

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Державне некомерційне підприємство

«Державний університет» Київський авіаційний інститут»
Факультет комп'ютерних наук та технологій
Кафедра інженерії програмного забезпечення

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

Олена ГРІНЕНКО

«_____» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»

Тема: Адаптивний алгоритм та застосунок для керування зерносушильним комплексом аграрного підприємства

Виконавець: Мельничук Віталій Петрович

Керівник: Гололобов Дмитро Олександрович

Нормоконтролер: Гололобов Дмитро Олександрович

**Державне некомерційне підприємство
«Державний університет» Київський авіаційний інститут»**

Факультет комп'ютерних наук та технологій

Кафедра інженерії програмного забезпечення

Спеціальність 121 «Інженерія програмного забезпечення»

Освітньо-професійна програма «Інженерія програмного забезпечення»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олена ГРІНЕНКО

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи студента

Мельничук Віталій Петрович

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Адаптивний алгоритм та застосунок для керування зерносушильним комплексом аграрного підприємства» затверджена наказом президента від «17» листопада 2025р. №2450/ст
2. Термін виконання проекту: з 29.09.2025 р. по 21.12.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи:

1. технологічні параметри процесу сушіння зерна в зерносушильних комплексах (температура агента сушіння, температура зернової маси на вході та виході, вологість, швидкість подачі зерна, теплові витрати, характеристики вентиляційних потоків);
2. технічні характеристики та режими роботи обладнання зерносушарки (пальник, вентилятори, транспортери, норії, охолоджувальні секції);
3. діючі методи автоматизації технологічних процесів сушіння зерна та вимоги до систем керування аграрних підприємств;
4. наявні SCADA/HMI-рішення, протоколи обміну даними (MQTT) та вимоги до побудови інтерфейсу оператора;
5. методи математичного моделювання тепломасообміну та адаптивного керування (PID, нечітка логіка, MRAC).

4. Зміст пояснювальної записки:

1. вступ із обґрунтуванням актуальності, мети та завдань дослідження;
2. аналітичний огляд технології сушіння зерна та існуючих систем автоматизованого керування;
3. дослідження математичних моделей теплових та вологісних процесів у зерносушильному комплексі;
4. розроблення адаптивного алгоритму керування, що об'єднує PID-регулювання та нечітку логіку;
5. опис архітектури програмного застосунку, реалізованого в середовищі Node-RED з інтеграцією через MQTT;
6. розроблення HMI-інтерфейсу для оператора, включаючи екрани температур, механізмів, сервісного меню та аварій;
7. результати тестування алгоритмів та застосунку на цифровій моделі зерносушарки;
8. загальні висновки щодо ефективності адаптивного керування.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:

1. структурна схема зерносушильного комплексу;

2. схема взаємодії датчиків, виконавчих механізмів та програмного забезпечення через MQTT;
3. графічна модель сушарки (анімаційна схема для HMI-панелі);
4. інтерфейси програмного застосунку Node-RED (головне меню, панелі температур, стан механізмів, журнал аварій);
5. діаграми роботи адаптивного алгоритму (PID-криві, Fuzzy-правила, температурні залежності);
6. діаграми тестування стабільності керування та реакції системи на зміну параметрів.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Розробка та затвердження графіка роботи	29.09-01.10.2025	виконано
2.	Ознайомлення з постановкою задачі, вивчення інформаційних джерел та складання плану роботи.	02.10-05.10.2025	виконано
2.	Підготовка 1 розділу та подання його керівнику	06.10-19.10.2025	виконано
3.	Підготовка 2 розділу та подання його керівнику	20.10-02.11.2025	виконано
4.	Підготовка 3 розділу та подання його керівнику	03.12-16.11.2025	виконано
5.	Підготовка 4 розділу і висновків по роботі та подання їх керівнику	17.11-30.11.2025	виконано
6.	Загальне редагування пояснювальної записки, графічного матеріалу. Представлення роботи для перевірки на академічну доброчесність.	01.12-07.12.2025	виконано

	Проходження нормоконтролю.		
7.	Отримання відгуку керівника. Підготовка презентації та тексту доповіді.	08.12- 14.12.2025	виконано
8.	Попередній захист (представлення електронної версії пояснювальної записки, презентації, позитивного відгуку керівника).	08.12- 14.12.2025	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційної роботи	15.12- 22.12.2025	виконано
10.	Здача секретарю ЕК пояснювальної записки: електронної версії кваліфікаційної роботи; презентації доповіді; відгуку керівника, рецензії; результату проходження перевірки на плагіат; довідки про успішність, декларації про академічну доброчесність.	15.12- 22.12.2025	виконано
11.	Захист кваліфікаційної роботи перед екзаменаційною комісією	29.12.2025	

Дата видачі завдання 29.09.2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи:

Дмитро Гололобов

Завдання прийняв до виконання:

Віталій Мельничук

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «**Адаптивний алгоритм та застосунок для керування зерносушильним комплексом аграрного підприємства**»: 132 сторінок, 27 рисунків, 18 таблиць, 24 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – процеси керування, автоматизації та оптимізації технології сушіння зерна в зерносушильних комплексах аграрних підприємств.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка адаптивного алгоритму та програмного застосунку для автоматизованого керування зерносушильним комплексом, що забезпечує підвищення ефективності сушіння зерна, зменшення енергоспоживання та поліпшення якості готової продукції шляхом інтелектуального регулювання температури, вологості та режимів роботи обладнання.

Методи дослідження – системний аналіз технологічних процесів, математичне моделювання тепломасообміну, алгоритмічне моделювання (PID, нечітка логіка, MRAC), методи ідентифікації динамічних систем, статистична обробка даних, моделювання у SCADA-середовищах, прототипування програмного забезпечення та тестування алгоритмів на цифровій моделі зерносушарки.

Результати роботи можуть бути використані під час розробки та модернізації автоматизованих систем керування зерносушильними комплексами, у впровадженні SCADA/HMI-рішень для аграрних підприємств, при створенні IoT-платформ моніторингу та оптимізації технологічних процесів, у реальних системах сушіння зерна різних типів. Запропонована система дає змогу підвищити рівномірність сушіння, знизити ризик псування зерна, забезпечити стабільність температурних режимів, оптимізувати витрати газу/палива та зменшити вплив людського фактора.

Розробка та оцінювання програмного забезпечення проводилися у середовищах PLC/HMI-симуляції, середовищах моделювання SCADA, з використанням сучасних інструментів розробки програмних модулів та тестування алгоритмів.

ABSTRACT

Explanatory Note to the Master's Qualification Work, "Adaptive Algorithm and Application for Control of an Agricultural Enterprise's Grain Drying Complex," comprises 132 pages, 27 figures, 18 tables, and utilizes 24 sources.

Object of research – the processes of control, automation, and optimization of grain drying technologies in industrial grain drying complexes.

Purpose of the qualification thesis – to develop an adaptive control algorithm and a software application for automated operation of a grain drying complex, aimed at increasing drying efficiency, reducing energy consumption, and improving the quality of the final grain product through intelligent regulation of temperature, moisture content, and equipment operating modes.

Research methods – system analysis of technological processes, mathematical modeling of heat and mass transfer, algorithmic modeling (PID control, fuzzy logic, MRAC), methods of dynamic system identification, statistical data processing, SCADA-based simulation, prototyping of software modules, and testing the control algorithm on a digital model of a grain dryer.

Research results can be applied in the development and modernization of automated control systems for grain drying complexes, the implementation of SCADA/HMI solutions for agricultural enterprises, the creation of IoT platforms for monitoring and optimization of technological processes, as well as in real drying systems of various types.

The software development and evaluation were carried out using PLC/HMI simulation tools, SCADA modeling environments, and modern development platforms for logic implementation and algorithm testing. The software application can be integrated into existing automation systems of agricultural enterprises.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1	20
1.1 Загальна характеристика процесу сушіння зерна та особливості роботи зерносушильних комплексів	20
1.2 Типи зерносушильних комплексів та їх конструктивні особливості	24
1.2.1 Шахтні зерносушарки	24
1.2.2 Барабанні сушарки	25
1.2.3 Типи зерносушильних комплексів та їх конструктивні особливості , колонкові сушарки	25
1.2.4 Модульні та комбіновані сушарки	26
1.2.5 Сушарки безперервної та періодичної дії.....	27
1.2.6 Вплив конструктивних особливостей на якість зерна та енергоспоживання .	27
1.3 Стандарти, вимоги до вологості зерна та контроль якості	28
1.3.1 Нормативні вимоги до вологості зерна.....	28
1.3.2 Методи вимірювання вологості.....	29
1.3.3 Контроль якості та безпеки зерна.....	29
1.3.4 Сучасні системи моніторингу вологості.....	30
1.3.5 Вплив контролю вологості на ефективність сушіння	31
1.4 Технологічні процеси сушіння зерна та автоматизація контролю	31
1.4.1 Етапи технологічного процесу сушіння зерна.....	31
1.4.2 Вплив технологічних параметрів на якість зерна.....	33
1.4.3 Методи автоматизації контролю	34
1.4.4 Сучасні технології оптимізації режимів сушіння.....	35
1.4.5 Порівняння ефективності традиційних і адаптивних методів	36
1.4.6 Підсумок	36
1.5 Проблеми та перспективи впровадження адаптивних систем у зерносушильні комплекси	36
1.5.1 Основні проблеми традиційних систем керування	37

1.5.2	Перспективи застосування адаптивних алгоритмів	37
1.5.3	Тенденції розвитку автоматизації зерносушильних комплексів	38
1.5.4	Проблеми впровадження адаптивних систем	39
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ПІДХОДИ В АПК		40
2.1	Класичні методи регулювання (PID, ПД-регулятори, автоматика): переваги й обмеження	40
2.2	Адаптивне та робастне керування: концепції, алгоритмічні підходи, критерії адаптації.....	44
2.2.1	Самоналаштувані системи (Self-tuning control)	45
2.2.2	Модельно-орієнтоване адаптивне керування (Model Reference Adaptive Control — MRAC)	46
2.2.3	Адаптація на основі ідентифікації (Adaptive Model Identification — AMI)	46
2.2.4	Робастне керування	47
2.2.5	Алгоритмічні підходи в адаптивному та робастному керуванні	47
2.2.6	H–керування (H-infinity control)	48
2.2.7	Sliding Mode Control (ковзне керування)	48
2.2.8	MPC — Model Predictive Control	48
2.3	Нечітка логіка та експертні системи у системах керування зерносушильними комплексами.....	48
2.3.1	Основи нечіткої логіки.....	49
2.3.2	Функції належності для параметрів зерносушильного комплексу	49
2.3.3	Нечіткі правила для процесу сушіння.....	51
2.3.4	Фазифікація, нечітке виведення й дефазифікація	52
2.3.5	Приклад нечіткої системи для управління температурою сушіння (модель). 52	
2.3.6	Експертні системи в аграрних технологічних процесах	53
2.3.7	Переваги застосування нечіткої логіки та експертних систем	53
2.3.8	Недоліки та обмеження.....	54
2.4	Машинне навчання та прогнозування (ML) у задачах керування зерносушильними комплексами.....	54
2.4.1	Види задач, що вирішуються за допомогою ML	54
2.4.2	Типи моделей машинного навчання, які застосовуються.....	55

2.4.3 Приклад ML-моделі для зерносушильного комплексу	57
2.5 Огляд існуючих програмно-апаратних рішень для автоматизації зерносушильних комплексів: SCADA, PLC та IoT-платформи	58
2.5.1 Програмовано-логічні контролери (PLC) у системах керування зерносушарками	58
2.5.2 SCADA-системи у зерносушінні та їх функціональність	59
2.5.3 IoT-рішення та хмарні платформи для аграрного моніторингу	60
2.5.4 Типова архітектура програмно-апаратної системи зерносушарки.....	61
2.5.5 Порівняльний аналіз програмно-апаратних рішень	61
РОЗДІЛ 3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА КРИТЕРІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО СУШІННЯ ЗЕРНА	64
3.1 Формулювання задачі оптимального сушіння зерна в безперервному сушильному комплексі	64
3.2 Математична модель процесу сушіння зерна у безперервній сушарці NEZ	69
3.2.1 Основні змінні моделі	69
3.2.2 Тепловий баланс сушильної камери	70
3.2.3 Модель масообміну та зменшення вологості зерна	70
3.2.4 Тепловий баланс зерна.....	71
3.2.5 Вплив швидкості руху зерна (V)	71
3.2.6 Модель подачі палива	71
3.2.7 Інтегральна модель (система рівнянь)	72
3.2.8 Параметри моделі, що підлягають ідентифікації	72
3.3 Архітектура адаптивного алгоритму керування (гібридний PID + Fuzzy) для зерносушарки NEZ.....	73
3.4 Опис адаптивного алгоритму керування зерносушильним комплексом	77
3.4.1 Загальна концепція алгоритму	77
3.4.2 Основні вимірювані змінні та виконавчі механізми	77
3.4.3 Структура гібридного алгоритму PID + Fuzzy	78
3.4.4 Нечіткі множини у системі	80
3.4.5 Приклад нечітких правил (частина rule-base).....	82
3.4.6 Особливості роботи алгоритму в режимі твердопаливного пальника	82

