є одним із найчастіше регульованих у харчовій промисловості.

Цей процес починається з підготування сировини. Основним інгредієнтом виробництва макаронних виробів є пшеничне борошно з високим вмістом білка, глютену та хорошою здатністю до поглинання води. Перш ніж входити в змішувач, борошно очищується та проходить кондиціонування, і його вологість доводять до оптимального рівня для замішування. Важливо, щоб цей параметр залишався стабільним. Занадто багато сухого борошна створює ламкість тіста, але надмірна вологість спричинить надмірну липкість та порушення структури майбутнього продукту.

Після цього тісто замішується. Спеціальний змішувач (рис. 1.1) додає воду до борошна при точному співвідношенні. Суміш повинна бути однорідною, без грудочок і мати рівномірний розподіл вологи по всьому об'єму маси. На цьому етапі утворюються основні фізико-хімічні властивості тіста, що визначає поведінку матеріалу під час формування та сушіння. Консистенція тіста залежить не лише від рецепту, але і від температури води, тривалості замішування і навіть від вологості повітря.



Рисунок 1.1 - Машина для замішування тіста



Рисунок 1.2 - Прес для формування макаронів

Наступним етапом є формування виробів (рис.1.2). Замішане тісто подається у шнекові або вакуумні преси, де під тиском проходить через формувальні матриці, що надають виробу заданої форми — спагеті, вермішелі, трубочок, локшини тощо. Важливим моментом є дотримання рівномірності подачі тіста та контроль температури маси, оскільки перегрів може призвести до часткової клейстеризації крохмалю ще до сушіння. На виході з пресу свіжо-

сформовані макарони мають високу вологість, м'яку структуру й вимагають негайної стабілізації. [3, 4]

Для стабілізації структури та забезпечення тривалого зберігання макаронні вироби піддають процесу сушіння. Цей етап реалізується за допомогою спеціалізованих сушильних машин — тунельного або камерного типу, в залежності від масштабів виробництва (рис. 1.3). Сушарки забезпечують поступове видалення води за строго контрольованих температурних і вологісних режимів, які змінюються поетапно — від попереднього підсушування до остаточного висушування. Сучасні установки обладнані автоматизованими системами контролю, що дозволяють регулювати параметри повітряного потоку, швидкість циркуляції та тривалість сушіння для кожного типу макаронів. Це дає змогу мінімізувати ризики тріщиноутворення, деформації чи розвитку мікрофлори. Якість сушіння безпосередньо впливає на зовнішній вигляд, щільність та кулінарні властивості готової продукції. [5]



Рисунок 1.3 - Сушка для макаронних виробів TB100-R

Зберігання макаронних виробів після упакування є заключним етапом технологічного процесу, який має значення для підтримання первинних

органолептичних властивостей, товарного вигляду та харчової цінності продукції протягом усього часу зберігання. Складові споруди повинні бути сухими, провітрюваними, без прямих сонячних променів і з контролем вологи - не більше 60%. Температуру підтримують в інтервалі $+10^{\circ} \dots +20^{\circ} \text{ C}$. Перевищення допустимої температури або вологи призведе до зростання цвілі, пошкодження упаковки та навіть псування продукції.

Перевезення готової продукції здійснюється з врахуванням її крихкості, поглинанням вологи та потенційним механічним пошкодженням. Запаковані макаронні вироби транспортуються в контейнерах або на піддонах автомобілем або залізницею. Основними вимогами до транспортування є наявність захисного пакування, запобігання змінам температури, обмеження коливань та тиску пакету на упаковки. Оскільки макарони поглинають вологу з навколишнього середовища, герметичність контейнера є надзвичайно важливим, захищаючи продукт від атмосферної вологи та технічних запахів.

Щодо вимог до якості, макарони повинні відповідати набору обов'язкових критеріїв, визначених відповідно до державних стандартів або технічних характеристик виробника. Основні критерії: форма та розмір повинні бути однаковими, поверхня гладка, без тріщин чи пухирів, жовта або блідо-жовта, запах типова для пшеничних виробів, без сторонніх домішок. Вологість готового продукту не повинна перевищувати 13%, а кислотність - чотирьох градусів за шкалою Тутіра. Ці показники періодично визначаються між виходом з виробництва та за час зберігання.

Технологічні діаграми повинні використовуватися для візуалізації взаємозв'язку між етапами технологічного процесу. Ці діаграми демонструють основні блоки: підготовка сировини, змішування тіста, формування, сушіння, охолодження, упаковка, зберігання та транспортування. Між етапи вказуються контрольні точки - вимірювання вологи, температури, якості сировини та продуктів. Ця діаграма є не лише ілюстративним засобом, але й інструментом побудови процесів у системах автоматизації.

Дотримання технологічних вказівок на кожній стадії виробництва макаронних виробів є запорукою стабільної якості кінцевого виробу. Навіть невеликі відхилення від наведених параметрів - вологість тіста, температура сушіння, час охолодження - може призвести до значного зниження характеристик макаронних виробів або перевитрати сировини. Ось чому в контексті сучасного виробництва активно впроваджуються інтерактивні системи контролю виробництва: вимірювання параметрів відбувається під час виконання кожної технологічної операції, а отримані дані в режимі реального часу, проаналізують автоматичні модулі.

Завдяки розробці цифрових технологій системи моніторингу, управління та оптимізації виробництва базуються на принципах Інтернету речей (IoT), і концепція «розумного підприємства» стає все більш і більш актуальною. Використання вбудованих в машину або розміщених на стадіях виробничого циклу сенсорів, дозволяє відстежувати основні параметри: вологовміст тіста, температуру висушування, споживання енергії обладнанням тощо. Дані можна збирати, зберігати та обробляти в хмарному середовищі або локальному сервері, що дозволяє швидко реагувати на похибки, запобігти браку та приймати відповідні рішення.

Тому технологічний процес виробництва макаронів - це низка складних організаційних заходів, які потребують чіткого коригування, контролю та взаємодії. Високоякісне забезпечення кінцевих продуктів може бути лише в тому випадку, якщо всі одиниці працюють узгоджено починаючи від підготовки сировини до логістики. А інтеграція сучасної автоматизації та інструментів IoT створює основу ефективного, безпечного та конкурентоздатного виробництва.

1.2 Якість сировини та її вплив на виробничий результат

Сировина відіграє важливу роль у виробництві макаронних виробів, оскільки від її якісних характеристик залежать стабільність технологічного

процесу, органолептичні якості, структура та споживчі характеристики кінцевого продукту. Основним інгредієнтом виробництва макаронних виробів є пшеничне борошно - здебільшого з твердих пшеничних сортів, хоча інше борошно може використовуватися в окремих компаніях. Яким би не було походження, вимоги до якості для борошна залишаються високими та регулюються за допомогою стандартів харчової безпеки, технологічної сумісності та економічної доцільності.

Серед основних параметрів борошна особливо важлива вологість. Це пояснюється тим, що вона впливає на рівень гідратації при замішуванні тіста, тривалість сушіння та стабільність кінцевого продукту для зберігання. Надмірна вологість сировини призводить до посилення біологічної активності (розвиток мікрофлори, розвиток цвілі), погіршення умов зберігання, втрата сипучості та зміни в умовах виробництва реологічних властивостей тіста. Натомість низька волога може призвести до нерівномірного замішування, низьку пластичність тіста та тріщини на поверхні продукту. Вміст води вважається оптимальним у межах 13,5% - 14,5%, але конкретне значення залежить від типу макаронних виробів та рецепту.

Ще одним важливим фактором є вміст білка (в основному у вигляді клейковини). Саме структура білка утворює основу тіста, забезпечуючи його еластичність, здатність формувати та зберігати форми під час екструзії та сушіння. Високий вміст білка (більше 12%) є характерним для борошна більш високої якості, що визначає механічну стійкість продукту, стійкість до деформації та крихкості після приготування. З іншої сторони, недостатня кількість білка призводить до надмірної крихкості макаронних виробів, злипання та порушення текстури.

Вміст золи в тісті - це непрямий показник ступеня очищення зерна під час шліфування, який відіграє не менш важливу роль. Високий вміст золи вказує на забруднення елементів оболонки зерна, які можуть зменшити білизну борошна та вплинути на смакові характеристики макаронних виробів. Стандарти

виробництва встановлюють межу прийнятної зольності - зазвичай не більше 0,75% для макаронних виробів. Надмірний вміст мінерального забруднення модифікує здатність тіста до формування, збільшує ризик механічного зношування обладнання та сприяє швидкому псуванню кінцевого продукту в умовах високої вологості.

Показник крупності помелу, що є теж дуже важливим, має вплив на рівномірну гідратацію борошна, швидкість набряку клейковини та однорідну структуру тіста. Борошно, яке є занадто дрібним, призводить до надмірної гідратації, ускладнює контроль вологи в тісті і призводить до злипань у обладнанні для формування. Занадто великі фракції, у свою чергу, уповільнюють процес змочування, негативно впливаючи на з'єднання частинок у тісті, що робить його структуру зернистою і погано підлягає обробці. Оптимальний розмір фракцій макаронного борошна дає змогу одержати тісто з бажаними технологічними властивостями, забезпечуючи стабільність протягом усього циклу виробництва.

Необхідно також знати кислотність, що характеризує свіжий стан сировини та мікробіологічну безпеку борошна. Збільшення кислотності може показати появу самозігріваючого процесу, розвиток мікроорганізмів або порушення умов зберігання зерна. Кислотність контролюється відповідно до державних стандартів і повинна дотримуватися меж, щоб забезпечити збереження біохімічної стабільності та відсутність стороннього присмаку в готових продуктах.

Окрім фізичних та хімічних параметрів, важливі органолептичні властивості борошна. Високоякісне борошно для макаронів має бути однорідного кремового кольору, не маючи сірого або жовтого відтінку, це показує, що очищення є добре виконано і зерно без домішок. Запах повинен бути типовим для борошна, не затхлим, цвілим або гіркуватим, що може перейти до готових продуктів.

З точки зору результатів виробництва, використання сировини з оптимальними властивостями не тільки забезпечує відповідність продуктам зі стандартами, але й значно спрощує контроль технологічних режимів. Наприклад, стабільна волога та склад білка зменшує коливання під час тривалості замішування тіста, правильно регулює температуру та швидкість сушіння, уникає зупинки при перенастроюванні обладнання. Це, в свою чергу, допомагає зменшити споживання енергії, знизити втрати виробництва та збільшувати прибутковість.

Ще одним важливим аспектом є взаємодія сировини з умовами зберігання, оскільки навіть борошно найвищої якості в несприятливих умовах втратить свої властивості. Збільшення вологи в зоні зберігання може призвести до самозігріву, розвитку мікробіологічної системи, утворення шматочків, що унеможливить подальше використання сировини. Це вимагає суворого контролю температури та вологості на складі, а також використання автоматичних систем моніторингу.

Тому підтримка якості показників борошна не є одноразовим контролем і вимагає постійного моніторингу з моменту придбання та зберігання до впровадження в технологічний цикл. Ось чому в сучасних умовах виробництва автоматизація контролює сировину, особливо складу вологи, використовуючи відповідні сенсорні системи та програмне забезпечення, особливо актуальні. Це дозволяє швидко виявити відхилення, що дозволяє регулювати технологічний процес, або вирізати сировину, яка не відповідає вимогам своєчасно.

Залежність якості макаронних виробів від властивостей борошна особливо чітка у прикладах стабільності форми та структури готової продукції. Якщо глютен у тісті низький або змінна вологість, макарони розірватимуться, ламатимуться, або втратять зовнішній вигляд після фасування. Це не тільки зменшує споживчі характеристики, але й призводить до ускладнень у транспортуванні, збільшує відходи, що зменшує репутацію бренду та спричиняє фінансові втрати.

З точки зору технології, регулювання фізико-хімічних властивостей борошна тісно пов'язане з математичним моделюванням процесів змішування, гідратації та сушіння. Зокрема, коефіцієнт поглинання вологи, швидкість гідратації та середня термічна обробка можуть бути модельовані як функції вхідних властивостей сировини. У спрощеному вигляді вплив вологості W на гідратацію можна описати рівнянням:

$$H(t) = H_{max}(1 - e^{-kWt})$$

де $H(t)$ - рівень гідратації у часі; H_{max} - максимально можлива гідратація; k - константа, що характеризує швидкість поглинання; W — вологість борошна.

Це моделювання дозволяє виробникам передбачати зміни параметрів процесу залежно від зміни сировини та оптимізувати налаштування обладнання до початку партії. Це скорочує час, енергію та ресурси.

Кінцевим результатом правильного вибору та обслуговування високоякісної сировини є макаронні вироби з правильною формою, привабливого зовнішнього вигляду, необхідної міцності та стійкості до термічних впливів. Сировина з чітко визначеними параметрами якості є основою для всієї системи виробництва. Натомість невідповідності щонайменше одним параметром (наприклад, висока кислотність або надмірна вологість) можуть спричинити каскад відмови на всіх наступних етапах, від замішування тіста до зберігання готового продукту.