3.4.7 Переваги розробленого алгоритму	83
3.5 Методи навчання, параметризації та валідації адаптивного алгоритму керування	83
3.5.1 Первинне навчання (базове калібрування моделі)	84
3.5.2 Методи поточної адаптації під час роботи	85
3.5.3 Валідація та тестування алгоритму	88
3.5.4 Метрики ефективності алгоритму	89
3.5.5 Критерії завершення навчання	91
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ	
КЕРУВАННЯ	92
4.1 Архітектура програмного забезпечення системи керування сушаркою	92
4.1.1 Рівень керування (Control Layer)	92
4.1.2 Рівень управління процесом (Process Optimization Layer)	93
4.1.3 Рівень візуалізації та інтерфейсу (HMI/SCADA Layer)	93
4.1.4 Рівень комунікацій (Communication Layer)	94
4.2 Опис програмної реалізації інтерфейсу оператора (HMI)	94
4.2.1 Екран “Статус механізмів і аварій”	94
4.2.2 Відображення станів механізмів	94
4.2.3 Список аварій і помилок	95
4.2.4 Екран “Параметри управління”	95
4.2.5 Налаштування швидкісних режимів	95
4.2.6 Керування допоміжними механізмами	96
4.2.7 Екран “Головний технологічний огляд”	96
4.2.8 Температурні показники	96
4.2.9 Статус завантаження/розвантаження	96
4.2.10 Лічильники та технічні параметри	97
4.2.11 Системні кнопки та навігація	97
4.3 Алгоритмічне забезпечення роботи НМІ та логіки керування	98
4.3.1 Діагностика стану виконавчих механізмів	99
4.3.2 Алгоритми управління процесом сушіння	101
4.3.3 Алгоритм запуску сушіння (Start)	101

4.3.4	Алгоритм підтримання температури.....	101
4.3.5	Алгоритм керування завантаженням зерна	102
4.3.6	Алгоритм розвантаження сушеного зерна.....	102
4.3.7	Оновлення індикаторів стану	102
4.3.8	Передача команд оператора.....	102
4.3.9	Алгоритм роботи кнопки "Загальний Стоп".....	103
4.3.10	Робота графічної моделі сушарки	103
4.3.11	Алгоритми безпеки	103
4.4.	Алгоритми безпеки та аварійного захисту зерносушильного комплексу.....	103
4.4.1	Загальні принципи роботи системи безпеки.....	106
4.4.2	Основні групи аварій	107
4.4.3	Алгоритм аварійного відключення (Emergency Stop)	109
4.4.4	Алгоритм безпечної зупинки (Soft Stop).....	110
4.4.5	Інтелектуальна система попередження аварій	110
4.4.6	Логування аварій та телеметрія	111
4.4.7	Взаємодія оператора з системою під час аварії.....	112
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АДАПТИВНОГО		
КЕРУВАННЯ ЗЕРНОСУШАРНИМ КОМПЛЕКСОМ.....		113
5.2	Структура та архітектура програмного забезпечення.....	114
5.2.1	Рівень апаратної взаємодії (датчики та механізми).....	114
5.2.2	Рівень обробки даних.....	115
5.2.3	Рівень логіки керування.....	116
5.3	Реалізація інтерфейсу оператора (HMI).....	118
5.3.1	Головна панель (Main Screen).....	118
5.3.2	Екран температур (Temperature Panel)	119
5.3.3	Екран механізмів (Mechanisms Status)	120
5.3.4	Сервісне меню (Service Mode).....	121
5.3.5	Екран аварій (Emergency & Error Log).....	121
5.4	Реалізація логіки керування.....	122
5.4.1	Логіка кнопки СТАРТ:.....	122

5.4.2 Логіка кнопки СТОП:.....	122
5.4.3 Керування пальником	122
5.4.4 Безпека по температурі	123
5.4.5 Підтримка швидкості норій	123
5.5 Інтеграція адаптивного алгоритму	124
5.5.1 PID-регулятор	124
5.5.2 Адаптивна нечітка логіка (Fuzzy Tuning)	124
5.6 Тестування та результати роботи програми	125
5.6.1 Тестування з реальними датчиками MQTT	125
5.6.2 Перевірка стабільності керування	125
5.6.3 Перевірка аварійних станів.....	126
ВИСНОВОК	130
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	131

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АПК – агропромисловий комплекс

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом

ЗСК – зерносушильний комплекс

ЗС – зерносушарка

НМІ – інтерфейс людина–машина (Human-Machine Interface)

SCADA – система диспетчерського контролю та збору даних (Supervisory Control And Data Acquisition)

PLC – програмований логічний контролер (Programmable Logic Controller)

PID-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

ML – машинне навчання (Machine Learning)

Fuzzy Logic – нечітка логіка

IoT – Інтернет речей (Internet of Things)

ΔT – різниця температур

$T_{вх}$ – температура вхідного повітря

$T_{вих}$ – температура вихідного повітря

$T_{зерна}$ – температура зернової маси

W – вологість зерна

$W_{вх}$ – вологість зерна на вході

$W_{вих}$ – вологість зерна на виході

τ – час процесу сушіння

Q – витрата теплоносія

η – коефіцієнт корисної дії

P – теплова потужність пальника

RPM – швидкість обертання механізмів (об/хв)

E-stop – аварійна зупинка системи (Emergency Stop)

Soft Stop – м'яка зупинка технологічного процесу

ВСТУП

Аграрний сектор України є однією з ключових складових національної економіки, відіграючи суттєву роль у формуванні внутрішнього валового продукту, наповненні бюджету та забезпеченні продовольчої безпеки країни. Висока питома частка експорту зернових та олійних культур робить агропромисловий комплекс стратегічно важливим напрямом розвитку держави. У сучасних умовах глобальної конкуренції, зміни клімату та зростання вимог до якості продукції особливого значення набуває ефективна організація післязбиральної обробки зернових культур, серед яких однією з найвідповідальніших є операція сушіння зерна.

Свіжозібране зерно характеризується підвищеною та нерівномірною вологістю, що створює ризики швидкого псування, самозігрівання, розвитку мікрофлори, втрати маси та погіршення товарних властивостей. Для забезпечення можливості тривалого зберігання зерна, підготовки до транспортування та переробки необхідне його доведення до кондиційної вологості, яка гарантує якість і безпеку продукції. Процес сушіння є енергомістким та технологічно складним, оскільки потребує одночасного контролю великої кількості параметрів: температури зерна і теплоносія, вологості, витрати тепла, швидкості подачі та переміщення зернової маси, рівня заповнення бункерів тощо.

Сучасні зерносушильні комплекси, що використовуються на аграрних підприємствах України, суттєво різняться за конструктивними особливостями, принципами дії, рівнем автоматизації та енергоефективністю. На практиці значна частина обладнання залишається застарілою, працює на базі простих регуляторів або частково автоматизованих систем, які часто не забезпечують достатньої точності керування. Традиційні системи управління, засновані переважно на класичних PID-регуляторах, ефективні лише в стабільних умовах, але втрачають точність при динамічних змінах технологічного процесу, збуреннях або коливаннях параметрів зернової маси. Через це оператори змушені регулярно втручатися у

роботу системи, коригувати температурні режими, темпи подачі та інші параметри. Це створює ризик людських помилок, призводить до нерівномірності сушіння, підвищення енергоспоживання та зниження якості кінцевого продукту.

Проблема автоматизації та підвищення інтелектуальності систем керування зерносушильними комплексами є надзвичайно актуальною. За останні роки відбувся значний розвиток технологій цифровізації виробничих процесів: систем моніторингу, адаптивних алгоритмів, машинного навчання, нечіткої логіки, прогнозного керування, IoT-платформ, методів аналізу Big Data. Застосування цих технологій дає змогу значно підвищити рівень автоматизації, оптимізувати режими сушіння, знизити енергетичні витрати, підвищити рівномірність обробки зернової маси та мінімізувати вплив людського фактора.

Одним із перспективних напрямів є створення адаптивних систем керування, які здатні автоматично підлаштовуватися під змінні умови технологічного процесу. На відміну від класичних регуляторів, адаптивні системи використовують методи самоналаштування, здатні аналізувати інформацію з різних джерел, реагувати на непередбачувані зміни, прогнозувати поведінку системи та вносити коригування для забезпечення оптимального режиму сушіння. Це дозволяє досягти високої енергоефективності, уникнути перегріву зерна, підвищити продуктивність комплексу та забезпечити стабільну якість кінцевого продукту.

На сучасному етапі розвитку технологій агропідприємства активно впроваджують автоматизовані системи керування, але більшість таких систем не враховує динамічних змін властивостей зернової маси, різких коливань температури теплоносія чи змін кліматичних умов. Брак адаптивності призводить до перевитрат енергії, зниження продуктивності та збільшення часу сушіння. Таким чином, актуальним стає створення комплексного підходу, який включає розроблення адаптивного алгоритму керування та програмного застосунку, що забезпечує його реалізацію у реальному часі.

Актуальність дослідження також зумовлена необхідністю переходу до інтелектуальних виробничих систем (Smart Agriculture), де ключову роль відіграють цифровізація, автоматизація, аналіз великих даних та прогнозні моделі.

Впровадження таких підходів у процеси сушіння зерна створює можливість для підвищення ефективності роботи підприємств, покращення економічних показників, зменшення залежності від кваліфікації персоналу та зниження витрат на обслуговування обладнання.

Об'єкт дослідження – технологічний процес сушіння зерна в умовах роботи зерносушильного комплексу.

Предмет дослідження – адаптивні методи та алгоритми керування процесом сушіння зерна, а також програмне забезпечення для автоматизації роботи зерносушильного комплексу.

Метою дослідження є розроблення адаптивного алгоритму та програмного застосунку для керування зерносушильним комплексом, що забезпечують оптимізацію технологічних режимів сушіння, підвищення ефективності, енергозбереження та стабільність процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести аналіз технологічного процесу сушіння зерна, його особливостей, видів зерносушильних комплексів та факторів, що впливають на ефективність процесу.
2. Дослідити стандарти, вимоги до вологості та методи контролю якості зернової продукції.
3. Вивчити сучасні методи керування технологічними процесами, включаючи класичні, адаптивні, робастні та інтелектуальні підходи.
4. Проаналізувати можливості застосування машинного навчання, нечіткої логіки та прогнозних моделей у системах керування зерносушильними комплексами.
5. Розробити адаптивний алгоритм, який забезпечує автоматичне коригування режимів сушіння відповідно до зміни параметрів зернової маси.
6. Створити програмний застосунок, що реалізує адаптивний алгоритм, виконує моніторинг технологічних параметрів, візуалізацію даних і керування обладнанням.

7. Провести експериментальні дослідження та тестування роботи алгоритму в умовах моделювання або реального обладнання.

У процесі дослідження застосовувалися такі **методи**: аналіз літературних джерел, системний підхід, математичне моделювання, методи теорії автоматичного керування, алгоритми адаптивної фільтрації, машинне навчання, нечітка логіка, методи оптимізації, а також засоби програмування програмних застосунків та систем автоматизації.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні адаптивного алгоритму керування зерносушильним комплексом, який поєднує класичні методи регулювання та інтелектуальні підходи. Запропонований алгоритм здатний автоматично реагувати на зміни параметрів зернової маси, забезпечувати оптимальні режими сушіння та підтримувати стабільність технологічного процесу. Крім того, у роботі реалізовано програмний застосунок, який інтегрує алгоритм і забезпечує візуалізацію даних, управління обладнанням та діагностику можливих аварійних ситуацій.

Практичне значення полягає у можливості реального впровадження розробленої системи на аграрних підприємствах. Використання адаптивного керування дозволить підвищити продуктивність, зменшити споживання енергії, забезпечити рівномірність сушіння та знизити ризик псування зерна. Програмний застосунок може бути адаптований до різних типів сушарок, інтегрований у вже існуючі системи автоматизації та використаний як модуль у складі сучасних SCADA/HMI-рішень.

Структура роботи включає вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. У першому розділі розглянуто технологічні основи сушіння зерна, види зерносушильних комплексів та фактори, що впливають на процес. Другий розділ присвячено аналізу сучасних методів керування технологічними процесами та можливостям їх застосування у сфері сушіння зерна. У третьому розділі наведено розроблений адаптивний алгоритм керування. У четвертому описано програмне забезпечення, його структуру та реалізацію. П'ятий

розділ містить опис програмного застосунку, результати тестування та оцінку ефективності системи.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ЗЕРНОСУШИЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1 Загальна характеристика процесу сушіння зерна та особливості роботи зерносушильних комплексів

Сушіння зерна є одним із ключових технологічних процесів у системі післязбиральної доробки врожаю та відіграє визначальну роль у забезпеченні його якісного довгострокового зберігання. Свіжозібране зерно характеризується підвищеною початковою вологістю, яка може досягати 22–30% залежно від культури, погодних умов та тривалості періоду збирання. Висока вологість створює ризики самозігрівання зернової маси, розвитку мікрофлори, утворення токсинів, погіршення посівних якостей та втрати товарної цінності. Саме тому технологія контрольованого видалення надлишкової вологи є критично важливою для аграрних підприємств.