У цьому контексті контроль параметрів сировини повинен вважатися не тільки засобом для забезпечення якості продукту, але й невід'ємною частиною стратегії управління ризиками в компанії. Забезпечуючи стабільність властивостей борошна за допомогою автоматизованої системи моніторингу, принципи виробництва можуть реалізовувати та відповідати вимогам НАССР, ISO 22000 та іншим стандартам безпеки.

1.3 Основи забезпечення стабільної якості в харчовому виробництві

У харчовій промисловості стабільність якості продукту безпосередньо залежить від умов, в яких зберігається сировина. Особливо це стосується чутливих інгредієнтів як борошно, які зазнають вплив деяких хімічних та мікробіологічних факторів. Теоретичний підхід забезпечення стабільної якості сировини взятий з розуміння того, що будь -які відхилення порівняно з оптимальними умовами зберігання мають здатність накопичуватися, що позначається на кінцевих результатах виробничого процесу. Приклад зберігання борошна на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 - Зберігання сировини на складі

Що стосується тривалого зберігання, приділяється основна увага щодо запобігання процесам деградації, зокрема окислення, ферментативній активності, зростання мікробів та втрат вологості. Фактори ризику можна розділити на зовнішні (температуру, вологість повітря, освітлення, доступ до повітря, забруднення) та внутрішні (характеристики сировини: кислотність, гігроскопічність, вміст білка, жирів тощо). Якщо критичні значення цих показників перевищуються, виникає ризик утворення дефектів у технологічному ланцюгові: зміни у фізичних властивостях борошна можуть призвести до

неоднорідного змішування тіста, порушення формування продукту, тріщин після висушування тощо.

Відповідна організація зберігання ґрунтується на стандартах якості та гігієни, особливо на принципах ДСТУ, ISO 22000 та HACCP. Все це вимагає наявності розроблених процедур оцінки ризику та впровадження контрольних вимірювань. Такі заходи повинні бути зосереджені не лише на усуненні виявлених відхилень, але і на запобіганні їх виникнення. З цієї причини системи логістики складу та управління якістю повинні бути інтегровані на основі однієї інформаційної системи, яка збирає, зберігає та аналізує дані з датчиків у режимі реального часу.

Правильне зберігання сировини відіграє особливу роль у забезпеченні стабільної якості. принципи організації до складського упорядкування ґрунтуються на зонуванні, вентиляції, контролю температури та вологості і запобіганні контакту з джерелами інфекції - біологічними (гризуни, комахи) та хімічними речовинами (пари миючих засобів, сторонні речовини). Ефективне зберігання включає не лише розміщення сировини на піддонах або в контейнерах, але й створення умов контрольованої ротації партій за принципом FIFO (first in - first out). Цей підхід мінімізує ризики, пов'язані з перевищенням терміну зберігання та зниженням якості сировини.

Під час зберігання борошна дуже важливо підтримувати відносну вологість 60-65% при температурі нижче 18-20° С. В умовах високої вологості борошно з повітря її вбирає, що призводить до агломерації частинок, розвитку мікрофлори та змін реологічних властивостей. Натомість повітря занадто сухе може призвести до зменшення природної вологи борошна, що зменшить його масу та модифікує співвідношення у рецептурі. Ось чому параметри мікроклімату підлягають постійному контролю.

Важливо, щоб стабільна якість досягалася не тільки збереженням характеристик сировини, а й запобіганням руху забруднення. Це стосується, особливо, для повітряних домішок, які транспортуються повітряним потоком на

складі. Фільтр, бар'єрна система та система розділів із ізольованими областями для різних видів продуктів використовується для запобігання цьому поширенню.

Організаційний підхід на складі також повинен враховувати вимоги просторої мобільності. Доступ до будь-якої партії сировини повинна бути гарантована без необхідності переміщення інших піддонів. Цього досягають за допомогою оптимізованих транспортних маршрутів, використанням стелажів та впроваджуючи цифрову ідентифікацію партії.

Систематизувати процес зберігання в залежності від стандартів якості дає змогу виявити відхилення на ранніх стадіях. Зокрема, введення критичних точок контролю дозволяє визначати на якому етапі та які умови провокують ризики зниження сировини. Збір та обробка цих даних у поєднанні з автоматичними системами моніторингу дозволяє виробництву підтримувати стабільну якість без надмірного людського фактора.

Окрім технічних аспектів, не менш важливою умовою для забезпечення продукції стабільною якістю є стандарти навчання працівників з виробництва та складування (GMP, HACCP). Визначення чіткої процедури поводження з сировиною, контроль її якості, внесення показників у протоколи та ведення історії партії сприяє зменшенню ризику втрати чи браку. Такий підхід дозволяє швидко знайти джерело відхилення та ввести регулюючі дії.

Беручи до уваги вищезазначене, забезпечення стабільної якості сировини в харчовій промисловості є постійним процесом циклічного типу, що вимагає постійного збору даних, їх аналізу, оптимізації умов зберігання та швидкої відповіді на відхилення. Сучасні системи цифрового моніторингу в поєднанні з теоретичними принципами забезпечення якості утворюють складну модель управління, здатну пристосуватися до змін навколишнього середовища, сезонних коливань або варіативності партій сировини.

Тому інтеграція наукових методів, стандартів продовольчої безпеки та інструментів автоматизації дозволяє компанії підтримувати високу конкурентоспроможність та відповідати встановленим вимогам. Адже стабільна

якість -це не тільки запорука тривалий час зберігати сировину без втрат, але й основа надійності всього циклу виробництва.

1.4 Сучасні IoT-рішення для моніторингу умов зберігання

За сучасними умовами для цифрової конверсії харчової промисловості технології IoT займають центральну позицію в системі моніторингу, обліку та забезпечення якості продуктів на всіх етапах логістичного циклу. Ці технології особливо важливі в галузі контролю умов зберігання, в яких навіть невеликі відхилення порівняно з параметрами мікроклімату можуть спричинити втрату сировини або зниження якості кінцевої продукції.

Цей підрозділ спрямований на розкриття теоретичної основи використання IoT в харчовій промисловості, особливо в процесі моніторингу складів. Аналіз проводиться без конкретної реалізації, але зосереджується на загальних концепціях, принципах побудови та можливостях цих систем. Сформовані висновки дають підґрунтя для формування концептуальної основи для реалізації впровадження відповідних рішень, які будуть більш конкретизовані в наступному розділі дослідження.

Звичайна система IoT включає сенсорні вузли, інфраструктуру зв'язку, платформи обробки даних та взаємодія з користувачами. У контексті складського зберігання сенсори для вимірювання температури та вологості є найпоширенішими, оскільки вони забезпечують безперервний збір даних в режимі реального часу. Основними вимогами до цих датчиків є точність вимірювання, низьке споживання енергії та автономна робота тривалий час. [6, 7]

Технологічна архітектура IoT-систем часто пов'язана з використанням бездротових мереж, включаючи Wi-Fi, LoRaWAN або Zigbee, згідно з вимогами радіусу дії, пропускну здатності та енергоефективності. У харчовій промисловості слід використовувати технології низькопотоків з високою

проникністю сигналу, забезпечуючи надійний зв'язок навіть на складі з металевими стелажками, товстими стінами або екранованими ділянками.

Дані збираються з периферійних пристроїв, поступають через локальний порт на мікроконтролер, далі проходять попередню обробку інформації, перевірки на аномальні відхилення та формування пакетів до хмари або локального сервера. Крім того, інформація відображається у вигляді графіків, діаграм або таблиць, що дозволяє працівникам швидко визначити відмінності або важливі тенденції погіршення умов зберігання.

Важливим фактором систем IoT є те, що аналітичні алгоритми працюють в історичній базі даних і можуть забезпечити прогнозування стану середовища, виявити кореляцію між зміною зовнішніх параметрів та внутрішнім кліматом, а також робити рекомендації щодо логістичних дій. Отже, система від пасивного моніторингу переходить до розумного етапу управління, коли рішення про вентиляцію, осушення або переміщення сировини, автоматизовано ухвалюються на основі моделей машинних навчань.

Теоретична база даних також пов'язана з безпекою інформації про IoT, оскільки централізовані платформи збору даних, ймовірно, будуть потенційно вразливими до зовнішніх атак або втрати інформації. Протокол кодування, перевірка обладнання та розмежування доступу стають чудовою зброєю для забезпечення цілісності та конфіденційної безпеки даних.

У теоретичному контексті особлива увага приділяється також сумісності компонентів, тобто здатності датчиків, шлюзів, платформ та визначених користувачем додатків для взаємодії в межах одного протоколу або через універсальний API. Це дозволяє створювати гнучкі системи, які можна легко масштабувати, адаптуватися до нових умов або змінювати їх відповідно до вимог вашої компанії.

Стандартизація рішень IoT також є дуже важливою, оскільки забезпечує дотримання загальноприйнятих вимог якості та надійності у сфері харчової безпеки. Ці стандарти включають ISO 22000 (управління безпекою харчових

продуктів), НАССР (системи аналізу ризиків та контроль ключових моментів) та багато технічних характеристик, розроблених для промислового Інтернету речей.

Як результат, теоретичні моделі систем IoT, що контролюють умови зберігання в харчовій промисловості, включають багаторівневу взаємодію між датчиками, інфраструктурою передачі даних, платформами аналітики та користувачами. Ця модель є основою для побудови практичного рішення, яке буде розглянуто в наступному розділі цієї роботи, з урахуванням конкретних технічних заходів, параметрів навколишнього середовища та логістичних сценаріїв.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Логістичний процес зберігання та переміщення сировини

Ефективність сховищ для зберігання сировини, особливо борошна, безпосередньо залежить від організації логістичного процесу. Основні його компоненти включають просторове планування складу, технологію переміщення партій сировини, системи бухгалтерського обліку та методи управління запасами, враховуючи відповідний період придатного зберігання. Для харчової промисловості логістика має не лише економічне, а й санітарно-гігієнічне значення, оскільки прострочена чи зіпсована сировина, може призвести до порушення виробничого процесу та втрати якості кінцевої продукції.

Організація простору складу побудована відповідно до принципу зонування за функціонального призначення. Виділяються зони для приймання, зберігання, внутрішнього переміщення, комплектування та відвантаження продукції. Важливо, щоб потоки сировини не перетиналися, щоб уникнути плутанини або змішування партій з різним часом зберігання. Найпоширеніша лінійна або кільцеподібна організація внутрішніх маршрутів. Стосовно зберігання борошна, особлива увага приділяється мінімізації наслідків впливу вологості, пилу та температурних коливань. Це приводить до висновку, що приміщення мають бути герметичними, з контрольованою вентиляцією та стабільним мікрокліматом.

Переміщення сировини проводиться за допомогою складської техніки або автоматизованих систем (наприклад, транспортерів чи візків з направляючими). Дані маніпуляції проводиться за принципами FEFO (First Expired, First Out). Це означає, що першими зберігаються та експортуються ті партії, чий термін зберігання закінчується раніше. Особливо це стосується борошна, оскільки воно

має чіткий час зберігання, після його властивості можуть погіршуватися, особливо за умов підвищеної вологості. [8]

Система обліку партій включає в себе реєстрацію вхідної сировини, фіксацію її умов зберігання, а також контроль руху між ділянками складу. У сучасних умовах такий облік реалізується за допомогою електронних систем управління сховищами (WMS - Warehouse Management System), які не лише дозволяють відстежувати розташування кожної партії, але й зберігати інформацію про її характеристики, термін придатності, попередні маніпуляції з переміщення. Основою цієї системи є ідентифікації партій, які можуть бути реалізовані штрих -кодом або RFID-мітками. Останні мають перевагу у вигляді можливості дистанційного зчитування інформації без прямої видимості.

Управління запасами в контексті зберігання борошна, мають перед собою ціль забезпечити безперервність виробничого циклу при мінімізації втрат. До того ж використовуються математичні моделі для обліку та контролю запасів, включаючи моделі з фіксованим обсягом замовлення та змінним терміном постачання, а також моделями з фіксованим періодом поповнення. У простому вигляді рівень запасу Z у заданий момент часу можна описати рівнянням:

$$Z(t) = Z_0 - R \cdot t + Q(t)$$

де: Z_0 - початковий рівень запасу; R - середня витрата сировини за одиницю часу; $Q(t)$ - обсяг поповнення запасу на момент часу t , який може бути нульовим у періоди між поставками.

За допомогою цих моделей можна передбачити час досягнення критичного рівня запасів та планувати закупівлі своєчасно або переміщення сировини між складами. Ці розрахунки також враховують сезонні коливання потреб, термін доставки від постачальників та втрат, пов'язаних з псуванням продукції.