Процес сушіння зерна полягає у зниженні його вологості до рівня, що забезпечує стабільність фізико-хімічних властивостей під час зберігання. Для продовольчого й фуражного зерна безпечна вологість визначається у межах 13–14%, тоді як насінневий матеріал часто досушується до 12% і нижче. Зниження вологості здійснюється шляхом тепло- та масообмінних процесів між зерниною та сушильним агентом, яким зазвичай є нагріте атмосферне повітря. Під час контакту з нагрітим середовищем із поверхні зернини інтенсивно випаровується волога, після чого волога з внутрішніх шарів через капілярну систему мігрує на поверхню та випаровується в наступних фазах сушіння.

Головною фізичною особливістю процесу є нерівномірність прогрівання різних шарів зерна, що залежить від густини, розміру зернини, структури ендосперму, товщини оболонки та швидкості подачі теплоносія. У сучасних технологіях сушіння велика увага приділяється уникненню «пересушування» поверхневого шару, оскільки це може призвести до появи мікротріщин, зниження схожості насіння та погіршення харчових властивостей. З іншого боку, недостатній нагрів зменшує інтенсивність масообміну, що збільшує тривалість сушіння та енергетичні витрати.

Зерносушильні комплекси є складними інженерними системами, основне завдання яких полягає у забезпеченні контрольованого, рівномірного та енергоефективного процесу сушіння. Вони складаються з таких основних компонентів: механізмів транспортування зерна, сушильної камери, теплогенератора, системи подачі та рециркуляції повітря, автоматизованої системи керування та модулів охолодження.

Кожен елемент виконує певну роль у формуванні оптимального температурного та повітряного режиму всередині сушарки.

За принципом дії зерносушарки поділяють на шахтні, барабанні, колонкові, а також безперервні та періодичні. Найпоширенішими в промислових умовах є шахтні сушарки, які характеризуються високою продуктивністю та можливістю регулювання режимів роботи залежно від типу зерна. Барабанні сушарки використовуються переважно для кормових культур, а також для матеріалів, чутливих до перегріву. Сушарки безперервної дії забезпечують рівномірність процесу, тоді як сушарки періодичної дії дозволяють точніше контролювати температурні параметри.

У сучасних зерносушильних комплексах особливе значення має система автоматичного керування. У традиційних моделях оператор вручну регулює температуру агента сушіння, швидкість подачі зерна, інтенсивність вентиляції та тривалість сушильних циклів. Такий спосіб керування є малоефективним, оскільки він значною мірою залежить від досвіду персоналу та не враховує змінні умови, такі як коливання початкової вологості, температура навколишнього середовища, тип зерна та його фізичні характеристики. Неправильне регулювання може призвести до перевитрати енергоносіїв, зниження продуктивності або погіршення якості кінцевої продукції.

Актуальність удосконалення систем сушіння зумовлена кількома чинниками. По-перше, зерносушіння є одним із найбільш енергоємних процесів на аграрному підприємстві — витрати на сушіння можуть становити до 30% усіх виробничих витрат. По-друге, сучасний ринок вимагає високої якості зерна, що зберігається тривалий час без втрат маси та якості. По-третє, зміни клімату спричиняють збільшення кількості сезонів із збиранням вологого зерна, що робить сушіння ще більш обов'язковим та навантаженим процесом.

Сучасні дослідження у сфері аграрних технологій вказують на доцільність переходу до інтелектуальних систем керування зерносушильними комплексами, які здатні адаптувати режими роботи до поточних параметрів зернової маси. Адаптивні алгоритми дозволяють автоматично підбирати температуру та швидкість потоку агента сушіння, коригувати швидкість подачі зерна, обирати оптимальний режим рециркуляції повітря та зменшувати енергоспоживання без погіршення якості кінцевого продукту. Такі алгоритми здатні враховувати нерівномірність вологості в різних партіях зерна, прогнозувати кінцевий результат та мінімізувати ризики перегріву чи недосушування.

Таким чином, зерносушильні комплекси є центральною ланкою в технологічному циклі підприємства, а ефективність їх роботи значною мірою визначає економічні показники агровиробництва. Оскільки традиційні системи керування часто не забезпечують належного рівня гнучкості та точності, виникає потреба в розробці адаптивних алгоритмів і застосунків, які дозволять оптимізувати процес за рахунок автоматичного реагування на зміни параметрів і підвищення якості регулювання. Актуальність цього напряму обумовлює необхідність комплексного аналізу предметної області, що включає фізичні основи процесу сушіння, особливості зерносушарок різних типів, вимоги до якості продукції та технологічні обмеження, які необхідно враховувати під час проектування інтелектуальних систем керування.

Окремої уваги під час аналізу процесу сушіння потребує питання теплофізичних властивостей зерна, адже саме вони визначають інтенсивність прогрівання матеріалу та швидкість видалення вологи. Зерно є біологічним об'єктом, структура якого включає ендосперм, зародок, оболонку та капілярно-пористу систему. Наявність капілярів різного діаметра формує різні шляхи переміщення вологи: частина вологи перебуває у зв'язаному стані, а частина — у вільному. Вільна волога видаляється швидше, тоді як зв'язана міцно утримується молекулярними силами й потребує значно інтенсивнішого теплового впливу. Саме тому початкова фаза сушіння відбувається інтенсивно, а подальше видалення вологи сповільнюється.

Складність процесу сушіння також зумовлена фазовим характером тепломасообміну. Спочатку зерно проходить стадію прогрівання, коли теплота від гарячого повітря передається у поверхневі шари зернини. Після цього настає основна стадія, під час якої відбувається видалення вологи через випаровування. Цей період характеризується найбільшою енергоємністю. У заключній фазі швидкість сушіння різко падає, оскільки волога мігрує з глибших шарів та видаляється повільніше. Для запобігання перегріву зерна в цій стадії необхідно застосовувати знижені температурні режими.

У технологічному плані важливо враховувати вплив початкових параметрів зерна на кінетику сушіння. До таких параметрів належать розмір зернини, вміст білка, ламкість, склоподібність, стан ендосперму та масова частка домішок. Наприклад, кукурудза має товстий ендосперм і часто нерівномірну вологість у середині качана, що ускладнює процес і вимагає поступової подачі тепла. Пшениця, ячмінь та жито сушаться швидше, але їх легко перегріти. Соняшникове насіння та ріпак потребують особливо делікатних температур через високий вміст олії. Неправильний підбір режиму сушіння може призвести до потемніння зерна, втрати схожості або появи запаху перегорілої олії.

Істотний вплив на параметри сушіння має температура агента сушіння. Занадто висока температура призводить до утворення «корки» на поверхні зернини, що гальмує вихід внутрішньої вологи і спричиняє дефекти насіння. Тому сучасні технології рекомендують багатостадійні режими, коли температура подається у декілька циклів: спочатку прогрівання, потім основна сушка, а далі досушування та охолодження. Температури для різних культур варіюються значно: для кукурудзи дозволені температури до 110–120 °С, тоді як для насінневого матеріалу вони не повинні перевищувати 45–55 °С. Невідповідність температурного режиму може призвести до серйозних економічних втрат.

Ключовою умовою якісного сушіння є забезпечення рівномірності процесу. У великих масивах зерна існують природні відмінності за вологістю, тому при завантаженні сушарки формується неоднорідна структура. Зерно рухається за різними траєкторіями у залежності від конструкції апарата, що може створювати зони надмірного нагріву або недостатньої обробки. Тому сучасні зерносушильні комплекси оснащують системами рециркуляції зерна, що забезпечують його перемішування та проходження через зони нагрітого повітря більш рівномірно. Рівномірність сушіння визначає кінцеву якість продукції.

У традиційних системах автоматизації використовуються базові режими, встановлені виробником, проте вони не враховують значну кількість реальних факторів, які змінюються під час експлуатації комплексу. Наприклад, вологість повітря на вході, температура навколишнього середовища, ступінь засміченості зерна, швидкість руху маси, тепловтрати, ступінь зносу пальників або котлів. Людина-оператор не здатна одночасно відстежувати всі ці параметри, тому процес сушіння у традиційних комплексах часто є або надмірно енерговитратним, або недостатньо ефективним.

Недоліки класичного керування особливо проявляються у великих агропідприємствах, де сушіння відбувається безперервно протягом тривалих періодів. Неправильне керування може призводити до перевитрати газу або електроенергії на десятки тисяч гривень. Крім того, при збільшенні обсягів сушіння виникає потреба у точнішому контролі температури та вологості вихідного продукту, щоб уникнути втрат та рекламацій під час поставок. Сучасні ринки, особливо експортні напрямки, мають жорсткі вимоги до вологості та сміттєвих домішок, тому забезпечення стабільної якості стає стратегічним завданням для підприємств.

У цьому контексті все більшої актуальності набувають адаптивні системи керування. На відміну від традиційних, вони здатні змінювати режими роботи в реальному часі, аналізуючи зміни параметрів зернової маси та умов навколишнього

середовища. Адаптивні алгоритми можуть прогнозувати кінцеву вологість зерна, визначати оптимальний температурний режим, регулювати швидкість подачі матеріалу, а також автоматично реагувати на відхилення. Особливо важливим є можливість виявлення зон перегріву або недосушування, що дозволяє запобігти формуванню небезпечних грибкових токсинів, таких як афлатоксини чи охратоксини.

Цифровізація аграрної галузі сприяє впровадженню програмних застосунків, які дозволяють відстежувати процес сушіння дистанційно. Використання датчиків температури, вологості, тепловізійних камер та IoT-пристроїв забезпечує збирання даних з високою точністю. Програмний застосунок може здійснювати розширений моніторинг, аналіз тенденцій, виявлення аномалій та формування рекомендацій. Застосування адаптивного програмного забезпечення не лише підвищує якість керування, але й дає змогу зберігати історичні дані, що є цінним для оптимізації виробничих процесів у майбутньому.

Таким чином, сучасні тенденції розвитку зерносушильних комплексів базуються на поєднанні класичних технологічних рішень із новітніми цифровими методами керування. Впровадження адаптивних алгоритмів дозволяє забезпечити високу якість зерна, стабільність режимів роботи, зниження витрат енергії та мінімізацію людського фактору. У результаті зерносушіння стає більш керованим, прогнозованим і економічно вигідним процесом, що відповідає сучасним вимогам аграрного виробництва.

1.2 Типи зерносушильних комплексів та їх конструктивні особливості

Зерносушильні комплекси класифікуються за принципом дії, конструктивним виконанням, технологічними характеристиками та призначенням для конкретних видів зернових культур. Від вибору конкретного типу сушарки залежить ефективність процесу сушіння, енергоспоживання, якість зерна та тривалість експлуатації комплексу. Виробники агропромислового обладнання пропонують широкий спектр систем: шахтні, барабанні, колонкові, модульні, безперервної та періодичної дії, а також комбіновані рішення.

1.2.1 Шахтні зерносушарки

Шахтні сушарки є одними з найпоширеніших у промислових масштабах через високу продуктивність та можливість роботи з великими обсягами зерна. Їхня конструкція включає вертикальну шахту, у яку подається зерно, та систему нагрітого повітря, що проходить крізь нього знизу вгору або зверху вниз. Основні елементи шахтної сушарки:

- вертикальна шахта для руху зернової маси;
- розподільча система повітря;
- нагрівач (теплогенератор або газовий пальник);
- система видалення вологи;
- транспортний механізм подачі та вивантаження зерна.

Принцип роботи шахтної сушарки ґрунтується на одночасній взаємодії зерна і потоку нагрітого повітря. Переваги цієї системи включають рівномірне сушіння, простоту керування і можливість масштабування продуктивності за рахунок збільшення висоти шахти або кількості потоків повітря. Недоліками є значні габарити та потреба у високій потужності нагріву при сушінні вологого зерна.

1.2.2 Барабанні сушарки

Барабанні сушарки належать до типу ротаційних систем і застосовуються для сушіння зернових культур середньої продуктивності. Конструктивно вони являють собою горизонтальний обертовий барабан з внутрішніми лопатями, які перемішують зерно, забезпечуючи рівномірне його нагрівання. Нагріте повітря подається всередину барабана, а волога відводиться через спеціальні канали.

Переваги барабанних сушарок:

- можливість обробки зерна з високою початковою вологістю;
- рівномірне прогрівання завдяки перемішуванню;
- простота конструкції та обслуговування.

Недоліки:

- високе енергоспоживання через тертя та обертання барабана;
- обмежена продуктивність у порівнянні з шахтними сушарками;
- підвищений ризик механічного пошкодження зерна при обробці чутливих культур.

1.2.3 Типи зерносушильних комплексів та їх конструктивні особливості , колонкові сушарки

Колонкові сушарки, або сушарки зі стовпчастою конструкцією, являють собою вертикальні модулі, розділені на декілька технологічних зон. Зерно рухається зверху

вниз під дією сили тяжіння, а повітряна суміш з теплогенератора подається поперечно або зустрічно. Кожна зона може мати власний температурний режим, що дозволяє проводити багатоступеневе сушіння, оптимізуючи витрати енергії та запобігаючи перегріву зерна.

Переваги колонкових сушарок включають:

- високу рівномірність сушіння;
- можливість сушіння зерна різних культур у одному модулі;
- компактні розміри у порівнянні з шахтними системами великої продуктивності;
- модульність, що дозволяє масштабувати комплекс, додаючи нові колони.