Особливу увагу в логістичному процесі слід приділити контролю дотримання умов зберігання за нормативними вимогами. У випадку борошна

основними параметрами є температура та вологість, тому слід контролювати, щоб вони знаходилися в межах рекомендованих стандартів. Різниця, пов'язана зі встановленими стандартами, створює передумови для розвитку шкідливих мікроорганізмів, зниження якості сировини та необхідності усунення її з складу передчасно. У таких випадках логістична система повинна реагувати оперативно: ізолювати небезпечну партію, переглянути подальші умови її використання або організувати прискорене відвантаження.

Зважаючи на це, ведення обліку перебування партій на складі є особливо важливими. З цією метою і формуються електронні картки, що містять інформацію про дату отримання, точки зберігання та умови мікроклімату, фіксовані на протязі усього періоду зберігання. Інтеграція цієї інформації з системою RFID дозволяє швидко зчитати всю історію партії при переміщенні чи плануванні ротації. Цей підхід є основою для прогнозування якості сировини в конкретний момент часу на основі фактичних умов зберігання.

У автоматизованій системі складу за допомогою технології RFID кожна партія борошна позначається унікальним ідентифікатором, який не тільки контролює його місцезнаходження, але й динаміку руху та накопичує дані в режимі реального часу. Наприклад, якщо вологість повітря буде перевищувати допустимий поріг, система може автоматично проаналізувати партії в зоні ризику та надалі позначати їх як потенційно нестабільні для тестування або відбраковування. Тому логістичні системи не тільки переміщують продукцію, але й оцінюють якість у контексті логістичних рішень.

Враховуючи просторову організацію складу, історію зберігання та документацію бухгалтерського обліку та фізичних властивостей сировини, ефективний контроль усіх етапів логістики може зменшити втрати, оптимізувати запаси та підтримувати стабільність виробничого процесу. На практиці це досягається шляхом впровадження комбінованих методів управління. Це поєднання систем обліку, автоматизованих систем з контролю мікроклімату та адаптивних алгоритмів прийняття рішень.

Як результат, логістичний процес зберігання та переміщення борошна є складним об'єктом управління з багатокomпонентною структурою. Тому його ефективність залежить не лише від фізичної організації приміщення складу, а й від гнучкості інформаційної системи, швидкості реакції на зміни умов та якості рішень стосовно ротації партій. Це автоматизована система управління мікрокліматом, яка буде розглянута в наступному блоці. Це створює необхідну умову для інтеграції логістики з автоматизованими системами управління мікрокліматом, які будуть враховані в наступних підрозділах.

2.2 Визначення параметрів керування мікрокліматом складу

Контроль мікроклімату в приміщеннях для зберігання борошна є важливим завданням забезпечення високоякісного зберігання. Ефективність цього контролю визначається точністю визначення основних фізичних параметрів, правильним вибором контрольованих та керованих величин та здатності системи реагувати на зміни у зовнішніх умовах або внутрішніх відхиленнях у режимі реального часу. Основа управління - це цілеспрямовані втручання в параметри середовища для досягнення стабільних умов, які не допускають, щоб сировина зіпсувалась або втратила свої властивості.

Серед керованих значень найважливішим є відносна вологість, температура повітря в складі, а також час, протягом якого конкретна партія борошна знаходиться в контрольованому просторі. Ці величини не є незалежними - між ними існують міцні функціональні та часові зв'язки, які утворюють загальну модель керованого об'єкта. Зокрема, вологість повітря залежить як від температури всередині, так і від зовнішніх атмосферних умов, проникності стінки, вентиляції тощо.

Фізична основа керування вологістю - це залежність між абсолютною та відносною вологістю, визначеною термодинамічними рівняннями. Відносна

вологість ϕ визначається як відношення парціального тиску водяної пари p до тиску насиченої пари при даній температурі $p_s(T)$:

$$\phi = \frac{p}{p_s(T)} \cdot 100\%$$

Оскільки $p_s(T)$ нелінійно залежить від температури, навіть невеликі коливання температури також спричиняють значні зміни відносної вологості, що вимагає постійного зрівноваження цих значень. Ось чому обидва параметри - температура та вологість - слід регулювати разом, а не ізольовано.

Окрім фізичних умов навколишнього середовища, на вибір регульованих параметрів впливає інший важливий фактор: час перебування сировини на складі. З часом, навіть із стабільним мікрокліматом, може відбуватися в борошні процес старіння, поглинання води з повітря, розвиток мікрофлори. Тому управління умовами зберігання повинно бути динамічним залежно від дати партії. Для "старих" партій пороги вологості можуть встановлюватися жорсткіші або вимоги до частоти перевірки є більш суворими.

Загалом, системи управління мікрокліматом складу працюють на основі моделі "об'єкт – середовище – вплив", в якому об'єктом є борошно, навколишнім середовищем - простір сховища з його фізичними характеристиками та впливом - дії виконавчих механізмів (осушувач, нагрівач, вентиляція). Для формалізації даної системи використовується концепція вхідних та вихідних параметрів.

Вхідні параметри системи:

- температура зовнішнього повітря,
- вологість зовнішнього повітря,
- теплове випромінювання (сонячна радіація, тепло від техніки),
- теплопровідність будівельних конструкцій,
- час відкриття дверей/вікон/люків,
- тепловиділення від сировини.

Вихідні:

- поточна вологість повітря в зоні зберігання,
- температура в середині приміщення,
- стан мікроклімату по окремих зонах (градієнт розподілу).

Завдання системи автоматичного управління полягає в мінімізації різниці у вихідних параметрах порівняно з встановленими нормативними, тобто шляхом підтримки стабільного режиму зберігання. У математичному сенсі це досягається шляхом створення набору коригувань, щоб мінімізувати функцію відхилення:

$$J = \int_0^T [w_1 \cdot (H(t) - H_{\text{норм}})^2 + w_2 \cdot (T(t) - T_{\text{норм}})^2] dt$$

де: $H(t)$, $T(t)$ — поточні значення вологості й температури; $H_{\text{норм}}$, $T_{\text{норм}}$ — цільові значення; w_1 , w_2 — вагові коефіцієнти важливості параметрів.

Ця інтегральна функція якості дозволяє встановити систему для зменшення загального відхилення протягом усього періоду спостереження.

Зазначені параметри керуються за допомогою автоматизованої системи, включаючи сенсорні модулі, виконавчі механізми (осушувач, вентиляція, нагрівач) та контролер або промисловий комп'ютер з регуляторними алгоритмами. У більшості випадків такі системи використовують ПІ-регулятори, які стабілізують атмосферну вологість у вибраних областях без надмірного впливу на споживання електроенергії.

Поведінку об'єктів, з огляду на зміни вологи повітря, можна пояснити у вигляді передавальної функції:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

де: K - коефіцієнт підсилення (відповідає реактивності об'єкта на вплив керуючого сигналу); τ - постійна часу (визначає інерційність системи); s - комплексна змінна Лапласа.

На основі цієї моделі ПІ-регулятор будується за формулою:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau$$

де: $u(t)$ - керуючий вплив (наприклад, рівень подачі потужності на осушувач); $e(t) = N_{\text{норм}} - N(t)$ - поточна похибка між бажаним і фактичним рівнем вологості; K_p - коефіцієнт пропорційного регулювання; K_i - коефіцієнт інтегрального регулювання.

Добре налаштований ПІ-регулятор не тільки забезпечує негайну реакцію на відхилення від норми вологості, але й забезпечує плавне зниження інтенсивності осушувача при наближенні до цільових умов. Це запобігає "пересушуванню" сировини, що також має не аби який негативний вплив на якість борошна.

Окрім технічної сторони, важливо враховувати особливості фізичної структури приміщення складу – розподіл вологи і температури в реальних умовах може бути нерівномірним. Насправді помічено, що повітряні маси біля підлоги можуть мати відмінні параметри, ніж біля стелі. Кути приміщення вентилуються гірше, з чого випливає, що там може бути зона з підвищеним вмістом вологи. З цієї причини сенсорні системи повинні бути децентралізовані. Області високого ризику (ділянки кутів, місце скупчення сировини) мають бути оснащені окремими датчиками температури та вологи, які надсилають дані в єдину систему управління.

Важливо зіставити інформацію з сенсорів з розташуванням конкретних товарних партій. Використовуючи маркування RFID, система фіксує, яка партія та де вона знаходиться, і порівнює історію її перебування із значеннями вологи

в конкретно визначеній зоні. Це допомагає не лише підтримувати стабільний мікроклімат, але й забезпечувати повну простежуваність умов для кожної партії, які можна продовжувати використовувати для оцінки якості та подальших рішень стосовно логістики (наприклад, порядок використання згідно принципу FIFO).

Більше того, управління вологою не є відокремленим процесом. Воно тісно прив'язане до температури, вентиляції і режимом доступу (час відкриття дверей, активності експлуатації навантажувачів тощо). Наприклад, відкриття воріт різко в холодні сезони може спричинити короткочасне утворення конденсату на стінах, збільшуючи локальну вологість повітря, зокрема в кутових ділянках. У таких випадках система також повинна враховувати моделі часових шаблонів, коли використовуються алгоритми прогнозування - наприклад, виходячи з коливань добової динаміки або розкладу роботи складу.

У той же час, доцільним є впровадити систему реєстрації й аналізу накопиченої «вологи ризику» у загальний облік кожної партії. Якщо певна партія знаходиться на ділянці з вологістю, близькою до високого граничного значення, протягом тривалого періоду часу, такій партії все одно потрібно буде пройти додаткові перевірити або ротацію, навіть якщо поточна вологість є нормальною. Це фіксується за допомогою інтегрального показника впливу навколишнього середовища на партію:

$$V_{\text{накоп}} = \int_{t_0}^t \max(0, H(t) - H_{\text{доп}}) dt$$

де: $H_{\text{доп}}$ - гранично допустима вологість; $V_{\text{накоп}}$ - інтегральна оцінка "вологісного навантаження".

У разі, коли $V_{\text{накоп}}$ вищий за допустиму норму, партія отримує статус «обмежене використання», або позначається як та, якій потрібна контрольна дегустація.

Як результат, системи мікрокліматичного управління є багатофакторними, з динамічним зворотним зв'язком, що вимагає не лише контролю температури та регулювання вологості, але й потребує чіткого уявлення про локалізацію сировини, її віку та історії умов зберігання. Таке інтегроване управління не тільки забезпечує фізичну стабільність продукту, але й покращує якість логістичних рішень, задля запобігання втратам та гарантування відповідності санітарним приписам.

2.3 Оцінка впливу вологості на логістичні рішення

Оцінка впливу вологості повітря на логістичні рішення є головним фактором управління складом, що зберігає сировину, чутливу до умов навколишнього середовища - зокрема борошно. Висока вологість у зоні зберігання призводить до виникнення ризиків втрати якості продукту, його псування і тим самим знижує ефективність усієї логістичної системи. Тому управління вологою є важливим аспектом не тільки для забезпечення стандартів зберігання, але й для прийняття ключових рішень щодо місцезоташування, переміщення чи списання сировини.

Зміни вологи в області складу сприймаються як оповіщення про потенційний ризик. У випадку перевищення порогу вологості максимально допустимого значення (наприклад, 70% відн. вологості), логіка автоматичної реакції активується для певної площі приміщення. Сюди входить оперативні заходи коригування мікроклімату (наприклад, викання осушувача) та логістичні дії - негайні ефекти корекції при безпечнішому обертанні або пом'якшенні сторін із небезпечних зон, особливо для безпечніших. та логістичні дії - виведення партії із зони підвищеного ризику та розміщення її у безпечнішому місці.

Процес прийняття рішень у такій системі заснований на логічному та математичному алгоритмі, що оцінює кілька параметрів:

- поточний рівень вологості у зоні розташування конкретної партії сировини;
- час перебування цієї партії в умовах несприятливої вологості;
- термін зберігання сировини, тобто її залишковий ресурс;
- пріоритет партії (наприклад, за термінами поставки або планами виробництва).

Ризик пошкодження сировини обчислюється на основі цих параметрів. Його можна формалізувати через функцію:

$$R = f(H, t, \tau)$$

де: R - ризик пошкодження; H — відносна вологість у зоні зберігання; t — час перебування в зоні підвищеної вологості; τ — залишковий термін зберігання партії.

Функція ризику може мати порогові значення, наприклад:

$R \geq R_{кр} \Rightarrow$ вибраковування або переміщення

$R_{норм} < R < R_{кр} \Rightarrow$ ротація / переміщення

$R \leq R_{норм} \Rightarrow$ залишити без змін

Ці рівні можуть визначатися на основі стандартів зберігання продуктів харчування або експериментальних даних компанії.

На додаток до математичної оцінки ризику, система може враховувати обмеження логістичні - зокрема, наявність вільної зони для переміщення, час, необхідний для ротації та поточні графіки відвантаження та завантаження сировини.

З практичної точки зору, система керування може реалізувати логіку у вигляді набору умовних операторів у контролері або програмному забезпеченні:

- якщо вологість $> 70\%$ і час > 24 год — перемістити партію;
- якщо вологість $> 75\%$ — поставити партію в чергу на перевірку;

- якщо залишковий термін зберігання < 10 днів — уникати переміщення, обмежитися локальними заходами.

Такі правила можуть бути реалізовані в модулях у системах SCADA або логістичних платформах, які дозволяють отримати доступ до даних з RFID-міток (ідентифікатор партії), мережі сенсорів (температура, вологість) та часових міток (тривалість перебування в заданій області).

Як результат, управління мікрокліматом та логістичними процесами базується на формальній логіці, яка враховує не тільки поточні дані, але і динаміку змін. Таким чином можна мінімізувати втрати, запобігти псуванню сировини та ефективно використовувати ресурси складів.

На практиці ефективне впровадження логістичних рішень, які відштовхуються від вологості, базується на інтеграції сенсорних мереж та інформаційних платформ, що забезпечує взаємозв'язок між технічним станом складського приміщення та інструкціями в цифровому форматі для співробітників чи автоматизованих засобів. Логічний модуль, який є центральною частиною цієї платформи, постійно оновлює карти ризиків по усьому приміщенні складу.

Кожна партія має власний цифровий запис на основі даних з RFID-міток. Там містяться дані щодо дати виробництва; місце розташування; історію переміщень; умови навколишнього середовища для кожної зі зон; загальне навантаження вологою, що відображає кумулятивні впливи мікроклімату.

Таким чином ми можемо використовувати концепцію «динамічної придатності сировини», яка змінюється з часом залежно від умов зберігання. Наприклад, партія, що зберігається в оптимальних умовах, залишатиметься високопридатною навіть після двадцятиденного періоду зберігання, в той час як інша, яка потрапляє у ділянку з підвищеною вологістю, вже через 5 днів може потребувати втручання.

Для формального опису зміни придатності використовується модель деградації сировини:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-k \cdot H_{\text{cp}} \cdot t}$$

де: $Q(t)$ - залишкова якість партії через час t ; Q_0 - початкова якість (наприклад, 100%); H_{cp} - середній рівень вологості в зоні за час t ; k — емпіричний коефіцієнт, що визначає чутливість сировини до вологи.

На основі даної формули можна ввести 3 логістичні дії залежно від $Q(t)$: якщо $Q(t) > 90\%$ - партія придатна, змін не потрібно; якщо $Q(t) \in (70\%, 90\%)$ - партію бажано перемістити в кращі умови; якщо $Q(t) < 70\%$ - партія переходить у категорію контрольної перевірки або вибраковується.

Впровадження алгоритму можна описати за допомогою блок-схеми, що постійно аналізує кожну партію в режимі реального часу. Тому система являє собою перелік дій:

- пріоритетне переміщення: коли декілька партій опиняються у зоні ризику одночасно, пріоритет переміщення надається тій, у чий залишковий термін зберігання є найменшим або найвищий рівень деградації;

- вибраковування: Якщо попри переміщення умови зберігання все ще не дають змоги підтримувати необхідну придатність - автоматично генерується акт списання, що передається призначеному логісту;

- профілактичне спрацювання: якщо зміна вологи відхиляється від граничної норми на 5 - 10% і зберігається довше шести годин – система надсилає попереджувальне сповіщення, генеруючи відповідні застереження та рекомендації;

Слід зазначити, що дані, що використовуються для прийняття такого рішення, повинні бути репрезентативними. Це вимагає, щоб була відповідна щільність сенсора, дані оновлювалися щонайменше кожні 5-10 хвилин і референтна точна RFID-мітки була прив'язаною до конкретної ділянки зберігання.

При інтеграції цієї системи з платформою ERP (наприклад, SAP або 1C) статус партії матиме змогу автоматично змінюватися: «в нормі», «під ризиком»,

«потрібне переміщення», «браковано». Це дозволяє компанії швидко реагувати на зміни умов зберігання, мінімізувати збитки та забезпечити якість продукції в логістичному ланцюзі.

2.4 Вимоги до САР вологості та логістики

Для забезпечення надійної роботи інфраструктури складу для зберігання гідроскопічної сировини необхідна автоматизована система управління мікрокліматом, тісно інтегрована в логістичні процеси. Її особливості повинні включати фізичний моніторинг навколишнього середовища (вологи, температури) та цифрову ідентифікацію кожної партії продукту, його положення, час зберігання, історію переміщень та оцінку ризиків псування.

Структура такої системи включає низку взаємозалежних рівнів: сенсорний рівень, рівень збору даних та обробку, логіку управління, а також рівні взаємодії з операторами (НМІ).

На рівні сенсорів цифрові гігрометри та термометри з безперервною передачею даних відіграють ключову роль. Щоб забезпечити покриття всього простору приміщення, вони мають розміщуватися в зонально-рівномірному порядку. Для ефективної роботи система повинна враховувати неоднорідність простору умов, особливо появу "мокрих ділянок" через розлади вентиляції або проникнення ззовні. Датчики повинні працювати з точністю $\pm 2\%$ вологовмісту і мати інтервал часу не більше 5 хвилин.

Обробка зібраних даних проводиться у вигляді структурованої основи з координатами прив'язування кожної контрольної точки на фізичній карті складу. Це дозволяє виконати тривимірну візуалізацію мікроклімату та його динамічний аналіз в часі. Крім того, дані зберігаються у вигляді тимчасових рядків, що дозволяє використовувати алгоритми аномального прогнозування та аналізу. У найпростішому вигляді часова динаміка вологості для точки і моделюється функцією:

$$H_i(t) = H_{i,0} + \int_0^t \Delta H_i(\tau) d\tau$$

де $\Delta H_i(\tau)$ - швидкість зміни вологості в зоні i у момент часу τ .

Цей етап обробки повинен бути інтегрований у логістичні бази даних, що містять інформацію про партії борошна. Для цього використовується система ідентифікації RFID. Кожна партія має індивідуальну електронну мітку, з якої система читає всю актуальну інформацію. Це початок терміну зберігання, вага, походження та рекомендації до умов зберігання. Підключення RFID до координатної сітки складу надає можливість достеменно визначити, які умови зберігання у кожної одиниці продукту.

Інформаційна структура системи повинна мати щонайменше три типи даних:

- просторові: зона, координати сенсорів, місця розташування партій;
- часові: хронологія змін мікроклімату, терміни перебування товару;
- логістичні: статус партії, історія переміщень, пріоритетність у розподілі.

Ці дані повинні бути синхронізовані в режимі реального часу за допомогою центрального сервера або хмарної платформи для швидкого реагування на порушення. Система вимагає обмінного модуля з ERP/SCADA. Це дозволяє логістичній логіці адаптуватися до виробничих планів, відвантажень або надходжень нових партій.

Інша роль у оцифровуванні логістичних процесів на складі належить технології RFID, що є частиною інфраструктури IoT-рішень. Інтеграція дозволяє забезпечити автоматичне ідентифікування, облік та моніторинг партії сировини в режимі реального часу без ручного втручання. [9] Принцип використання полягає у експлуатації радіочастотних міток, прикріплених до транспортних одиниць (мішків, контейнерів, піддонів) борошна. У основні точки управління складом встановлюють зчитувачі, що автоматично фіксують мітки в зоні дії та надсилають інформацію про ідентифікацію до центрального контролера.

Опираючись на унікальний код, записаний в мітці, система може визначити не тільки походження партії, але й історію зберігання, параметри мікроклімату та дати закінчення терміну придатності. Це забезпечує реалізацію принципу відстеження для всіх одиниць сировини. Якщо системою було виявлено невідповідність умовам зберігання, визначається які партії знаходилися на ділянці з підвищеною вологістю та які потрібно перевірити, перемістити чи списати.

Зчитування мітки є безконтактним, значно скорочуючи час запасів, мінімізуючи помилки та прискорюючи логістичні операції. Обробка даних відбувається за допомогою мікроконтролера або через шлюз IoT. Потім інформація зберігається або на локальному сервері, або в хмарному середовищі, яке доступне для керівництва складу або логіста за допомогою веб-інтерфейсу або мобільного додатку.

Тому система може автоматично реагувати не лише зі зміною мікроклімату, але й змінити статус партії - наприклад, перемістити її в іншу область, обмежити видачі для транспортування або надсилання сповіщень про критичні терміни зберігання. Реалізація RFID дозволяє комбінування фізичних та цифрових середовищ для створення умов для повністю автоматизованого контролю якості, обліку та логістики на складі такої сировини як борошно.

Одним з найважливіших функціональних компонентів автоматизованої системи управління мікрокліматом є логіка програмного забезпечення, яка визначає сценарій відповіді для зміни умов зберігання. Ця логіка повинна бути реалізована як частина керуючого ПЛК або серверного додатку, яка взаємодіє з сенсорною мережею, RFID -зчитувачем та інтерфейсом для персоналу.

Логіка програмного забезпечення базується на системі порогових значень, моделях прогнозів та правилах пріоритетів. Якщо вологість повітря перевищена в іншій зоні (наприклад, 60% або більше), система повинна утворювати сигнал тривоги більше 30 хвилин і визначити список потенційно постраждалих партій, зорієнтувавшись по координатах RFID-міток. У той же час, вона утворює

рекомендацію про необхідність переміщення певної партії в безпечну зону, необхідність вручну перевірити якість сировини або необхідність вимкнення осушувача, якщо вологість повітря опуститься нижче мінімально дозволеної (наприклад, 40%).

Фактичні системи мають кілька рівнів логіки, включаючи попередження, активні дії та критичні втручання. Наприклад, якщо вологість повітря перевищує 5%, буде утворено повідомлення. Якщо він перевищує 10%, переміщення партій та запис будуть автоматично утворені в журналі контролю якості.

Також система повинна робити прогнози на основі історичних даних. Використання методів рухомого середнього або експоненційного згладжування дає можливість передбачити загрозу утворення вологих зон, перш ніж вони перейдуть до критичної стадії. Це дозволяє системі вживати заходів випереджувально - наприклад, запустити додаткові осушувачі або змінювати логістику достроково щоб краще розмістити нові партії.

Інтерфейс взаємодії з оператором (НМІ або веб -інтерфейс) повинен включати графічні мапи, побудовані з візуалізацією вологості зони, динамічним графіком змін мікроклімату, таблиць партій у критичних умовах, а також журналів з подіями та логістичними втручаннями. Це дозволить оператору отримувати повну картину складу до дозволить втрутитися вручну, якщо раптом система не впорається з позаштатною ситуацією (рис. 2.1).

Особливу увагу слід приділяти інтеграції з RFID. Вона не тільки визначає партії, але й автоматизує дії. Наприклад, якщо оператор просто сканує мітки, система самостійно оновлює координати, реєструє умови зберігання для нової зони та проводить повторну оцінку ризиків (рис. 2.2).



Рисунок 2.1 - Організація складу через НМІ



Рисунок 2.2 - Збір даних про сировину RFID-мітками

Для того, щоб забезпечити ефективність та стабільність системи автоматичного контролю вологості на складі, важливо задекларувати в її архітектуру вимоги, щоб забезпечити тривалий термін експлуатації без втрати функцій, здатності збільшення з новими умови виробництва, а також адаптування до розвитку виробництва чи обсягів продукції на складі.

Надійність системи повинна гарантуватися за допомогою резервування основних компонентів - особливо дублювання контролера або центрального сервера, ємність локального збереження даних у разі втрати зв'язку з мережею та підтримки аварійного протоколу. Важливим є те, що навіть у частковому відключенні елементів (наприклад, вихід з ладу датчиків в одному з секторів) система може продовжувати працювати, використовуючи дані з навколишніх ділянок та статистичне згладжування. Також надійність визначається стабільністю обміну між модулями та відсутністю критичних затримок у зворотному зв'язку - бажання - цикл збору даних, і прийняття рішення не має перевищувати 1 хвилину.

Масштабованість означає, що структура системи дозволить просте розширення - як з точки зору кількості датчиків, так і маси контрольованих партій. Це досягається за допомогою архітектури модулів: кожна область складу може бути оснащена окремим незалежним блоком для збору та обробки інформації, підключеної до однієї мережі. Якщо склад розшириться, просто додадуться нові блоки, не вдаючись до реорганізації усієї системи. У програмному забезпеченні важливо, щоб нові датчики, читачі або логістичні блоки могли бути внесені у систему через файл конфігурації або інтерфейс адміністратора, не перепрошиваючи весь PLC.

Особливу увагу слід приділити на інтеграцію з іншими рівнями автоматизації, особливо ERP-системами компанії. Це дозволяє поєднувати дані про залишки на складі, обігові партії, виробничі замовлення та графіки поставок з даними про мікрокліматичні умови. Надалі така інтеграція дозволить здійснити концепцію "розумного складу", в якій автоматичні рішення не тільки підтримуватимуть оптимальні умови зберігання, але й впливатимуть на виробничий та логістичний план.