Недоліки:

- потреба у ретельному контролі температури та швидкості повітря;
- складність обслуговування верхніх зон при високих модульних конструкціях;
- висока початкова вартість обладнання.

Колонкові сушарки широко застосовуються на підприємствах середньої потужності та в комплексах, де важлива економія площі. Вони дозволяють оптимізувати робочі цикли сушіння, використовуючи меншу кількість теплової енергії порівняно з шахтними аналогами. Завдяки багатоступеневому режиму сушіння знижуються ризики утворення тріщин на зерні та погіршення схожості насіння, що особливо важливо для посівного матеріалу.

1.2.4 Модульні та комбіновані сушарки

Модульні сушарки представляють собою конструкції, що складаються з окремих взаємозамінних блоків, які можна комбінувати залежно від потреб виробництва. Кожен модуль включає систему подачі зерна, сушильну камеру, нагрівач та канал для відведення вологи. Такі системи мають переваги у масштабуванні та модернізації: підприємство може збільшувати продуктивність без повної заміни обладнання.

Комбіновані сушарки поєднують принципи роботи різних типів систем, наприклад, барабанної та колонкової. Це дозволяє об'єднати переваги обох технологій: швидкість сушіння, рівномірність, контроль температурних режимів та

енергозбереження. Переваги таких систем полягають у високій гнучкості, можливості обробки зерна з різною початковою вологістю та адаптації режимів під різні культури.

1.2.5 Сушарки безперервної та періодичної дії

Сушарки безперервної дії дозволяють зерну рухатися через сушильний апарат постійно, при цьому його температура та швидкість пересування строго контролюються. Основною перевагою таких систем є стабільність режимів сушіння та висока продуктивність, що робить їх незамінними у великих агропідприємствах. Недоліком є відносна складність конструкції та підвищені вимоги до автоматизації.

Сушарки періодичної дії працюють по циклічному принципу: зерно завантажується на певний проміжок часу, проходить процес сушіння, а потім вивантажується. Така схема забезпечує точне регулювання температури та вологості, що особливо важливо для делікатних культур або насіннєвого матеріалу. Проте продуктивність таких систем нижча, і вони менш ефективні для великих обсягів.

1.2.6 Вплив конструктивних особливостей на якість зерна та енергоспоживання

Конструктивні параметри сушарок безпосередньо впливають на фізико-хімічні властивості зерна. Наприклад, шахтні та колонкові сушарки забезпечують більшу рівномірність нагрівання та мінімізують утворення тріщин у зерні. Барабанні системи частіше застосовуються для кормових культур, де механічне перемішування дозволяє рівномірно сушити зерно, але підвищує ризик пошкодження ендосперму у зерна насіннєвого призначення.

Енергоспоживання безпосередньо залежить від конструкції: вертикальні системи (шахтні, колонкові) більш енергоефективні через використання природної конвекції та багатоступеневих режимів сушіння. Горизонтальні (барабанні) потребують додаткової енергії на обертання та перемішування зерна. Модульні та комбіновані системи дозволяють оптимізувати витрати енергії, адже кожен блок може працювати автономно, підлаштовуючись під поточну потребу.

1.3 Стандарти, вимоги до вологості зерна та контроль якості

Якість зерна, що надходить з сушарки, визначається не лише технологічним процесом, а й дотриманням вимог державних та міжнародних стандартів. Основним параметром є вологість зерна, оскільки вона впливає на збереження, схожість, технологічні властивості та безпеку продукту.

1.3.1 Нормативні вимоги до вологості зерна

Державні стандарти (ДСТУ) та міжнародні нормативи (ISO, FAO) визначають оптимальні значення вологості для різних культур:

- Пшениця — 12–14% для тривалого зберігання, 14–16% для короткострокового;
- Кукурудза — 12–14% для тривалого зберігання, 14–16% для споживання;
- Ячмінь та жито — 12–14%;
- Соняшник, ріпак — 8–10% (через високий вміст олії, ризик псування при високій вологості).

Таблиця 1.1

Нормативні вимоги до вологості зерна

Культура	Оптимальна вологість (%) для тривалого зберігання	Оптимальна вологість (%) для короткострокового зберігання
Пшениця	12–14	14–16
Кукурудза	12–14	14–16
Ячмінь	12–14	14–16
Жито	12–14	14–16
Соняшник	8–10	8–10

Порушення цих норм призводить до втрати схожості, утворення цвілі, розвитку мікотоксинів та зменшення комерційної цінності зерна. Для забезпечення відповідності стандартам сушарки обладнуються системами контролю вологості, які дозволяють регулювати температуру та швидкість повітряного потоку.

1.3.2 Методи вимірювання вологості

Вологість зерна контролюється різними методами:

1. Гравіметричний метод — класичний спосіб, який передбачає висушування зразка в термостаті та визначення різниці маси до й після сушіння. Метод точний, але трудомісткий і не підходить для оперативного контролю.
2. Електронні вологоміри — використовують електричні або ємнісні датчики, що вимірюють показники вологи безпосередньо в потоці зерна. Дозволяють автоматично регулювати режим сушіння.
3. Оптичні та інфрачервоні методи — базуються на поглинанні світлових хвиль зерном, дають швидкий результат, підходять для масового та промислового контролю.

Таблиця 1.2

Методи вимірювання вологості

Метод	Принцип дії	Переваги	Недоліки
Гравіметричний	Висушування та визначення маси	Висока точність	Трудомісткий, не оперативний
Електронний вологомір	Електричні/ємнісні датчики	Швидко, підходить для автоматизації	Вартість, потребує калібрування
Оптичний/інфрачервоний	Поглинання світла зерном	Швидкий, безконтактний	Чутливий до забруднень

В сучасних зерносушильних комплексах зазвичай застосовується комбінований підхід: електронні датчики забезпечують безперервний контроль, а раз на певний період відбираються зразки для лабораторної перевірки.

1.3.3 Контроль якості та безпеки зерна

Контроль якості включає не лише вологість, а й:

- фізико-механічні властивості (тріщини, ушкодження, м'якші та тверді частини);
- наявність домішок (пісок, пил, інші зернові культури);
- розвиток мікроорганізмів (цвіль, бактерії, мікотоксини);
- запах і колір зерна.

Таблиця 1.3

Контроль якості та безпеки зерна

Параметр	Звичайний контроль	Адаптивний контроль
Енергоспоживання	Високе	Знижене на 15–20%
Якість кінцевого зерна	Середня	Висока, рівномірна
Ризик утворення цвілі	Середній	Мінімальний
Втручання оператора	Постійне	Мінімальне

Недотримання цих параметрів погіршує технологічні властивості зерна: воно може втратити схожість, стати непридатним для переробки, знизити комерційну цінність. Системи адаптивного керування дозволяють моніторити ці параметри в режимі реального часу, попереджати аварійні ситуації та автоматично коригувати режим сушіння.

1.3.4 Сучасні системи моніторингу вологості

Новітні зерносушильні комплекси оснащуються інтелектуальними системами контролю:

- датчики температури та вологості на вході і виході;
- системи дистанційного моніторингу через мобільні застосунки;

- аналітика даних для прогнозування кінцевої вологості та оптимального часу сушіння;
- автоматичне регулювання температури та швидкості повітря на основі алгоритмів адаптивного керування.

Завдяки цим технологіям процес сушіння стає більш передбачуваним, економічним та безпечним, з мінімізацією людського фактору.

1.3.5 Вплив контролю вологості на ефективність сушіння

Оптимальний контроль вологості дозволяє:

- зменшити енергоспоживання до 15–20% порівняно з традиційними методами;
- підвищити якість кінцевого продукту (рівномірна вологість, відсутність тріщин, збереження схожості);
- знизити ризики утворення грибкових токсинів та псування;
- забезпечити стабільність роботи сушарки при різних умовах навколишнього середовища.

Адаптивні системи керування вологою, що працюють на основі датчиків та алгоритмів прогнозування, забезпечують оптимізацію режимів без необхідності постійного втручання оператора.

1.4 Технологічні процеси сушіння зерна та автоматизація контролю

1.4.1 Етапи технологічного процесу сушіння зерна

1. Підготовка зерна до сушіння

Першим етапом є очищення зерна від домішок, пилу, соломи та інших сторонніх часток. Це необхідно для:

- запобігання блокуванню транспортувальних систем;
- забезпечення рівномірного контакту зерна з нагрітим повітрям;
- мінімізації механічних ушкоджень зерна.

Важливим параметром є однорідність вологості зерна — зерно з сильною різницею вологості сушиться нерівномірно, що може призвести до псування частини партії.

2. Основне сушіння

Зерно надходить у сушарку, де нагріте повітря від теплогенератора проходить через зернову масу. Основні контрольовані параметри:

- температура нагрітого повітря;
- швидкість повітряного потоку;
- час проходження зерна через сушильну камеру.

Таблиця 1.4

Рекомендовані температурні режими сушіння для різних культур

Культура	Температура сушіння, °С	Час сушіння, год
Пшениця	40–50	6–8
Кукурудза	45–55	8–10
Ячмінь	40–50	5–7
Ріпак	35–45	4–6
Соняшник	30–40	3–5

3. Охолодження та стабілізація вологості

Після сушіння зерно охолоджується до температури навколишнього середовища. Це зменшує конденсацію вологи, запобігає псуванню та створює рівномірну вологість по всій партії. Під час охолодження рекомендується знову контролювати вологість, щоб переконатися, що зерно відповідає стандартам.

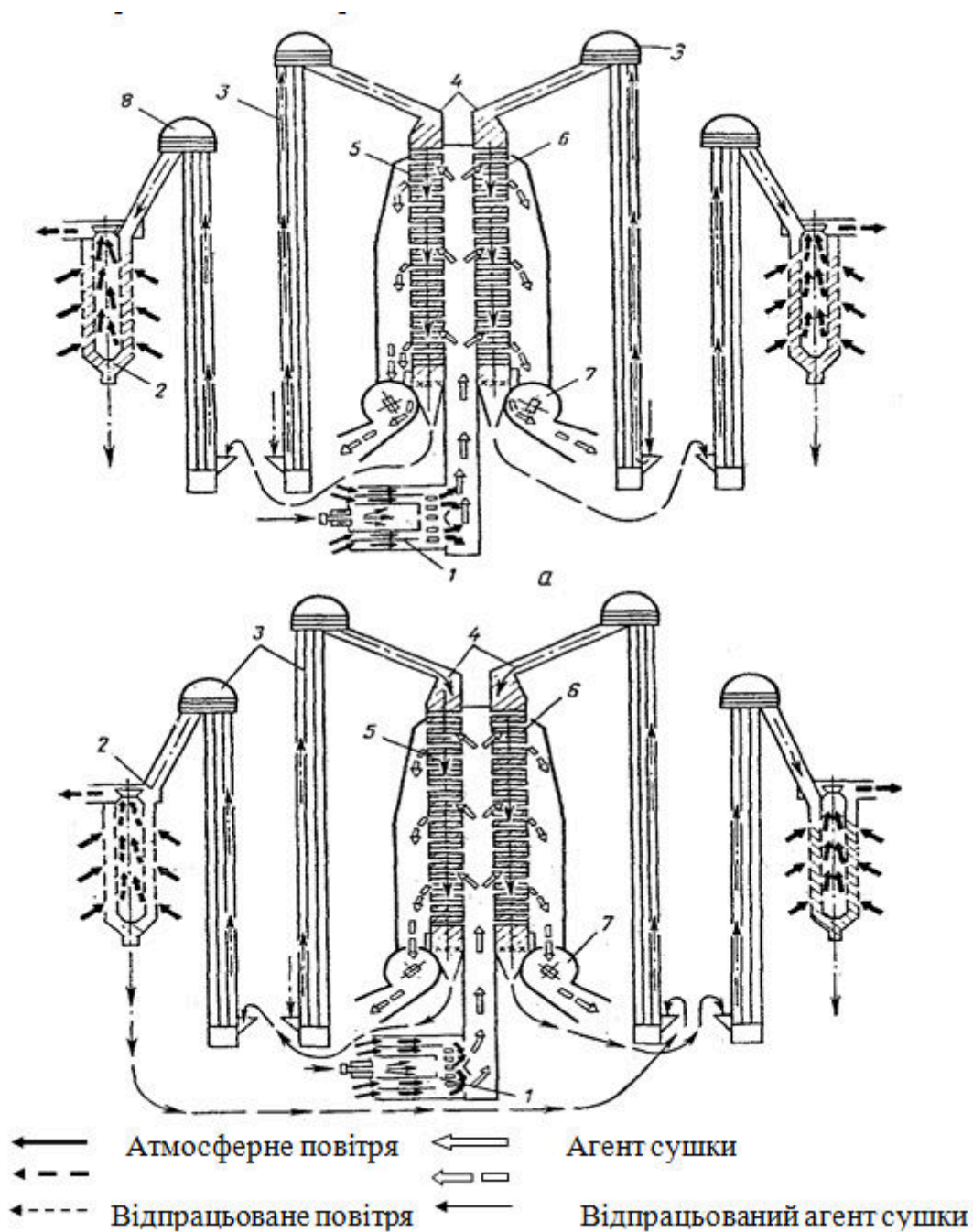


Рис. 1.1. Схема технологічного процесу зерносушильного комплексу.