Щодо модернізації, система має відповідати за протоколи обміну, сумісні з чинними виробничими нормативами (Modbus, OPC UA, MQTT). Це дозволяє підключити нові пристрої чи послуги (наприклад, хмарний аналіз, машинне

навчання) без зміни існуючої інфраструктури. Ще одна важлива річ - забезпечити мобільний доступ: через захищені канали оператор або менеджери з логістики повинні отримувати звіти та сповіщення на смартфони чи планшети в режимі реального часу.

Тому вимоги надійності та розширення мають важливе значення для створення справді ефективної системи для контролю вологості та логістики. Їх виконання дозволить не тільки уникнути втрати продукції, але й поступово інтегрувати інфраструктуру складу в загальну цифрову екосистему компанії.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Математична модель процесу зміни вологості

Щоб ефективно контролювати вологу на складі, попередньо необхідно проаналізувати поведінку системи без використання регулятора. Цей підхід дозволяє краще зрозуміти внутрішню динаміку контрольованого об'єкта та визначити, який параметр повинен бути врахований при розробці алгоритму регулювання. Важливо імітувати відкриту систему, тобто систему яка не має зворотнього зв'язку, щоб вивчити її реакцію на зовнішні подразники перед введенням ПІ-регулятора.

Це можна зробити за допомогою середовища програмування Python. Ввівши потрібні параметри та спроектувавши систему, у нас є графік вологи на складі без регулятора, проілюстрований на рис. 3.1.

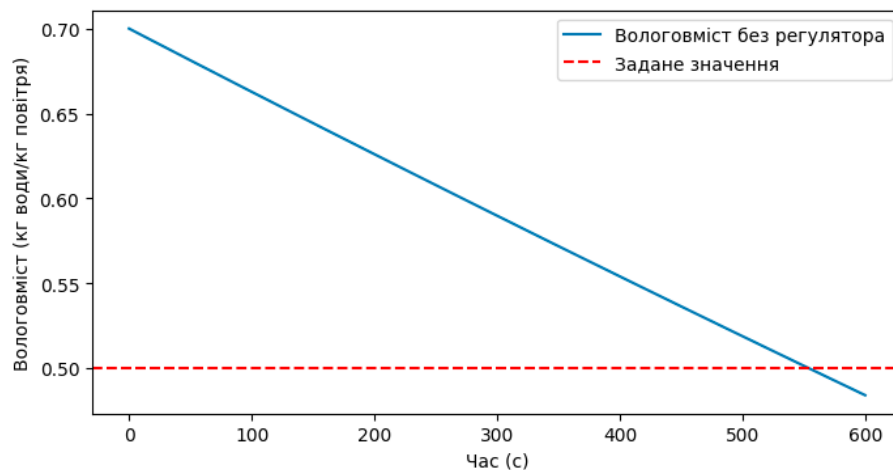


Рисунок 3.1 - Динаміка вологості без регулятора

Аналіз результатів моделювання, що підтверджує, що система поводить себе як аперіодична ланка першого порядку: волога поступово зменшується без коливань, коли осушувач працює безперервно. Така поведінка показує

відсутність інерційних коливань, а реакція системи є послідовною і її можна передбачити. Це спрощує процес коригування, оскільки модель має просту структуру.

Ми можемо спостерігати, чи система досягне заданого значення вологи у сталому режимі. Якщо через тривалий час виникає залишкова похибка, а рівень вологи не досягає бажаного значення, це означає, що необхідно ввести інтегральну складову в регулятор. У той же час, якщо вологість опускається нижче зазначеної межі, це може означати, що потужність осушувача є надмірною і вимагає більш обмеженого або більш гнучкого коригування.

Часова характеристика також є важливим показником системної динаміки. Визначивши час, коли система досягає близько 63% від загальної зміни вологи, ми можемо оцінити сталу часу - один з основних параметрів для формування передавальної функції. Це дозволяє створити математичну модель об'єкта регулювання та обрати параметри ПІ-регулятора.

Аналіз динаміки дозволяє зробити висновки щодо ефективності осушення. Якщо цей процес занадто повільний, пристрій може не справлятися з заданими навантаженнями і потребує збільшення потужностей. Якщо вологість знижується занадто швидко, система може бути чутливою до перенавантажень або збурень, що вимагає більш точного регулювання, щоб уникнути надмірного осушення та перерегулювання.

Підсумовуючи усе можна дійти висновку, що характеристики результатів системи є основою для подальшого проектування регулятора, який зможе забезпечити енергоефективне та стабільне керування мікрокліматом в складському приміщенні.

Щоб кількісно визначити сталу часу T , підсилення K і провести налаштування ПІ-регулятора, автоматично знаходимо експоненційну апроксимацію цього графіка.

Для визначення параметрів системи (сталої часу T і коефіцієнт підсилення K) ми апроксимуємо експоненційним законом:

$$X(t) = X_{\infty} + (X_0 - X_{\infty})e^{-t/T}$$

де: $X(t)$ – поточна вологість; X_0 – початкова вологість; X_{∞} – кінцеве значення вологості при тривалій роботі осушувача; T – стала часу, яку ми хочемо знайти.

На основі наданого графіка можна зробити висновок, що рівень вологості поступово знижується до значення приблизно $X_{\infty} = -0.26$. Це значення вважається усталеним станом системи, тобто асимптотою, до якої наближається графік. Початкове значення вологості становить $X_0 = 0$, оскільки крива починається з цієї позначки.

$$X(t_{63}) = X_{\infty} + (X_0 - X_{\infty}) \cdot 0.37$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$X(t_{63}) = -0.48 + (0.7 - 0.48) \cdot 0.37 = 0.48 + 0.22 \cdot 0.37 = 0.48 + 0.0814 = 0.5614$$

За графіком видно, що рівень вологості досягає значення $X(t_{63}) \approx 0.5614$ приблизно через 1600 секунд. Таким чином, стала часу дорівнює $T = 370$ с.

Коефіцієнт підсилення визначається як відношення зміни вихідного сигналу до зміни вхідного:

$$K = \frac{X_{\infty} - X_0}{U}$$

Оскільки вхідний сигнал (робота осушувача) дорівнює одиниці, тобто $U = 1$, отримаємо:

$$K = \frac{0.48 - 0.70}{1} = -0.22$$

Таким чином, поведінку системи можна описати передавальною функцією аперіодичної ланки першого порядку:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} = \frac{-0.22}{370s + 1}$$

Отримані параметри передавальної функції дають змогу перейти до наступного етапу — проектування ПІ-регулятора для автоматизованої системи підтримки вологості.

Додавши до нашої системи РІ-регулятор проводимо моделювання роботи. На виході отримуємо графік продемонстрований на рис. 3.2.

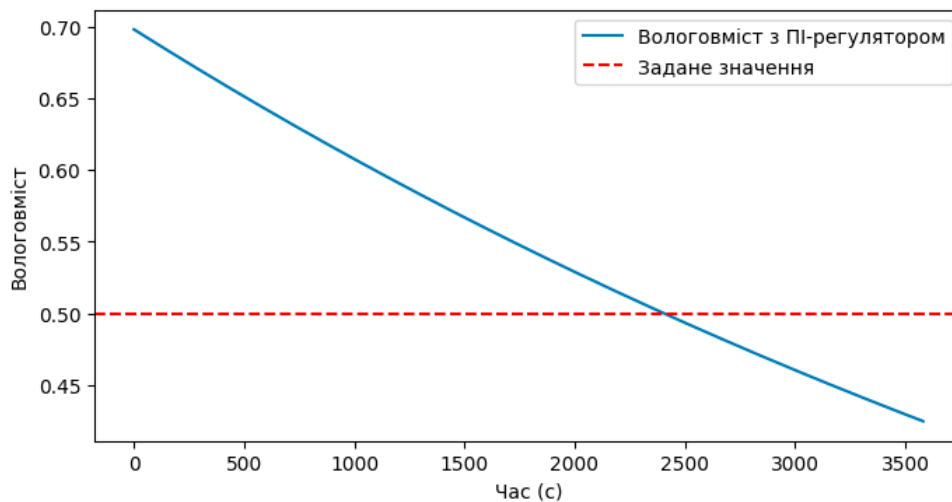


Рисунок 3.2 - Динаміка вологості з ПІ-регулятором

Графік показує динаміку вологи на складі при застосуванні ПІ-регулятора. Початкова вологість становила близько 0,70 кг води на кілограм повітря. Оскільки регулятор увімкнено, вологість починає зменшуватися до заданого значення - 0,50, позначеного червоною пунктирною лінією. Крива має згладжену, аперіодичну форму без коливань або перерегулювання, що на перший погляд свідчить про стабільну роботу системи. Однак при більш ретельному аналізі, очевидно, що такий графік неприйнятний з точки зору роботи ПІ-регулятора. Вологість зменшується постійно, навіть після досягнення

цільового рівня. Це вказує на те, що осушувач постійно працює на повній потужності та безперервно, не зменшуючи впливу при наближенні до вказаного значення. Така поведінка показує, що відсутній або виконаний поганого алгоритм контролю - регулятор не зменшує потужність осушувача і не реалізує адаптивного контролю.

У належним чином відрегульованій системі ми повинні би спостерігати сповільнення темпу осушення біля заданого рівня та стабілізацію вологості в подальшому. Це дозволяє уникнути надмірного осушування, зберегти енергію та забезпечує підтримку конкретних умов. Поточна динаміка вказує на необхідність розгляду параметрів коригування - зокрема, коефіцієнтів співвідношення та інтеграції. Необхідно забезпечити, щоб регулятор зменшив або вимикав сигнал регулювання, коли вологість досягає бажаного рівня. Тільки тоді система відповідатиме вимогам автоматичного управління та енергоефективного регулювання.

Існують деякі підходи для вибору оптимальних параметрів ПІ-регулятора. Одним із класичних методів є метод Ціглера-Ніколса, заснований на емпіричних даних та використовує параметри критичної стійкості системи. Інший варіант - проаналізувати частоту реакції системи на гармонічні збурення за допомогою логарифмічних характеристик. Метод оптимізації також дуже популярний, що стосується вибору автоматичних параметрів шляхом мінімізації помилок управління математичними алгоритмами. У практичних випадках часто використовується метод проб та помилки, коли параметри регулюються вручну відповідно до екстремальних даних та спостереження.

У нашій ситуації спробуємо спочатку скористатися автоматизованим підбором коефіцієнтів K_p та K_i шляхом оптимізації (рис. 3.3). Це дозволить досягти точного керування без зайвих експериментів.

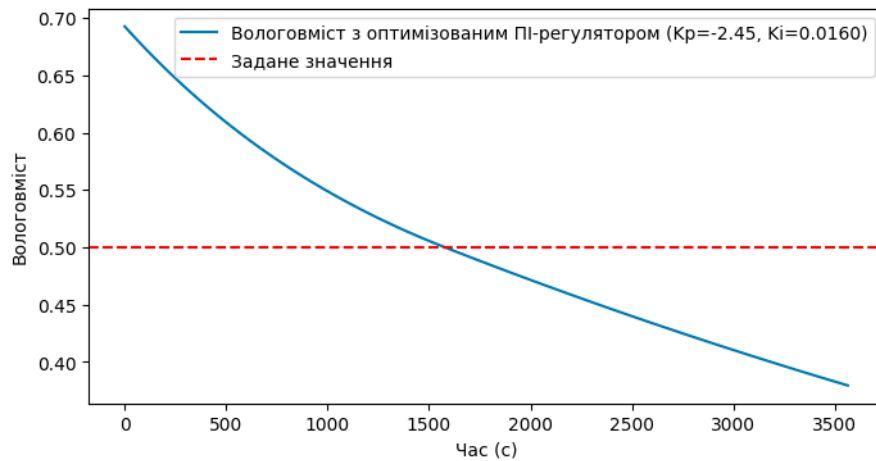


Рисунок 3.3 - Динаміка вологості з автоматичним підбором коефіцієнтів

Завдяки оптимізованим параметрам $K_p = -2.452$ та $K_i = 0.016$, процес осушення відбувається плавно, без різких стрибків або коливань. Однак значення $K_p = -2.4522$ викликає обґрунтоване занепокоєння. Негативне значення коефіцієнта співвідношення в ПІ-регуляторі означає, що регулятор реагує на помилку в протилежному напрямку: замість зменшення впливу осушувача під час наближення до заданого рівня вологи, система навпаки може його підсилити, що призводить до збільшення відхилення від мети.

Як результат, бачимо, що попередній метод оптимізації параметрів ПІ-регулятора є недоцільними для нашої системи, оскільки він створює негативне значення $K_p = -2.452$, що є фізично некоректним: такий регулятор може працювати в протилежному напрямку, збільшуючи відхилення замість зменшення.

Тому, ми тепер застосовуватимемо інший підхід - емпіричний метод кривої розгону (Ziegler–Nichols). Спочатку ми отримаємо криві розгону - графік зміни вологи з часом з постійною активністю осушувача. Потім на цій кривій ідентифікуйте основні параметри:

L — час запізнення, і τ — сталу часу, потім розрахуємо коефіцієнти ПІ-регулятора за класичними формулами Ziegler–Nichols:

$$K_p = \frac{0.9}{K \cdot L}, \quad K_i = \frac{K_p}{L}$$

Методом проб ми досягли бажаного та визначили потрібні нам параметри.

Цей графік на рис. 3.4 ілюструє динаміку зміни вологості в складському приміщенні при використанні ПІ-регулятора з параметрами $K_p=2$, $K_i=0.1$. Початкова вологість у приміщенні становить 0.7 кг води/кг повітря, а завданням системи є зниження її до заданого рівня 0.5 кг/кг.

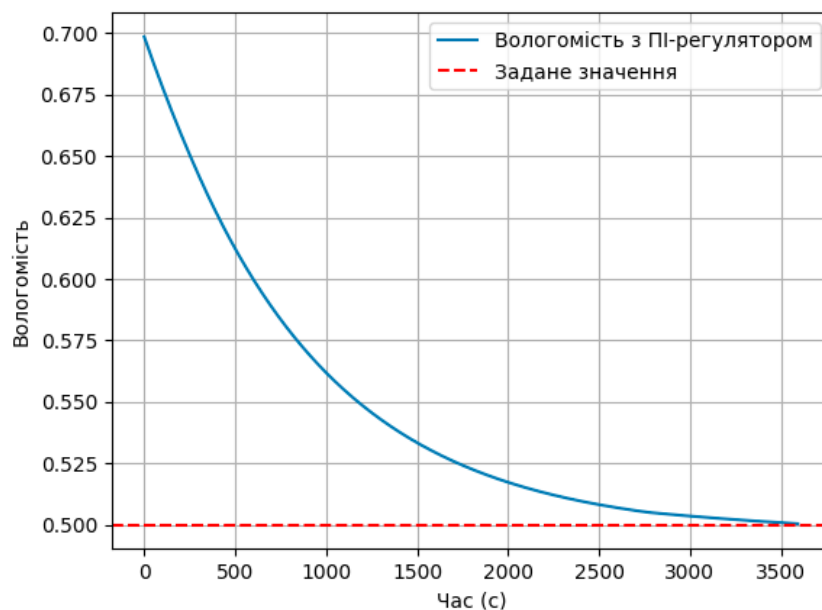


Рисунок 3.4 - Динаміка вологості з підібраними коефіцієнтами регулятора

Наш графік показує, що після запуску осушувача вологість починає зменшуватися поступово. Завдяки ПІ-регулятору, цей процес проходить більш контрольовано: потужність осушення зменшується у міру наближення до цільового значення, що запобігає пересушуванню повітря. Однією з характерних особливостей цієї моделі є механізм пом'якшення осушувальної здатності, коли відхилення від бажаного значення менше ніж 0.005. Саме через це регулятор повільно корегується, зменшуючи інтенсивність осушування при цільовій вологості, що позитивно впливає на стабільність системи.

Отже, вологість знижується до бажаного рівня і залишається в його діапазоні, що підтверджує ефективність налаштувань ПІ-регулятора. Система не показує значного перерегулювання або коливань, і, отже, вибрані регулюючі параметри можуть бути прийнятні для контролю процесу осушення.

3.2 Підбір та розрахунок розміщення сенсорів для приміщення складу

Для підтримки оптимальної вологи в приміщенні для зберігання об'ємом 500 м³ доцільно використовувати промислові осушувачі повітря з достатньою потужністю і продуктивністю для ефективного видалення надлишкової вологи. Надмірна вологість у приміщеннях, де зберігається борошно, може призвести до його псування, утворення цвілі, а також до негативної роботи електронних пристроїв та загальної ситуації з санітарних норм. Тому правильний вибір осушувального обладнання є важливою частиною системи контролю мікроклімату.

Один із запропонованих пристроїв є Neo Tools 90-162. Він має високу продуктивність - до 90 літрів вологи щодня, задовольняючи потреби великих приміщень. Потік повітря цієї моделі становить 500 м³ / год, що дозволяє рівномірно висушити повітря по всьому об'єму складу. Потужність споживання - 1000 Вт, а розрахована площа обслуговування до 310 квадратних метрів. Це дозволяє використовувати пристрій в різних умовах зберігання у промислових приміщеннях без додаткового обладнання.

Іншим варіантом, який відповідає технічним вимогам, є модель 2E-ID1000-90L. Її технічні характеристики аналогічні до попереднього - продуктивність до 90 літрів щодня, потік повітря до 500 м³ / год, споживання 1000 Вт електроенергії. Цей осушувач розрахований на трохи меншу площу приміщень - до 250 квадратних метрів, але в контексті об'єму складського простору він все ще підходить для використання, особливо в поєднанні з вентиляційною системою.

Залежно від навколишнього середовища та температури повітря, існує кілька типів осушувачів, кожен з яких має переваги та обмеження. Найпоширенішим є компресорний осушувач. Вони працюють над принципом охолодження повітря, викликаючи конденсацію пари на холодній поверхні. Ці осушувачі ефективні при температурі вище $+5^{\circ}\text{C}$, що ідеально підходить для більшості складів. Їх продуктивність зазвичай становить від 20 до 50 літрів на день, хоча деякі моделі, як згадувалося, можуть досягти 90 літрів. Вони економні з огляду споживання енергії - в середньому від 300 до 700 Вт.

У випадку, якщо складське приміщення має низьку температуру, наприклад у неопалювальному приміщенні взимку, рекомендується використовувати адсорбентний осушувач. Вони не потребують охолодження повітря і замість цього використовують спеціальні матеріали, які поглинають вологість повітря. Силікагель або подібні речовини є найпоширенішими у використанні. Ці пристрої ефективно працюють при температурі до -20°C , хоча вони мають нижчу потужність - приблизно від 10 до 15 літрів на добу і споживають більше електроенергії - від 600 до 900 Вт.

Окрема ніша зайнята осушувачами на основі елементів Пельтьє. Вони компактні, з низьким рівнем шуму та енергоощадними. Однак їх продуктивність значно нижча і тому вони не підходять для великих приміщень. Їх слід використовувати лише в невеликих комірках, архівах або шафах з чутливими матеріалами або документами.

Беручи до уваги усі ці фактори, для складу з борошном на 500 м^3 найкращим рішенням є використання компресорного осушувача з промисловою продуктивністю - не менше 90 літрів на добу та з потоком повітря, що відповідає або перевищує $500\text{ м}^3 / \text{год}$. Цей вибір буде не тільки ефективно боротися з надмірної вологістю, але й підтримуватиме стабільний мікроклімат всередині, що є важливим для тривалого та безпечного зберігання борошна. Крім того, сучасні моделі часто мають вбудовані гідростати, таймери, можливість дистанційного керування або інтеграції в автоматизовані системи контролю,

допомагаючи полегшити їх використання в глобальних системах автоматизації на промислових складах.

Вирішено обрати компресорний осушувач повітря Trotec TTK 1500. [10] Його зображення (рис. 3.5) та технічні характеристики (табл. 3.1) наведені нижче.



Рисунок 3.5 - Осушувач Trotec TTK 1500

У розробленій автоматизованій системі контролю вологості та відстеження товару було обрано контролер Siemens LOGO як основний засіб керування. Це програмований логічний контролер, який поєднує надійність, простоту програмування та достатню функціональність для управління невеликими автоматизованими об'єктами. Siemens LOGO! має компактні розміри, зручний інтерфейс та підтримує мову програмування функціональних блоків (FBD), що дозволяє швидко реалізувати логіку роботи осушувача, обробку сигналів з датчиків та зв'язок з RFID-системою.

Таблиця 3.1 - Основні характеристики Trotec ТТК 1500

Характеристика	Значення
Тип осушувача	Конденсаційний, мобільний
Продуктивність осушення	До 300 л/добу
Рекомендований об'єм приміщення	До 3400 м ³
Робочий температурний діапазон	0 °C – +40 °C
Робочий діапазон вологості	35% – 100% RH
Витрата повітря	2200 м ³ /год
Холодоагент	R407C
Споживана потужність	2,7 кВт
Максимальний струм	6,75 А
Напруга живлення	400 В / 3 фази / 50 Гц
Рівень шуму	58 дБ(А)
Габарити (В×Ш×Г)	1313 × 660 × 660 мм
Вага	130 кг
Додаткові функції	Насос для відведення конденсату, фільтр грубого очищення, лічильник напрацювання годин
Країна виробник	Німеччина

Контролер LOGO!(рис. 3.6) обрано з урахуванням умов експлуатації у складському приміщенні, де важлива стабільність та можливість роботи в автономному режимі (таб. 3.2). Він підтримує підключення цифрових і аналогових датчиків вологості та температури, дозволяє налаштувати алгоритм ПІ-регулятора та керувати навантаженнями (зокрема осушувачем) за заданими умовами. [11]



Рисунок 3.6 – Логічний контролер Siemens LOGO!

Таблиця 3.2 - Основні характеристики Siemens LOGO!

Характеристика	Значення
Модель	6ED1052-1MD08-0BA1
Кількість цифрових входів	8
Кількість аналогових входів	4
Кількість виходів	4 релейних
Максимальний струм виходу	10 А
Тип виходів	Релейні контакти
Пам'ять	До 400 блоків
Інтерфейс зв'язку	Ethernet (RJ45)
Підтримка SD-карт	Так (Micro SD)
Дисплей	Так, вбудований
Програмне забезпечення	LOGO! Soft Comfort V8.3 або вище
Діапазон робочої температури	від -20 °C до +55 °C
Живлення	12/24 В DC
Монтаж	На DIN-рейку
Сумісність	LOGO! 8.3, підтримка MQTT, Web-сервер, хмарні сервіси

Завдяки модулям розширення LOGO! також може інтегруватися з RFID-зчитувачами через цифрові входи або за допомогою додаткових комунікаційних інтерфейсів. Такий вибір контролера забезпечує простоту реалізації, гнучкість і надійність всієї автоматизованої системи.

Щоб визначити оптимальну кількість датчиків вологості для 500 м³, можемо використати кілька методів, скориставшись емпіричними формулами та практичними рекомендаціями.

Перший підхід заснований на розрахунку відповідно до об'єму приміщення. Існує загальне правило: один датчик вологості рекомендується для 100-200 м³, щоб забезпечити рівномірне покриття. Якщо взяти середнє значення, тобто 150 м³ для кожного датчика, то кількість необхідних датчиків може бути обчислена за формулою:

$$N = \frac{V}{V_{\text{на 1 датчик}}}$$

де $V=500 \text{ м}^3$ — загальний об'єм приміщення,

$V_{\text{на 1 датчик}}=150 \text{ м}^3$ — орієнтовний об'єм, що контролюється одним датчиком.

Підставивши значення, отримаємо:

$$N = \frac{500}{150} \approx 3.33$$

Це означає, що доцільно встановити 3 або 4 датчики для надійного контролю вологості на всій площі.

Другий підхід базується на розрахунку за площею приміщення. Якщо відомо, що висота приміщення становить 4 метри, тоді площу можна обчислити за формулою:

$$S = \frac{V}{h} = \frac{500}{4} = 125 \text{ м}^2$$

За загальними рекомендаціями, слід встановлювати один датчик на кожні 40–50 м². Взявши середнє значення - 45 м², кількість необхідних датчиків обчислюється так:

$$N = \frac{S}{S_{\text{на 1 датчик}}} = \frac{125}{45} \approx 2.78$$

Тому, за цим методом також потрібно зосередитись на 3 датчиках.

Третій підхід передбачає логічний розподіл датчиків відповідно до зон з окремим контролем. Щоб уникнути нерівномірного розподілу вологи та включити врахування можливих локальних змін у мікрокліматі, необхідно застрахувати такі ділянки: біля вхідних дверей, центр приміщення та його віддалена частина. Крім того, до важливого місця, наприклад біля осушувача, що вимагає підвищення точності вимірювання, часто додається додатковий датчик. У цьому випадку загальна кількість виглядає так:

$$N_{\text{зон}} = 3 + 1 = 4$$

Тому, враховуючи обчислення за площею, об'ємом та зональним принципом, можна зробити висновок, що для приміщення, площа якого становить 500 м², оптимально встановити від 3 до 4 датчика вологості. Це забезпечить точне та стабільне управління вологістю повітрям у всіх основних частинах складу.

Найкращі варіанти - це моделі з аналоговим або цифровим виходом, що забезпечують стабільні та точні вимірювання. Наприклад, PVT100 підтримує сигнали від 4 до 20 мА або від 0 до 10 В і підходить для промислових умов. SHT31 - Цифровий датчик з високою точністю та швидким зворотним зв'язком,

що працює через інтерфейс I2C. DHT22 - це бюджетний варіант для місцевого моніторингу, хоча він вимагає періодичної калібрування.