1.4.2 Вплив технологічних параметрів на якість зерна

Неправильний вибір температури та швидкості повітря може призвести до:

- утворення тріщин;
- зниження схожості насіння;
- погіршення харчових і технологічних властивостей;

- збільшення втрат енергії.

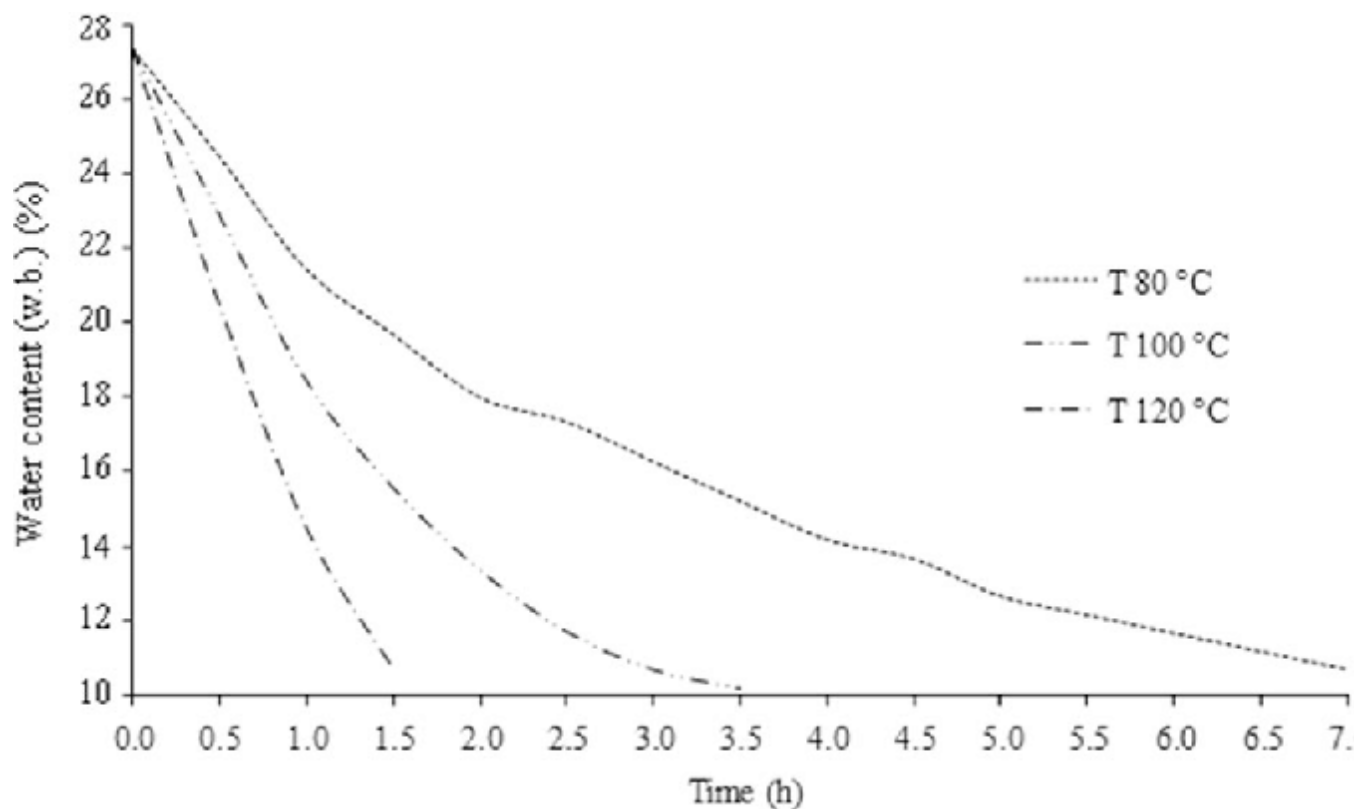


Рис. 1.2. Зміна вологості зерна при сушінні при різних температурах.

Таблиця 1.5

Вплив температури сушіння на якість зерна

Температура, °C	Вологість кінцева, %	Втрата схожості, %	Ризик тріщин
35–40	12–14	1–2	низький
41–45	12–14	3–4	середній
46–50	12–14	5–7	високий
>50	12–14	10+	дуже високий

1.4.3 Методи автоматизації контролю

Сучасні зерносушильні комплекси обладнуються:

- Сенсори вологості та температури на вході та виході;

- Системи дистанційного моніторингу через мобільні застосунки або SCADA-системи;
- Програмні алгоритми адаптивного керування, які автоматично коригують режим сушіння залежно від показників датчиків;
- Системи прогнозування кінцевої вологості та часу сушіння на основі історичних даних та моделей зерна.

Таблиця 1.6

Порівняння традиційного та адаптивного контролю сушіння

Параметр	Традиційний контроль	Адаптивний контроль
Контроль температури	Ручний	Автоматичний
Вимір вологості	Періодичний	Безперервний
Енергоспоживання	Високе	Знижене на 10–20%
Якість зерна	Середня	Висока, рівномірна
Втручання оператора	Постійне	Мінімальне

1.4.4 Сучасні технології оптимізації режимів сушіння

Системи адаптивного керування використовують алгоритми, що:

- аналізують дані сенсорів у реальному часі;
- прогнозують кінцеву вологість;
- автоматично регулюють температуру та швидкість повітря;
- зменшують енергоспоживання та покращують якість зерна.

Приклад: на підприємствах, де встановлено сенсори у шахтних та колонкових сушарках, автоматична система зменшує температуру повітря на 5–7°C, якщо датчики показують перевищення вологості у верхніх шарах зерна, тим самим запобігаючи перегріву.

1.4.5 Порівняння ефективності традиційних і адаптивних методів

Таблиця 1.7

Порівняння ефективності традиційних і адаптивних методів

Параметр	Традиційний метод	Адаптивний метод
Час сушіння, год	6–10	5–8
Енергоспоживання, кВт·год	100%	80–90%
Рівномірність вологості	середня	висока
Пошкодження зерна	можливі	мінімальні
Втручання оператора	постійне	мінімальне

1.4.6 Підсумок

Впровадження автоматизації та адаптивних алгоритмів у процес сушіння зерна дозволяє:

- забезпечити стабільність вологості та температури;
- знизити втрати енергії та покращити економічну ефективність;
- зберегти схожість та технологічні властивості зерна;
- мінімізувати людський фактор та ризики аварійних ситуацій.

Системи адаптивного контролю та моніторингу створюють основу для інтелектуальних зерносушильних комплексів, що є наступним кроком у модернізації агропромислового обладнання.

1.5 Проблеми та перспективи впровадження адаптивних систем у зерносушильні комплекси

Зерносушильні комплекси є ключовим елементом агропідприємств, що займаються зберіганням і переробкою зерна. Сучасні технології дозволяють підтримувати оптимальні режими сушіння та зберігати якість зерна, але водночас існують певні проблеми та виклики, які потребують впровадження адаптивних систем керування.

1.5.1 Основні проблеми традиційних систем керування

1. Нерівномірна вологість зерна

Традиційні системи, де контролювання проводиться вручну або за графіком, не враховують динамічні зміни вологості зерна та зовнішніх умов. Це призводить до:

- пересушування або недостатнього сушіння;
- утворення тріщин та втрати схожості;
- підвищених енергетичних витрат.

2. Високе енергоспоживання

Без автоматичного регулювання температури та швидкості повітря значна частина енергії витрачається марно, що збільшує витрати підприємства.

3. Обмежена інтеграція з іншими системами

Традиційні сушарки часто не інтегруються з системами обліку, логістики та моніторингу, що ускладнює планування та управління підприємством.

4. Вплив людського фактору

Ручне регулювання режимів сушіння залежить від досвіду операторів і може призводити до помилок, що впливають на якість кінцевого продукту.

1.5.2 Перспективи застосування адаптивних алгоритмів

Адаптивні алгоритми дозволяють автоматично підлаштовувати режими сушіння під реальні умови:

- Регулювання температури та швидкості повітря у реальному часі;
- Прогнозування кінцевої вологості зерна на основі даних сенсорів;
- Оптимізація енергоспоживання;
- Зменшення пошкоджень зерна та підвищення схожості;
- Інтеграція з мобільними застосунками та SCADA-системами, що дозволяє дистанційне керування та моніторинг процесу.

Порівняння ефективності традиційних і адаптивних систем

Параметр	Традиційна система	Адаптивна система
Контроль вологості	Періодичний	Безперервний
Втручання оператора	Високе	Мінімальне
Енергоспоживання	Високе	Оптимізоване
Якість зерна	Середня	Висока, рівномірна
Прогнозування результату	Немає	Так, за даними сенсорів

1.5.3 Тенденції розвитку автоматизації зерносушильних комплексів

1. Інтеграція інтернету речей (IoT)

Використання датчиків та пристроїв IoT дозволяє збирати дані з різних точок зерносушарки та створювати аналітичні моделі для прогнозування процесів.

2. Використання машинного навчання та адаптивних алгоритмів

Алгоритми прогнозують оптимальні режими сушіння, враховуючи тип зерна, початкову вологість та температуру зовнішнього середовища.

3. Віддалений моніторинг та керування

Мобільні застосунки та SCADA-системи дозволяють операторам контролювати процес сушіння дистанційно, отримувати сповіщення про відхилення та оперативно реагувати на проблеми.

4. Енергетична ефективність та сталий розвиток

Адаптивні системи дозволяють значно знизити витрати енергії та зменшити викиди, що є важливим аспектом сучасного агробізнесу.

1.5.4 Проблеми впровадження адаптивних систем

Незважаючи на переваги, існують певні виклики:

- Вартість обладнання та сенсорів;
- Необхідність підготовки персоналу для роботи з новими технологіями;
- Інтеграція з існуючими системами сушіння;
- Можливі технічні збої та необхідність сервісного обслуговування.

Для подолання цих проблем потрібна поетапна модернізація підприємств та навчання персоналу.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ПІДХОДИ В АПК

2.1 Класичні методи регулювання (PID, ПІД-регулятори, автоматика): переваги й обмеження

Класичні методи автоматичного регулювання є основою більшості технологічних процесів у промисловості, включно з агропромисловим комплексом. У зерносушильних комплексах вони використовуються десятиліттями, забезпечуючи стабільне підтримання температури, вологості та швидкості повітряного потоку. Найпоширенішим і найбільш універсальним інструментом є PID-регулятор (пропорційно–інтегрально–диференціальний регулятор), який застосовується в системах керування з неперервним циклом.

Сутність PID-регулювання

PID-регулятор — це алгоритм, що формує керуючий вплив на об'єкт на основі різниці між бажаним значенням параметра (setpoint) і фактичним значенням, яке знімається із датчика. Регулятор складається з трьох компонентів:

1. P — пропорційна складова
Реагує на поточну похибку. Чим більша різниця між заданою і реальною температурою, тим сильніший управляючий вплив.
Недолік — можливість перерегулювання.
2. I — інтегральна складова
Усереднює похибку за певний період і дозволяє усунути систематичне відхилення. Саме завдяки інтегральній частині система з часом точно виходить на задане значення.
Недолік — надмірно велика інтегральна дія може уповільнювати реакцію.
3. D — диференціальна складова
Реагує на швидкість зміни похибки. Вона «передбачає» майбутню поведінку системи і згладжує коливання.
Недолік — чутливість до шумів датчиків, через що вимагає фільтрації.

Усі три складові разом забезпечують компроміс між швидкістю, точністю та стабільністю.

Застосування PID-регуляторів у зерносушильних комплексах

У зерносушарках класичні PID-регулятори використовуються для керування:

- температурою теплоносія (газ, дизель, пелети, біопаливо);
- швидкістю обертання вентиляторів;
- витратою повітря;
- швидкістю руху зерна;
- роботою заслінок та клапанів;
- керуванням тиском у теплогенераторі.

Найчастіше встановлюється декілька паралельних регуляторів, кожен з яких відповідає за свою частину технологічної схеми. Наприклад, регулятор температури працює у зв'язці з регулятором подачі газу, а регулятор швидкості вентиляторів — з контролем вологості вихідного зерна.

Переваги класичних PID-систем

1. Простота реалізації
Алгоритм добре вивчений, має десятки варіантів реалізації й підтримується будь-якими промисловими контролерами (Siemens, Schneider, OMRON, Delta, Arduino PLC, інших).
2. Надійність і передбачуваність
PID-регулятор гарантовано працює в більшості фізичних систем, що мають інерцію. Для сушарки це критично, оскільки процес змінюється поступово.
3. Можливість гнучкого налаштування
Користувач може вручну підібрати коефіцієнти P, I та D залежно від характеристик сушарки.
4. Стійкість до типових технологічних коливань
PID добре справляється із плавними змінами вологості зерна, температури довкілля та тиску в системі.
5. Широка апаратна підтримка
Підтримується навіть старими моделями контролерів та систем SCADA.

Недоліки PID-регулювання у зерносушильних комплексах

Попри ефективність, класичний PID має низку обмежень, які особливо проявляються у реальних аграрних умовах.

1. Неробастність до раптових змін зерна

Якщо в бункер потрапляє партія зерна з різною початковою вологістю, PID не встигає адаптуватися й може викликати:

- пересушування (втрата маси, зниження якості),
- недосушування (ризик самозігрівання під час зберігання).