Кількість датчиків температури для приміщення об'ємом 500 м³ можна визначити аналогічно датчикам вологості. Температура в просторі, як правило, більш рівномірно розподілена, тому можна використовувати для розрахунку більшу площу покриття на кожен датчик - приблизно 100 квадратних метрів. За висоти встановлення датчиків 2,5 м розрахунок виглядає так:

$$N = \frac{V}{S \cdot H} = \frac{500}{100 \cdot 2.5} = 2$$

Тому, достатньо встановити 2–3 датчики, щоб контролювати всю температуру навколишнього середовища в приміщенні. Це дозволить точно відстежувати температурні зміни в різних зонах складу.

Для запуску системи можна використати кілька перевірених моделей датчиків температури. Один з найпростіших варіантів -DS18B20, діапазон вимірювання якого коливається від -55 до +125 ° С, точність приблизно ± 0,5°С та цифровий вихід 1-Wire. Він зручний тим, що дозволяє підключати кілька сенсорів до однієї шини, що спрощує монтаж.

Інші варіанти - PT100 або PT1000, платинові терморезистори, з надзвичайно широкими температурними діапазонами (від -200 до +600 ° С) та високою точністю (± 0,1 ... ± 0,5 ° С - залежно від класу точності). Для з'єднання з системою автоматизації необхідно мати перетворювач сигналу, який забезпечить вихід від 4 до 20 мА або 0 - 10 В. Ці датчики добре підходять для промислових умов.

SHT31 також можна використовувати - комбінований датчик вологи та температур з інтерфейсом I2C. Він має діапазон температури від -40 до +125 ° С та точність ± 0,3 ° С. Цей варіант зручно інтегрувати в систему, де необхідно вимірювати два параметри в одному місці.

Найкращим варіантом для нашої автоматичної системи контролю вологості в приміщенні 500 м³ буде PVT100 - датчик вологості та температури (рис. 3.7). Він спеціально розроблений для використання в великих приміщеннях із підвищеними вимогами щодо надійності та точності вимірювань.



Рисунок 3.7 – Промисловий датчик ПВТ100

Цей датчик забезпечує безперервне перетворення показників вологості та температури у стандартизовані сигнали, що дозволяє легко інтегрувати його в системи автоматизації на базі ПЛК або контролерів типу Arduino/Siemens. Його технічні характеристики можна переглянути в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 - Основні характеристики ПВТ100

Параметр	Значення
Тип вихідного сигналу	4–20 мА або 0–10 В (2 незалежні канали)
Діапазон вимірювання температури	–35...+80 °С
Діапазон вимірювання вологості	0...100% RH
Похибка вимірювання вологості	±3,0%
Робоче середовище	Неагресивне, промислове
Призначення	Контроль вологості та температури в приміщеннях
Тип встановлення	Стаціонарне
Захист корпусу	Пилозахисний
Сумісність	Система автоматизації, ПЛК, контролери

Завдяки аналоговим виходам PVT100 легко підключити до систем автоматизації, щоб сформувати закритий цикл управління. Він чудово підходить для моніторингу в складських умовах, де важлива надійна робота протягом тривалого часу.

3.3 Вибір RFID-системи та її інтеграція

Для ефективної роботи IoT-системи управління логістикою на лінії з виробництва макаронних виробів було обрано RFID-мітку Impinj M730 Monza (таб. 3.4) та стаціонарний зчитувач Impinj Speedway R420 (таб. 3.5). Вибір цих компонентів зумовлений їх технічними характеристиками, надійністю в промислових умовах та повною сумісністю з сучасними IoT-структурами.

Таблиця 3.4 - Технічні характеристики RFID-мітки Impinj M730 Monza:

Тип:	Пасивна UHF RFID-мітка
Частотний діапазон:	860–960 МГц
Стандарт:	EPC Class 1 Gen 2 / ISO 18000-6C
Об'єм пам'яті:	128 біт (EPC), 96 біт (User Memory)
Робоча температура:	від -40°C до +85°C
Дальність зчитування:	до 10 метрів (залежно від антени та середовища)
Розміри інлею:	прибл. 70 x 14 мм (залежно від виробника інлею)
Особливості:	висока чутливість (до -22.5 dBm), захист від колізій

RFID-мітка Impinj M730 Monza працює в ультрависокочастотному діапазоні (UHF, 860–960 МГц) і відповідає стандарту EPC Class 1 Gen 2. Вона відзначається високою чутливістю, швидким зчитуванням та здатністю стабільно функціонувати навіть у складних умовах з великою кількістю об'єктів. [12, 13] Завдяки своїм компактним розмірам та гнучкості матеріалу мітка може

легко інтегруватися в упаковку макаронних виробів без зміни технології пакування.

Таблиця 3.5 - Технічні характеристики RFID-зчитувача Impinj Speedway R420:

Тип:	Стаціонарний UHF RFID-зчитувач
Частотний діапазон:	860–960 МГц
Кількість антенних портів:	4 (тип TNC)
Інтерфейси зв'язку:	Ethernet (10/100), GPIO, USB (опційно)
Підтримка стандартів:	EPC Gen 2 / ISO 18000-6C
Максимальна потужність передавання:	до 30 дБм
Робоча температура:	від -20°C до +50°C
Живлення:	24 В постійного струму або PoE
Особливості:	багатозонне зчитування, Edge-процесинг, підтримка Impinj Octane SDK

Завдяки поєднанню RFID-мітки Impinj M730 Monza та зчитувача Impinj Speedway R420 забезпечується точне й безперервне відстеження логістичних потоків у системі автоматизованого управління виробництвом макаронних виробів. Для повного контролю RFID-зчитувачі розміщуються в ключових точках складу: зонах приймання, зберігання та відвантаження.

На вході до зони приймання зчитувач автоматично реєструє продукцію, що надходить з пакувального відділення чи від постачальників, передаючи інформацію до бази даних без участі оператора. На виході із зони відвантаження фіксується передача продукції замовнику або до транспорту, що забезпечує повну простежуваність від надходження до відправлення.

RFID-мітки зчитуються автоматично при проходженні контрольних точок, що зменшує вплив людського фактору, прискорює обробку товару та мінімізує втрати. У зоні зберігання зчитування відбувається за потреби — здебільшого портативними пристроями для інвентаризації.

Схематичне розміщення зчитувачів на складі наведено на рис. 3.8. Така організація дозволяє централізовано відстежувати переміщення продукції та оперативно реагувати на логістичні події.

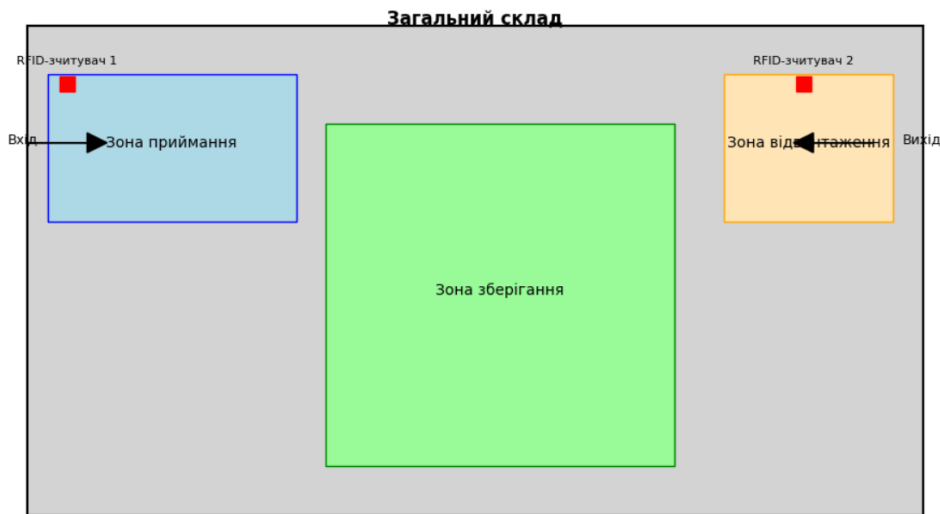


Рисунок 3.8 - Схема розміщення RFID-обладнання на складі

Схема на рисунку 3.9. наочно демонструє послідовність проходження макаронних виробів від пакувального цеху через контрольні точки до моменту відвантаження.



Рисунок 3.9 - Схема логістичного маршруту продукції з використанням RFID

На рисунку 3.10. зображена схема, яка ілюструє, як RFID-мітки взаємодіють зі зчитувачами, передаючи дані через IoT-шлюз до локального сервера або у хмару, з подальшим відображенням у SCADA або веб-інтерфейсі.

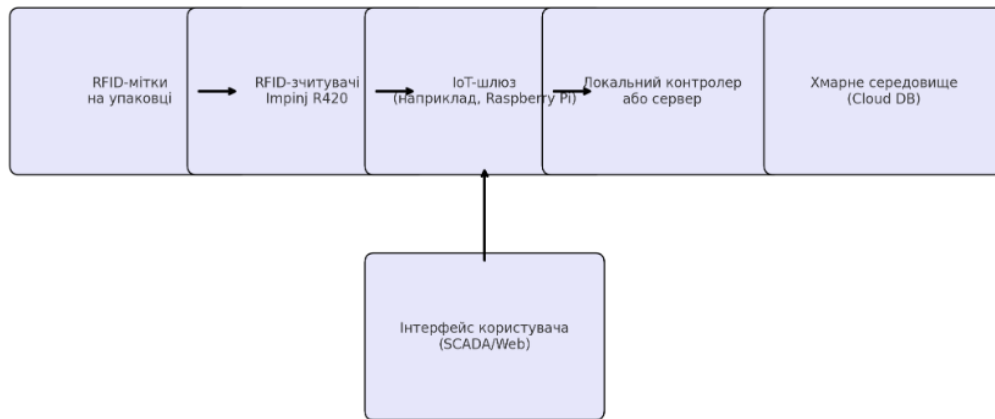


Рисунок 3.10 - Схема мережевого з'єднання IoT-компонентів системи логістики

Також дана обрана система дає змогу розробити додаток з зрозумілим інтуїтивно інтерфейсом, що дозволяє відстежувати операції та ефективність роботи в режимі реального часу (рис.3.11.). Це дає змогу не лише вчасно виявляти дефекти, усувати їх та вдосконалювати систему, а й дозволяє вносити корекційні зміни, які будуть оновлені і застосовані одразу після оновлення додатку.

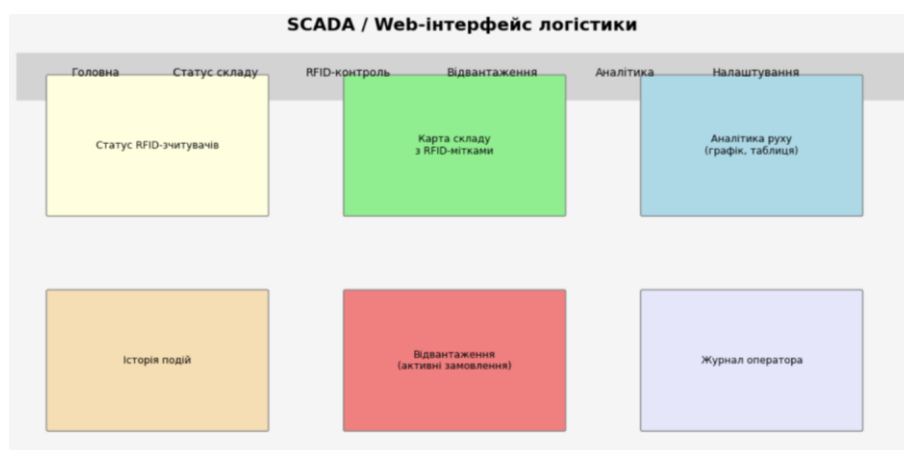


Рисунок 3.11 - Схема інтерфейсу користувача SCADA/Web-додатку

Інтеграція RFID-технології у систему автоматизації логістики на лінії виробництва макаронів забезпечує цифрове відстеження продукції на всіх етапах — від пакування до зберігання та відвантаження. У межах IoT-системи RFID-мітки закріплюються на упаковках або палетах, а зчитування даних відбувається на ключових ділянках — на виході з лінії, у зоні складування та біля відвантажувальних воріт.

Зібрана інформація передається через IoT-шлюзи до SCADA/Web-систем або локального сервера, що забезпечує контроль у реальному часі. Усі логістичні операції автоматично фіксуються, що мінімізує помилки, пов'язані з людським фактором.

RFID інтегрується з контролерами, датчиками, ваговими модулями та засобами візуалізації, що дозволяє не лише відстежувати продукцію, а й контролювати її кількість та умови зберігання. Система легко взаємодіє з ERP або MES-рішеннями, що критично важливо для цифровізації.