2. Залежність від точності датчиків

Дешеві або забруднені датчики температури чи вологості вносять шум у вимірювання, через що:

- D-частина починає «фонити»,
- система робить зайві коливальні рухи,
- збільшується витрата енергії.

3. Не враховує нелінійність процесу сушіння

Сушіння зерна — нелінійний процес, тобто залежність вологості від температури та часу не є рівномірною. PID апріорі передбачає, що об'єкт має лінійну або квазілінійну модель.

У сушарці ж ситуація ускладнюється:

- зміною структури зерна,
- різним розміром зернин,
- нерівномірністю прогрівання повітря.

4. Відсутність прогнозування

Регулятор не може передбачити:

- підвищення вологості в наступній партії;
- зміну погоди;
- різку зміну тиску або температури теплого повітря;

- очікуваного рівня енергоспоживання.

5. Складність ручного налаштування

Правильний підбір коефіцієнтів P, I, D у реальній сушарці може займати кілька днів роботи технолога. Неправильне налаштування призводить до:

- затримок у процесі сушіння,
- зростання енергозатрат на 10–25%,
- низької якості кінцевого продукту.

Порівняння PID-регулятора з іншими класичними методами

Окрім PID, у зерносушильних комплексах можуть застосовуватися:

1. Однопозиційні регулятори (ON/OFF)

Працюють за принципом «увімкнено / вимкнено».

Переваги:

- максимально прості,
- не потребують налаштування.

Недоліки:

- викликають великі коливання температури,
- не підходять для точного сушіння.

2. Пропорційні регулятори (P-регулятори)

Мають швидку реакцію, але ніколи не виходять точно на задане значення — завжди залишається статична похибка.

3. Інтегральні та диференційні регулятори

Застосовуються рідко окремо, оскільки мають надто вузький функціонал.

У порівнянні з ними PID є універсальним і найточнішим, але не оптимальним для всіх умов.

Причини переходу від PID до адаптивних методів

Потреба переходу до сучасних інтелектуальних методів керування обумовлена:

1. Зростанням енергетичних витрат сушіння (особливо при високій вартості газу або електроенергії).
2. Потребою точного контролю якості зерна для зберігання довше 6–12 місяців.
3. Складністю реальних умов PID працює добре лише у стабільних системах, а зерносушіння завжди є нестабільним.
4. Можливістю використовувати дані — сучасні датчики та IoT дають десятки вимірювань за секунду, що PID не вміє повноцінно аналізувати.
5. Прагненням до автоматизації аграрних підприємств і переходу до інтелектуальних систем АСКТП.

2.2 Адаптивне та робастне керування: концепції, алгоритмічні підходи, критерії адаптації

Адаптивне та робастне керування є сучасними методами автоматизації складних технологічних процесів, де параметри об'єкта змінюються у часі або залежать від зовнішніх факторів. Для зерносушильних комплексів ці методи мають особливе значення, оскільки процес сушіння є нелінійним, стохастичним та залежним від багатьох випадкових чинників, які класичні регулятори (PID) не здатні повноцінно враховувати.

У цьому підрозділі розглядаються теоретичні основи адаптивних і робастних систем, їхні різновиди, переваги та алгоритмічні підходи, що дозволяють значно підвищити точність керування сушінням зерна.

1. Сутність адаптивного керування

Адаптивне керування — це підхід, у якому система змінює свої параметри в реальному часі відповідно до змін характеристик об'єкта чи зовнішнього середовища.

Головна мета адаптації — забезпечити оптимальну роботу навіть тоді, коли умови змінюються непередбачувано.

Чому адаптивне керування потрібне у зерносушильних комплексах?

Тому що в процесі сушіння:

- змінюється початкова вологість зерна кожної партії;
- зерно має різний розмір, щільність, твердість;
- температура навколишнього повітря може коливатися на 10–15 °С протягом дня;
- витрата теплого повітря залежить від забрудненості фільтрів та стану вентилятора;
- зміна типу палива (газ/пелети) змінює динаміку нагріву.

PID-регулятор працює з постійними коефіцієнтами, а отже не може автоматично компенсувати ці зміни.

Адаптивна система здатна:

- підлаштовувати коефіцієнти регулятора;
- прогнозувати вологість на виході;
- змінювати інтенсивність сушіння залежно від фактичних умов;
- мінімізувати енерговитрати.

2.2.1 Самоналаштовувані системи (Self-tuning control)

Регулятор періодично оцінює параметри об'єкта й автоматично коригує коефіцієнти PID або інших алгоритмів.

Типові кроки самоналаштування:

1. Вимірювання реакції системи (температури, вологості).
2. Оцінка моделі об'єкта (наприклад, час інерції сушарки).
3. Обчислення оптимальних коефіцієнтів.
4. Застосування нових параметрів до регулятора.

Переваги:

- автоматичне налаштування при зміні умов;

- зменшення участі оператора;
- ефективність при зміні типу зерна або його вологості.

Недоліки:

- залежність від точності оцінки моделі;
- можливе тимчасове погіршення роботи під час переналаштування.

2.2.2 Модельно-орієнтоване адаптивне керування (Model Reference Adaptive Control — MRAC)

Принцип MRAC:

Система має еталонну модель, яка задає бажану поведінку (наприклад, реакцію температури на зміну подачі палива). Реальний об'єкт порівнюється з еталоном, а параметри регулятора автоматично змінюються так, щоб мінімізувати різницю.

Схема MRAC:

- Еталонна модель
- Об'єкт керування
- Адаптаційний механізм
- Правило оновлення параметрів

Переваги:

- здатність швидко компенсувати зміни у зерні або погодних умовах;
- плавність і стабільність керування;
- високоточний контроль температури й вологості.

Де застосовується в сушарках:

- керування температурою сушильних камер;
- підтримання рівномірності сушіння.

2.2.3 Адаптація на основі ідентифікації (Adaptive Model Identification — AMI)

Система постійно оновлює внутрішню математичну модель зерносушарки (наприклад, теплову модель).

Цей підхід дозволяє враховувати:

- зміни у теплопровідності зерна;
- сезонні зміни;
- варіації у надходженні повітря.

Алгоритми ідентифікації:

- метод найменших квадратів (RLS — Recursive Least Squares);
- стохастичні градієнтні методи;
- калманівська фільтрація.

2.2.4 Робастне керування

Робастне керування — це підхід, який гарантує стабільну роботу системи незалежно від невизначеностей.

На відміну від адаптивного керування (яке підлаштовується), робастне — протистоїть змінам і шумам.

Чому робастність важлива для сушарки?

Через:

- коливання вхідної вологості;
- нерівномірний розподіл температури по висоті сушарки;
- шум у датчиках;
- забруднення повітряних каналів;
- зміни характеристик вентилятора.

Робастні системи гарантують, що технологічний процес не “зірветься”, навіть якщо частина параметрів зміниться у межах 10–20%.

2.2.5 Алгоритмічні підходи в адаптивному та робастному керуванні

Метод Ляпунова (Adaptive Lyapunov Control)

Широко застосовується в MRAC.

Забезпечує:

- математичну гарантовану стійкість;
- відсутність коливань;

- плавну адаптацію параметрів.

2.2.6 H–керування (H-infinity control)

Це робастний метод, що забезпечує оптимальний баланс між стабільністю та чутливістю системи.

Застосовується в складних системах з великим шумом.

2.2.7 Sliding Mode Control (ковзне керування)

Переваги:

- стійкість до зовнішніх збурень;
- висока точність у нелінійних системах.

Недоліки:

- “чопінг”-ефект — можливі малі коливання керуючого сигналу.

2.2.8 MPC — Model Predictive Control

Найсучасніший підхід.

MPC виконує:

- прогноз поведінки системи на хвилини / години вперед;
- оптимізацію енергоспоживання;
- забезпечення обмежень (наприклад, не перегріти зерно > 130 °C).

Це фактично «інтелектуальний автопілот» для сушарки.

2.3 Нечітка логіка та експертні системи у системах керування зерносушильними комплексами

Нечітка логіка (fuzzy logic) та експертні системи належать до інтелектуальних підходів, що дозволяють моделювати складні, слабо формалізовані та нелінійні процеси, характерні для аграрної галузі. У контексті керування зерносушильним комплексом ці методи особливо ефективні, оскільки технологічний процес сушіння має випадковий характер, залежить від множини змінних (вологість, температура, швидкість подачі повітря, початкова вологість, тип культури) і не завжди піддається точному математичному опису.

2.3.1 Основи нечіткої логіки

Нечітка логіка була запропонована Л. Заде у 1965 році як засіб формалізації нечітких (fuzzy) понять і плавних переходів між станами системи. На відміну від класичної логіки, де змінна може набувати значень лише 0 або 1, у нечіткій логіці значення істинності змінюються в діапазоні $[0;1]$, що дозволяє моделювати лінгвістичні оцінки типу:

- «низька температура»
- «висока вологість»
- «помірна швидкість сушіння»

Таблиця 2.1

Основи нечіткої логіки

Параметр	Лінгвістичні значення	Тип функції належності
Вологість зерна W	Низька Середня Висока	Трикутна Трапецієподібна Трикутна
Температура T	Низька Рекомендована Висока	Трапецієподібна Трикутна Трапецієподібна
Швидкість сушіння	Повільна Нормальна Висока	Трикутна Трапецієподібна Трикутна
Коригування температури ΔT	Зменшити Не змінювати Збільшити	Трикутна Трикутна Трапецієподібна

2.3.2 Функції належності для параметрів зерносушильного комплексу

У нечітких системах кожній лінгвістичній змінній відповідає функція належності ($\mu(x)$), що описує ступінь належності значення x певній нечіткій множині.

Приклад нечітких множин для вологості зерна

Вхідна змінна: Вологість зерна W (%)

Терм-множина:

- «Низька»
- «Середня»
- «Висока»

Можливий набір функцій належності:

1. Низька:

Трикутна функція

$$\mu(W) = 1 \text{ при } W \leq 10$$

$$\mu(W) \rightarrow 0 \text{ при } W = 14$$

$$\mu(W) = 0 \text{ при } W \geq 14$$

2. Середня:

Трапецієподібна

$$\mu(W) = 0 \text{ при } W \leq 12$$

$$\mu(W) = 1 \text{ при } 14 \leq W \leq 17$$

$$\mu(W) \rightarrow 0 \text{ при } W \geq 19$$

3. Висока:

Трикутна/трапецієподібна

$$\mu(W) = 0 \text{ при } W \leq 18$$

$$\mu(W) \rightarrow 1 \text{ при } W \geq 22$$

Приклад нечітких множин для температури сушіння

Вхідна змінна: Температура повітря T ($^{\circ}\text{C}$)

Терм-множина:

- «Низька»
- «Рекомендована»
- «Висока»

Для пшениці температура критично важлива:

- понад 110°C — можливе підгоряння,
- нижче 60°C — низька ефективність сушіння.

2.3.3 Нечіткі правила для процесу сушіння

Система нечіткого керування складається з набору правил виду IF–THEN.

Набір правил для контролю температури та витрати повітря

1. IF вологість висока AND температура низька
THEN збільшити температуру на високий рівень.
2. IF вологість середня AND температура рекомендована
THEN підтримувати поточний режим.
3. IF вологість низька AND температура висока
THEN зменшити температуру до мінімальної для економії енергії.
4. IF швидкість сушіння низька AND вологість висока
THEN збільшити потік гарячого повітря.
5. IF різниця температур між входом і виходом велика
THEN зменшити витрати газу (ознака пересушування).

Таблиця 2.2

Нечіткі правила для процесу сушіння

№	Правило IF–THEN	Дія
1	IF (Вологість висока) AND (Температура низька)	THEN збільшити ΔT сильно
2	IF (Вологість середня) AND (Температура рекомендована)	THEN тримати режим
3	IF (Вологість низька) AND (Температура висока)	THEN зменшити ΔT
4	IF (Різниця температур велика)	IF (Різниця температур велика) THEN зменшити потік
5	IF (Швидкість сушіння низька) AND (Вологість висока)	THEN збільшити вентилятор

2.3.4 Фазифікація, нечітке виведення й дефазифікація

Система нечіткого керування складається з трьох етапів:

1. Фазифікація

Перетворення реальних значень вологості, температури та інших параметрів у значення функцій належності.

2. Механізм нечіткого виведення

Зазвичай застосовують:

- Mamdani (класичний, інтуїтивний)
- Sugeno (кращий для автоматичного керування)

Для зерносушильних комплексів оптимальним вважається Mamdani, бо він ближчий до експертних правил реальних операторів.

2.3.5 Приклад нечіткої системи для управління температурою сушіння (модель)

Вхідні параметри:

- Вологість зерна W
- Температура входу T_{in}
- Темп сушіння S

Вихід:

- Коригування температури ΔT

Приклад правила Mamdani:

IF ($W = \text{“висока”}$) AND ($T_{in} = \text{“низька”}$) AND ($S = \text{“повільний”}$)
THEN ($\Delta T = \text{“збільшити сильно”}$)

Використання нечіткої логіки дозволяє формалізувати досвід операторів, які зазвичай діють інтуїтивно, спираючись на багаторічну практику.