Таким чином, RFID є ключовим елементом гнучкої та прозорої логістичної системи, що відповідає вимогам Індустрії 4.0. На рисунку 3.12 показано покращення ефективності після впровадження цієї системи.

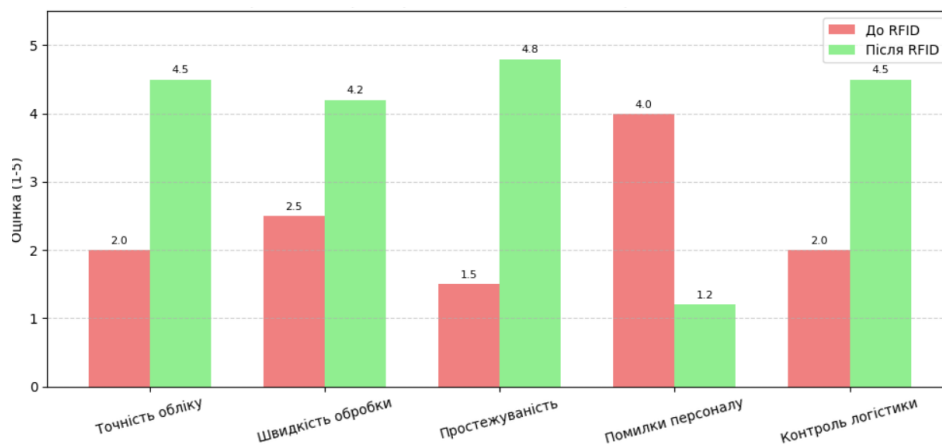


Рисунок 3.12 - Схема граф потоку RFID-інтеграції

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Раціональна організація охорони праці та захисту довкілля є важливою складовою ефективного функціонування підприємств харчової промисловості. У макаронному виробництві, де основною сировиною є борошно, актуальними є питання санітарії, безпеки праці та мінімізації впливу на довкілля.

Основні виробничі ризики пов'язані з підвищеною запиленістю, шумом, коливаннями температури, обмеженою вентиляцією та можливими травмами під час роботи з обладнанням. Особливо небезпечними є операції з перевантаження мішків із борошном, які створюють надмірне фізичне навантаження на працівників.

Для забезпечення безпеки застосовуються засоби колективного захисту: вентиляційні системи, фільтрація повітря, огороження рухомих частин, а також індивідуальні засоби захисту (респіратори, спецодяг, навушники). Робочі місця мають бути ергономічно організовані, а працівники забезпечені необхідною технікою для зменшення фізичного навантаження.

Важливим є дотримання законодавчих норм, зокрема Закону України «Про охорону праці» та санітарних вимог до мікроклімату. На підприємстві має бути впроваджена система навчання персоналу — проведення вступних інструктажів та періодичних перевірок знань. Це мінімізує ризики, пов'язані з неправильним поводженням з обладнанням, у тому числі з автоматизованими системами керування вологістю та температурою.

Не менш важливою є екологічна складова виробництва. Запиленість при роботі з борошном може становити загрозу для атмосфери, якщо вентиляція не оснащена фільтраційними модулями. Необхідне впровадження систем пиловловлювання та правильне поводження з відходами. Сорткування, утилізація та повторна переробка пакувальних матеріалів і сировинних залишків знижують екологічні ризики.

У рамках сталого розвитку підприємство має прагнути енергоощадності. Це передбачає використання енергоефективного обладнання, автоматизованого контролю мікроклімату та оптимізацію логістики, що зменшує потребу в роботі осушувачів і скорочує споживання енергії.

Окрему увагу слід приділити пожежній безпеці. Пилоповітряні суміші з борошном можуть бути вибухонебезпечними, тому важливо забезпечити регулярне прибирання, виключити відкритий вогонь і обладнати приміщення системами пожежогасіння, оповіщення й евакуації.

Контроль за використанням води також є важливим — застосування систем рециркуляції та очищення стічних вод знижує навантаження на довкілля та витрати підприємства.

Сучасні автоматизовані системи допомагають покращити не лише умови зберігання сировини, а й рівень безпеки праці. Контроль вологості й температури дозволяє попереджати псування продукції, знижувати ризики виникнення плісняви та підтримувати санітарні норми.

Таким чином, охорона праці та довкілля в макаронному виробництві є системним процесом. Вона поєднує технічні, організаційні та навчальні заходи, спрямовані на безпечну діяльність персоналу, відповідальне використання ресурсів і зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Розрахунок економічної ефективності впровадження IoT-системи управління логістикою у виробництві макаронів показує її доцільність. Система охоплює автоматизований контроль мікроклімату складу, облік сировини та продукції за RFID-технологією, а також передачу даних у хмару для аналізу.

Основна економія досягається за рахунок зниження втрат сировини, зокрема через контроль вологості повітря, що запобігає псуванню борошна. Це продовжує термін зберігання продукції та зменшує обсяг списань.

RFID-мітки Impinj M730 Monza та зчитувачі Impinj Speedway R420 дозволяють автоматизувати облік, зменшити витрати на персонал і уникнути помилок. Це пришвидшує логістичні процеси та підвищує їхню прозорість.

Централізоване збирання даних з різних ділянок виробництва дає змогу оперативно реагувати на зміни й оптимізувати використання ресурсів.

Очікувані результати впровадження:

- зниження втрат сировини на 10–15% щороку;
- зменшення витрат на облік і зберігання до 20%;
- скорочення енерговитрат завдяки оптимальному керуванню осушувачем;
- зростання продуктивності логістичних процесів.

Спробуємо виконати приблизний розрахунок економічної ефективності впровадження IoT-системи управління логістикою на підприємстві з виробництва макаронних виробів. Розглянемо приклад підприємства, яке планує автоматизувати контроль вологості у складському приміщенні, а також процеси обліку та переміщення сировини і продукції за допомогою RFID-технологій:

- вартість осушувача Trotec TTK 1500 - 610 000 грн;
- вартість логічного контролера Siemens LOGO! - 8 000 грн;
- вартість промислового датчика вологості ПВТ100 - 7 000 грн;

- вартість RFID-зчитувача Impinj Speedway R420 - 73 000 грн;
- вартість RFID-міток (1 000 шт. $\times$ 20 грн) - 20 000 грн;
- вартість програмного забезпечення та його впровадження - 120 000 грн;
- витрати на монтаж та налаштування обладнання - 50 000 грн;
- витрати на навчання персоналу - 30 000 грн.

Таким чином, загальні капітальні витрати становлять:

$$610000 + 8000 + 7000 + 73000 + 20000 + 120000 + 50000 + 30000 = 918000 \text{ грн.}$$

Операційні витрати включають витрати на експлуатацію обладнання, електроенергію, технічне обслуговування та персонал. Застосування IoT-рішень дозволяє суттєво зменшити ці витрати. Оцінимо основні операційні показники: заробітна плата працівників до автоматизації (2 працівники $\times$ 20 000 грн) - 40 000 грн/міс; заробітна плата після автоматизації (1 працівник $\times$ 20 000 грн) - 20 000 грн/міс; витрати на енергоспоживання до автоматизації - 10 000 грн/міс; витрати на енергоспоживання після автоматизації (з урахуванням роботи осушувача) - 7 000 грн/міс; витрати на технічне обслуговування системи - 5 000 грн/міс.

Загальні операційні витрати до автоматизації становили:

$$40\,000 + 10\,000 = 50\,000 \text{ грн/міс}$$

Після автоматизації:

$$20\,000 + 7\,000 + 5\,000 = 32\,000 \text{ грн/міс}$$

Економія на операційних витратах становить:

$$50\,000 - 32\,000 = 18\,000 \text{ грн/міс}$$

Щомісячна економія за рахунок автоматизації складає: економія на заробітній платі: 20 000 грн/міс; економія на енергоспоживанні: 3 000 грн/міс; економія на обліку та переміщенні продукції (завдяки RFID): 10 000 грн/міс.

Загальна щомісячна економія становить:

$$20\,000 + 3\,000 + 10\,000 = 33\,000 \text{ грн/міс}$$

Щоб визначити термін окупності інвестицій, необхідно поділити загальні капітальні витрати на щомісячну економію:

$$\text{Термін окупності} = 918\,000 \text{ грн} / 33\,000 \text{ грн/міс} \approx 27,8 \text{ місяців}$$

Таким чином, термін окупності інвестицій у впровадження IoT-системи становить приблизно 2 роки і 4 місяці.

Крім безпосередньої економії на витратах, автоматизація логістики та контролю вологості дає і додаткові економічні вигоди: зменшення втрат продукції через неправильне зберігання (вологість) - очікувана економія: 15 000 грн/міс; зменшення помилок при інвентаризації - 10 000 грн/міс; зменшення витрат на повторну перевірку та ручний облік - 5 000 грн/міс.

Загальна додаткова економія становить:

$$15\,000 + 10\,000 + 5\,000 = 30\,000 \text{ грн/міс}$$

З урахуванням додаткової економії, повна щомісячна економія становить:

$$33\,000 + 30\,000 = 63\,000 \text{ грн/міс}$$

$$\text{Оновлений термін окупності} = 918\,000 \text{ грн} / 63\,000 \text{ грн/міс} \approx 14,6 \text{ місяців}$$

Отже, з урахуванням додаткових вигод, термін окупності інвестицій у впровадження IoT-системи управління логістикою лінії з виробництва макаронних виробів становить приблизно 1 рік і 3 місяці.

Таким чином, впровадження IoT-системи є економічно доцільною інвестицією. Вона дозволяє знизити експлуатаційні витрати, покращити ефективність логістичних операцій, зменшити втрати продукції через неналежні умови зберігання та підвищити загальну продуктивність підприємства.

ВИСНОВКИ

У межах кваліфікаційної роботи було розроблено IoT-систему для управління логістикою на підприємстві з виробництва макаронних виробів. Мета — створення рішення для автоматизації процесів зберігання, переміщення, обліку сировини та готової продукції, а також контролю мікроклімату у складських приміщеннях.

Проведено аналіз логістичних процесів у харчовій промисловості та виявлено основні проблеми зберігання й транспортування. Обґрунтовано доцільність впровадження IoT-технологій, зокрема RFID-систем та сенсорного моніторингу, як ефективних засобів автоматизації.

Розроблено підсистему моніторингу температури й вологості на основі сенсорів ПБТ100 та контролера Siemens LOGO! з реалізованим ПІ-регулятором для керування осушувачем повітря Trotec ТТК 1500. Спроектовано RFID-систему відстеження руху продукції на базі міток Impinj M730 Monza та зчитувача Impinj Speedway R420. Створено структурну та функціональну схеми інтеграції компонентів у загальну логістичну систему.

Підібрано відповідні технічні засоби та проведено розрахунок параметрів регулятора для оптимальної роботи системи. Розглянуто питання безпеки: визначено потенційні ризики, запропоновано заходи з охорони праці та захисту довкілля.

У техніко-економічному розділі доведено ефективність впровадження системи: зменшення втрат продукції, скорочення витрат на персонал, покращення умов зберігання.

Результати свідчать про доцільність використання IoT-технологій у сучасному харчовому виробництві, що дозволяє підвищити рівень автоматизації, забезпечити простежуваність продукції та досягти економічної вигоди.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Макаронне виробництво. Технологічний процес / Промислові технології. URL: <https://promtech.com.ua/food/tehnologiya-makaronnogo-virobnitstva/>
2. Wikipedia. Pasta processing. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Pasta_processing.
3. Fava S.p.A. Pasta Production Lines. URL: <https://www.fava.it/solution-lines/pasta-lines/>.
4. Bühler Group. Pasta Production Solutions. URL: <https://www.buhlergroup.com/global/products/process-equipment/equipment-lines#!/pasta-lines>.
5. Pavan Group. Packing Machines. URL: <https://pavan.com/products/packing-machines>.
6. What is the Internet of Things (IoT)? / Oracle. URL: <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/>.
7. The Internet of Things. URL: <https://www.ibm.com/topics/internet-of-things>.
8. Dipole RFID. RFID technology in the food industry. URL: <https://www.dipolerfid.com/rfid-blog/rfid-technology-in-the-food-industry>.
9. Складська логістика, принципи управління та організація роботи. URL: <https://skladovka.ua/skladaska-logistyka-shho-cze/>.
10. Trotec. TTK 1500 – технічна документація: технічні характеристики осушувача. URL: https://uk.trotec.com/fileadmin/downloads/Entfeuchtung/TTK1500/TRT-BA-TTK_1500-TC-001-EN.pdf.
11. Mouser Electronics. LOGO! 8.4 Logic Modules – характеристики контролера. URL: <https://www.mouser.com/new/siemens/siemens-logo-8-4-logic-modules/>.
12. RFID Tag Smartrac Trap Impinj M730 | Dipole. URL: <https://www.dipolerfid.com/product/rfid-tag-smartrac-trap-impinj-monza-m730>.

13. RFID technology and applications / Impinj. URL:
<https://www.impinj.com/products/technology>.