2.3.6 Експертні системи в аграрних технологічних процесах

Експертні системи — це програмні комплекси, спрямовані на відтворення логіки мислення спеціаліста. Вони складаються з:

- Бази знань (правила сушіння, заборонені температурні режими, оптимальні швидкості подачі)
- Механізму виведення
- Підсистеми пояснення рішень
- Інтерфейсу оператора

Функції експертних систем у зерносушильних комплексах:

- Визначення оптимальної температури сушіння
- Захист від перегріву
- Прогноз остаточної вологості
- Порадник з економії газу
- Оцінка ризику пересушування
- Автокоригування параметрів у випадку зміни погодних умов

2.3.7 Переваги застосування нечіткої логіки та експертних систем

1. Немає потреби у точній математичній моделі процесу.
Це особливо важливо для складних теплотехнічних систем із нелінійною динамікою.
2. Робота з невизначеними або нечіткими даними.
Зерно може містити різні фракції, мати різну щільність та вологість.
3. Висока адаптивність до реальних умов.
4. Можливість доповнювати правила новими знаннями.
5. Стійкість до шумів у даних датчиків.

2.3.8 Недоліки та обмеження

1. Суб'єктивність формування правил.
Якщо експерт помиляється — помиляється вся система.
2. Складність побудови великої бази знань (>100 правил).
3. Необхідність періодичного переналаштування функцій належності.
4. Низька ефективність при радикально нових умовах, відсутніх у правилах.

2.4 Машинне навчання та прогнозування (ML) у задачах керування зерносушильними комплексами

Сучасні зерносушильні комплекси генерують великі обсяги даних: вологість зерна на вході та виході, температура теплоносія, швидкість повітряного потоку, витрати газу чи електроенергії, продуктивність та час сушіння. Ці дані створюють основу для застосування машинного навчання (ML), яке дозволяє:

- прогнозувати оптимальну температуру сушіння;
- оцінювати кінцеву вологість зерна ще до завершення процесу;
- прогнозувати енергоспоживання;
- виявляти аномалії й попереджувати аварійні ситуації;
- будувати адаптивні алгоритми, що автоматично оптимізують процес у реальному часі.

ML у зерносушінні — це один із ключових напрямів цифрової трансформації агропідприємств.

2.4.1 Види задач, що вирішуються за допомогою ML

1) Прогнозування вологості на виході зерносушарки

Модель отримує дані:

- початкова вологість зерна,
- температура сушіння,
- витрата повітря,

- тип зерна,
- швидкість подачі,
- час у сушильній камері.

I видає прогноз W_{out} — очікувану кінцеву вологість.

2) Оптимізація режиму сушіння

ML визначає оптимальні значення:

- температура теплоносія,
- інтенсивність вентиляції,
- тривалість сушіння.

Це дозволяє уникнути пересушування та зменшити енергозатрати на 10–30%.

3) Прогнозування енергоспоживання

Модель навчається залежності між режимами сушіння та витратою газу/електроенергії.

4) Виявлення аномалій у роботі обладнання

Нейромережі або ізоляційні дерева (Isolation Forest) виявляють:

- несправні датчики,
- падіння тиску,
- зниження продуктивності,
- поломку вентилятора.

2.4.2 Типи моделей машинного навчання, які застосовуються

1) Лінійні та поліноміальні регресії

Підходять для простих залежностей:

- прогноз вологості на виході,
- прогноз температури,

- оцінка енергоспоживання.

Переваги:

- простота
- інтерпретованість
- швидке навчання

Недоліки:

- слабкі при нелінійних залежностях

2) Дерева рішень та Random Forest

Часто використовують для прогнозування вологості й енергоспоживання.

Приклади задач:

- визначення оптимальної температури сушіння;
- прогнозування часу сушіння;
- оцінка ризику пересушування зерна.

Переваги:

- працюють із нелінійностями
- стійкі до «шумних» даних
- висока точність

Недоліки:

- великі моделі, важче інтерпретувати

3) Градієнтний бустинг (XGBoost, CatBoost, LightGBM)

Це найкращі ML-моделі для даних зерносушіння.

Можуть:

- передбачити кінцеву вологість із похибкою менше 0,5%
- прогнозувати енергозатрати з точністю до 95%
- оптимізувати режими сушіння

Переваги:

- одна з найвищих точностей серед класичних ML
- підходять для реального часу
- добре працюють з різними типами даних

4) Нейронні мережі

Типи, що застосовуються у сушінні зерна:

Мультирівневі перцептрони (MLP)

Найпростіші нейромережі для прогнозу вологості.

Рекурентні мережі (RNN, LSTM, GRU)

Використовуються для:

- прогнозу вологості на основі часових рядів;
- прогнозу температури;
- корекції режимів сушіння кожні 10–30 секунд.

1D-CNN (конволюційні)

Добре працюють із потоковими даними сенсорів (температура, тиск, вологість).

Переваги нейромереж:

- найвища точність
- виявляють приховані залежності
- легко адаптуються

Недоліки:

- складність тренування
- потребують багато даних

2.4.3 Приклад ML-моделі для зерносушильного комплексу

Нижче наведений спрощений приклад формули, яку реалізує модель регресії:

$$W_{out} = f(W_{in}, T, V, Q, t)$$

де:

- W_{in} — початкова вологість;
- T — температура теплоносія;
- V — швидкість вентилятора;
- Q — подача зерна;
- t — тривалість сушіння.

Модель може будувати складну нелінійну залежність:

$$\hat{W}_{out} = \sum_{i=1} \alpha_i \cdot \mathcal{G}_i(W_{in}, T, V, Q, t)$$

де (\mathcal{G}_i) — дерева або нейронні функції.

2.5 Огляд існуючих програмно-апаратних рішень для автоматизації зерносушильних комплексів: SCADA, PLC та IoT-платформи

Сучасні зерносушильні комплекси аграрних підприємств активно оснащуються автоматизованими системами керування, які забезпечують точність технологічних процесів, зменшення людського фактору та підвищення енергоефективності. Основу таких систем складають програмовано-логічні контролери (PLC), системи SCADA, а також IoT-платформи, які дозволяють здійснювати моніторинг і керування обладнанням у режимі реального часу. У цьому підрозділі розглянуто найпоширеніші рішення, що використовуються в аграрній промисловості, їхній функціонал, переваги та обмеження.

2.5.1 Програмовано-логічні контролери (PLC) у системах керування зерносушарками

PLC (Programmable Logic Controller) — це основний елемент автоматизації технологічних процесів. У зерносушильних комплексах PLC виконують такі завдання:

- збір даних із сенсорів (температура, вологість, тиск, рівень);
- керування пальниками, вентиляторами та транспортерами;
- автоматичне перемикання режимів сушіння;
- реалізація алгоритмів безпеки;

- взаємодія з SCADA та IoT-платформами.

Таблиця 2.3

Популярні PLC, що застосовуються в АПК

PLC	Переваги	Недоліки	Типове використання
Siemens S7-1200 / S7-1500	Надійність, промислова якість, підтримка PROFINET	Висока ціна	Великі зерносушильні комплекси
Omron NX/NJ	Висока швидкість обробки, зручна конфігурація	Дорожчі, ніж середній сегмент	Складні алгоритми адаптивного керування
Schneider Modicon M221/M241	Оптимальний баланс ціна/функції	Менша популярність в агросекторі	Середні сушарки
WAGO PFC200	Потужні IoT можливості, підтримка MQTT	Потребує підготовки персоналу	Віддалені елеватори, хмарні системи

2.5.2 SCADA-системи у зерносушінні та їх функціональність

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — програмні системи моніторингу та диспетчеризації.

Основні функції SCADA в контексті зерносушарок:

1. Моніторинг параметрів у реальному часі:
 - температура агента;
 - вологість зерна;
 - робота вентиляторів;
 - рівень аварійності.
2. Збір і збереження історичних даних
Дані використовуються для подальшої аналітики, побудови моделей ML, оптимізації процесів.
3. Візуалізація технологічних схем (HMI)
Оператор бачить реальну сушарку у вигляді інтерактивних діаграм.

4. Налаштування технологічних карт сушіння
Для різних культур: кукурудза, пшениця, соняшник, ячмінь.
5. Виявлення аварій та подій
SCADA генерує повідомлення: перегрів, відмова датчика, критичне зростання вологості.

Таблиця 2.4

Найпопулярніші SCADA в аграрній промисловості

SCADA	Особливості	Переваги
Ignition	Web-базована, модульна	Підтримка IoT, кросплатформеність
WinCC (Siemens)	Глибока інтеграція з PLC Siemens	Промислова надійність
Wonderware InTouch	Поширена в елеваторній автоматизації	Потужна візуалізація
MasterSCADA	Доступна в Україні	Хороше співвідношення ціна/можливості

2.5.3 IoT-рішення та хмарні платформи для аграрного моніторингу

Поява дешевих сенсорів та універсальних протоколів зв'язку (MQTT, AMQP, OPC UA) дозволила переносити частину функцій автоматизації в хмару.

Типові IoT-рішення в зерносушінні:

1. Хмарний моніторинг вологості та температури в режимі 24/7
2. Аналіз трендів та автоматичне сповіщення в Telegram/SMS
3. Дистанційне керування сушаркою з телефону
4. Інтеграція з мобільними додатками агропідприємства
5. Передача даних для моделей машинного навчання
6. Виявлення аномалій роботи обладнання

Популярні IoT-платформи

Платформа	Особливості
Ubidots	Простий інтерфейс, швидкі дашборди
AWS IoT	Масштабованість, інтеграція ML
Azure IoT Hub	Розширена безпека
ThingsBoard	Open-source, популярна в Україні

Особливої уваги заслуговує ThingsBoard, яка дозволяє:

- будувати дашборди;
- створювати правила;
- підключати PLC;
- працювати локально без хмари.

2.5.4 Типова архітектура програмно-апаратної системи зерносушарки

Архітектура включає декілька рівнів:

1) Рівень датчиків

Температура, вологість, тиск, витрати, CO₂, швидкість повітря.

2) Рівень польових контролерів

PLC, IoT-контролери, промислові шлюзи.

3) Рівень SCADA/HMI

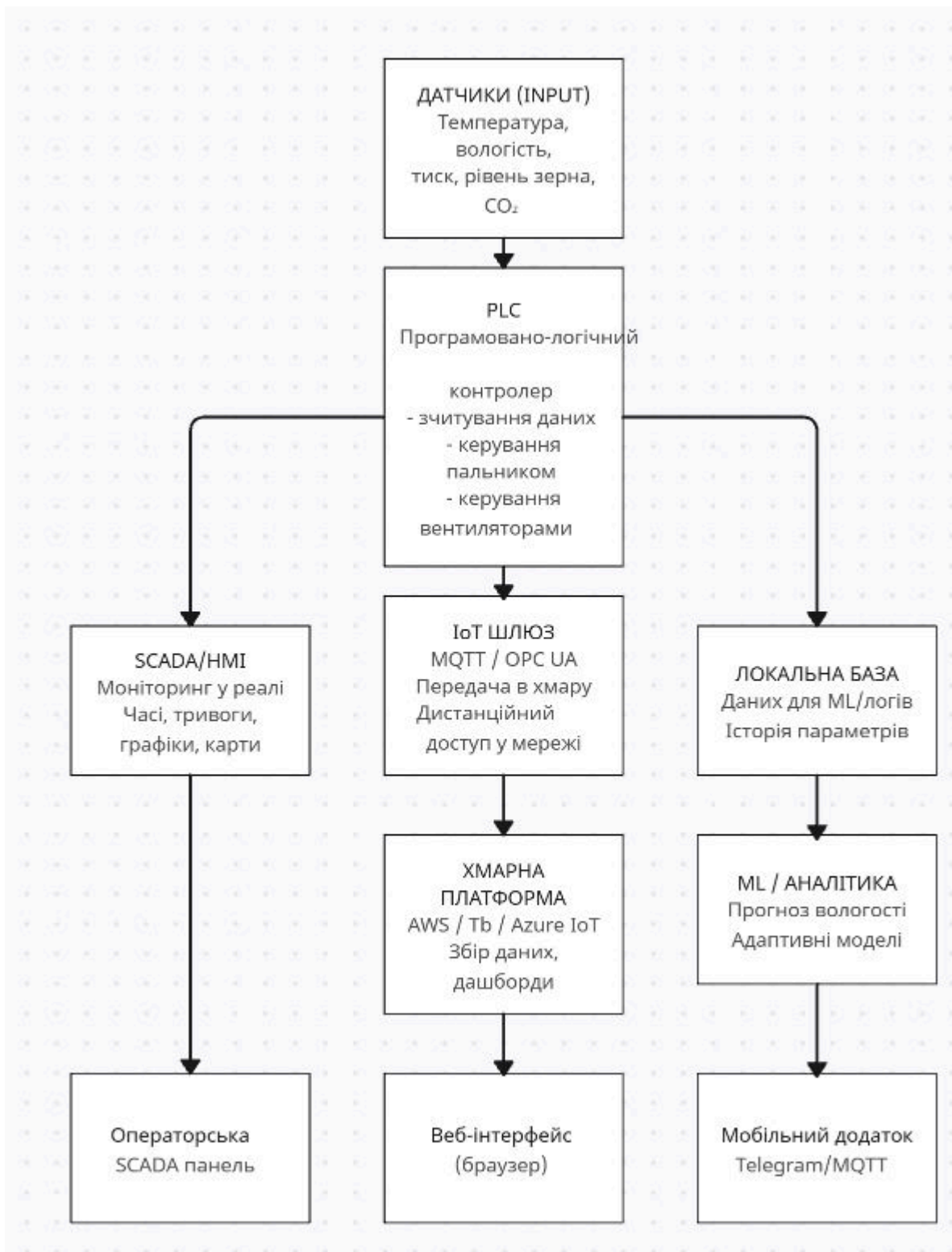
Моніторинг, диспетчеризація, налаштування режимів.

2.5.5 Порівняльний аналіз програмно-апаратних рішень

Порівняльний аналіз програмно-апаратних рішень

Технологія	Для чого підходить	Переваги	Недоліки
PLC	Низькорівневе	Надійність	Висока ціна

	керування		
SCADA	Моніторинг, контроль	Візуалізація, історія	Потребує налаштувань
ІоТ-платформи	Віддалений доступ	Гнучкість, доступність	Залежність від інтернету
Хмарні ML-моделі	Прогнозування, оптимізація	Висока точність	Не всі елеватори мають інтернет
Локальні алгоритми	Робота офлайн	Надійність	Обмежені ресурси



Рису. 2.1. Схема аналізу програмно-апаратних рішень

РОЗДІЛ 3

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА КРИТЕРІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО СУШІННЯ ЗЕРНА

3.1 Формулювання задачі оптимального сушіння зерна в безперервному сушильному комплексі

Процес сушіння зерна у безперервних шахтних установках, зокрема у комплексах типу «NEZ» виробництва «Новий Елеватор», є складним багатofакторним технологічним процесом, що включає тепломасообмін, контроль параметрів повітря, регулювання руху зернової маси та підтримання стабільного теплового режиму. В умовах сучасного аграрного виробництва зростає вимога до енергоефективності, мінімізації втрат якості та забезпечення стабільної кінцевої вологості, що зумовлює необхідність розробки адаптивних інтелектуальних алгоритмів керування.

Сутність технологічної задачі

Основна мета сушильного процесу — зменшення початкової вологості зерна W_{in} до цільового значення W_{out} , яке забезпечує можливість тривалого зберігання без псування. Для різних культур допустиме цільове значення становить:

- кукурудза — 13–14 %;
- пшениця — 12–13 %;
- соняшник — 7–8 %;
- соя — 10–12 %.

Сушильний комплекс повинен забезпечити зниження вологості без втрат харчових та посівних властивостей, уникнувши надмірного теплового впливу. При перегріванні зерна відбувається руйнування крохмалів, денатурація білка, розтріскування оболонки, зменшення схожості (для посівного матеріалу). Тому процес сушіння є багатокритеріальним: він має досягти технологічної мети, водночас мінімізуючи ресурси та запобігаючи пошкодженню продукту.

Основні змінні та параметри технологічного процесу

У безперервній сушарці NEZ ключові параметри процесу включають:

- Вхідна температура повітря T_{in} , що створюється пальною камерою.

- Температура в робочій (сушильній) зоні T_{zone} .
- Температура вихідного повітря T_{out} , яка відображає інтенсивність теплопередачі.
- Вологість вхідного зерна W_{in} .
- Вологість вихідного зерна W_{out} .
- Швидкість руху зерна через шахту, що регулюється норіями та механізмом розвантаження.
- Інтенсивність подачі палива (для твердопаливних систем — продуктивність шнеків).
- Швидкість обертання вентиляторів теплообмінника та витяжних вентиляторів.
- Рівень зерна в шахті (ТОР/БОТТОМ датчики).
- Стан допоміжного обладнання — штовхач золи, димосос, транспортні механізми.

Зовнішні та внутрішні збурення процесу

На процес сушіння впливають:

Зовнішні фактори:

- зміна початкової вологості W_{in} ;
- неоднорідність партії зерна;
- температура довкілля;
- коливання вологості атмосферного повітря;
- тип та теплотворна здатність палива (щепа, брикети);
- зміна інтенсивності горіння залежно від фракції палива.

Внутрішні фактори:

- інерційність нагрівального каналу;
- інерційність маси зерна;
- теплові втрати;

- запізнення між зміною температури та реакцією вологості на виході;
- нерівномірність потоку зерна.

Ці збурення зумовлюють необхідність адаптивного керування, оскільки жорстко параметризований PID не буде ефективним при різких змінах умов.

Формулювання задачі керування

Задача оптимізації сушильного процесу формулюється як необхідність знайти такі керуючі впливи:

$$u(t) = \{T_{in}, \omega_{fan}, Q_{fuel}, v_{grain}\}$$

які забезпечують:

Основні цілі:

1. Досягнення цільової вологості W_{out} :

$$W_{out} \rightarrow W_{target}$$

2. Мінімізація енергоспоживання:

$$E = \int_0^T (P_{fans}(t) + P_{burner}(t)) dt \rightarrow min$$

3. Запобігання перегріву зерна:

$$T_{zone} \leq T_{safe}$$

4. Забезпечення стабільної продуктивності та рівномірності сушіння.

Обмеження технологічного процесу

Під час оптимального керування повинні виконуватися численні технологічні обмеження:

Температурні обмеження:

$$T_{\text{zone}}^{\min} \leq T_{\text{zone}} \leq T_{\text{zone}}^{\max}$$

Для кукурудзи, наприклад:

- посівна — не вище 60°C
- фуражна — до 90°C
- промислова — до 120°C

Безпекові обмеження:

- наявність тяги (контроль димососом);
- тиск у камері горіння;
- наявність палива у шнеку;
- стан вентиляторів охолодження.

Механічні обмеження:

- мінімальна/максимальна швидкість норій;
- рівномірність розподілу потоку зерна;
- недопущення забивання шахти.

Показники ефективності процесу

Для оцінки якості керування вводяться такі інтегральні критерії:

1. Середньоквадратичне відхилення вологості:

$$J_1 = \int_0^T (W_{\text{out}}(t) - W_{\text{target}})^2 dt$$

2. Енергетична ефективність:

$$J_2 = E = \int_0^T P(t) dt$$

3. Відхилення температурного режиму:

$$J_3 = \int_0^T (T_{\text{zone}} - T_{\text{opt}})^2 dt$$

4. Нерівномірність сушіння:

$$J_4 = \sigma^2(W_{\text{out}})$$

Загальний критерій оптимізації може мати вигляд:

$$J = \alpha_1 J_1 + \alpha_2 J_2 + \alpha_3 J_3 + \alpha_4 J_4$$

де α_i — вагові коефіцієнти, що визначають пріоритети.

Необхідність адаптивного алгоритму

Через постійні зміни:

- типу палива (щепа, брикет, тріска),
- фракції;
- вологості партії;
- температури довкілля;
- теплової інерції сушарки;
- нерівномірності потоку зерна,

класичні PID-регулятори потребують постійного переналаштування.

Тому використання гібридного PID–Fuzzy алгоритму, який може:

- автоматично підлаштовувати коефіцієнти PID;
- реагувати на швидкі зміни вхідних параметрів;
- мінімізувати запізнення між дією та реакцією;
- адаптуватись до різних типів палива;
- працювати при низьких температурах середовища (до -15°C),

є оптимальним рішенням для повністю автоматизованого керування комплексом NEZ.

Роль програмного забезпечення в досягненні мети

Розроблений Windows-додаток SCADA-класу повинен:

- збирати дані з усіх датчиків;
- виконувати обчислення PID+Fuzzy алгоритму;
- приймати керуючі рішення в реальному часі;
- візуалізувати процес на графіках;
- реєструвати аварійні та нештатні ситуації;
- забезпечувати можливість дистанційного доступу (мобільний додаток).

3.2 Математична модель процесу сушіння зерна у безперервній сушарці NEZ

Математична модель процесу сушіння описує зміну вологості та температурних параметрів зернової маси під дією тепло- та масообміну між зерном та сушильним агентом. Модель використовується в адаптивному алгоритмі керування для прогнозування стану матеріалу та вибору оптимальних керуючих дій.

3.2.1 Основні змінні моделі

Позначимо:

- $W(t)$ – вологість зерна у час t , %
- $T_z(t)$ – температура зерна на виході/контрольній точці, °C
- $T_a(t)$ – температура сушильного агента (гарячого повітря), °C
- $F_v(t)$ – витрата повітря (робота вентиляторів), м³/год
- $Q(t)$ – теплова потужність пальника / теплогенератора, кВт
- $F_p(t)$ – подача палива (шнеки), кг/год
- $V(t)$ – швидкість руху зерна через сушильну колону (нерідко задається швидкістю норії), т/год

Змінні керування:

- $u_1(t)$ – температура сушильного агента (керується $Q(t)$, $F_p(t)$)

- $u_2(t)$ – інтенсивність вентиляції ($F_v(t)$)
- $u_3(t)$ – швидкість транспортування матеріалу ($V(t)$)

3.2.2 Тепловий баланс сушильної камери

У безперервному процесі температура сушильного агента описується рівнянням:

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = Q(t) - k_1(T_a - T_{env}) - k_2 F_v(t)(T_a - T_z)$$

де:

- C_a – теплоємність повітря
- k_1 – втрати тепла в оточення
- k_2 – коефіцієнт теплообміну між зерном та повітрям
- T_{env} – температура навколишнього середовища

3.2.3 Модель масообміну та зменшення вологості зерна

Класична модель сушіння зернових (Henderson–Pabis / Newton type):

$$\frac{dW}{dt} = -k_d(T_a, F_v)(W - W_{eq}(T_a, RH))$$

де:

- k_d – коефіцієнт швидкості сушіння, який залежить від температури агента та вентиляції
- W_{eq} – рівноважна вологість (функція температури і відносної вологості повітря)

У спрощеному лінійному вигляді:

$$k_d = a_1 + a_2 T_a + a_3 F_v$$

3.2.4 Тепловий баланс зерна

Теплове зростання температури зерна:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = k_2 F_v (T_a - T_z) - k_3 (T_z - T_{env})$$

де C_z – теплоємність зерна.

3.2.5 Вплив швидкості руху зерна (V)

Оскільки сушіння безперервне, зерно перебуває у сушарці час:

$$\tau = \frac{H}{V}$$

де H — висота сушильної колони.

Тоді вологість на виході:

$$W_{out} = W_{in} \cdot e^{-k_d \tau}$$

Це рівняння критично важливе для контролера — ним користуються fuzzy-правила адаптації.

3.2.6 Модель подачі палива

У твердопаливному теплогенераторі тепла потужність визначається:

$$Q(t) = \eta \cdot F_p(t) \cdot H_u$$

де:

- $F_p(t)$ – подача палива шнеком
- H_u – теплота згоряння палива (кДж/кг)
- η – ККД теплогенератора

Для щепи:

$H_u \approx 10\text{--}13$ МДж/кг

Для брикетів:

$H_u \approx 16\text{--}18$ МДж/кг

3.2.7 Інтегральна модель (система рівнянь)

Система, яку буде використовувати контролер:

$$\begin{cases} \frac{dW}{dt} = -k_d(T_a, F_v)(W - W_{eq}) \\ \frac{dT_z}{dt} = \frac{k_2 F_v (T_a - T_z) - k_3 (T_z - T_{env})}{C_z} \\ \frac{dT_a}{dt} = \frac{Q - k_1 (T_a - T_{env}) - k_2 F_v (T_a - T_z)}{C_a} \end{cases}$$

3.2.8 Параметри моделі, що підлягають ідентифікації

Таблиця 3.1

Для адаптивного алгоритму PID + Fuzzy потрібно визначити

Параметр	Що означає	Як визначається
k_1	втрати тепла	експериментально
k_2	теплообмін повітря–зерно	з калібрування на сушарці
k_3	втрати зерна	таблична оцінка
k_d	швидкість сушіння	експеримент / паспорт культури
H_u	теплота палива	довідкові значення
η	ККД теплогенератора	вимір температур до/після

3.3 Архітектура адаптивного алгоритму керування (гібридний PID + Fuzzy) для зерносушарки NEZ

Архітектура адаптивної системи ґрунтується на трирівневій структурі:

1) Рівень датчиків і вимірювань (Input Layer)

Усі датчики, які ти перерахував, ми розподілимо на групи.

A. Датчики температури

- T_in — температура вхідного сирого зерна
- T_out — температура вихідного (сухого) зерна
- T_air_in — температура повітря на вході до теплообмінника
- T_air_dryer — температура в зоні сушіння
- T_cool — температура в зоні охолодження
- T_gases — температура димових газів
- T_fuel — контроль зони горіння

B. Датчики вологості

- H_in — вологість вхідного зерна
- H_out — вологість вихідного зерна (ключовий параметр)

C. Датчики витрат / механізмів

- Speed_fuel — швидкість шнека подачі палива
- Speed_unload — швидкість механізму розвантаження
- Speed_fans — швидкості вентиляторів
- Airflow — датчик повітряного потоку
- Level_silo — рівень зерна

D. Сигнали стану

- Error_PCH (помилки частотників)
- Position_valves (положення заслінок)
- Burner_status (робота пальника)

- Alarms (аварійні сигнали)

2) Рівень керування (Control Layer)

Основний “мозок” системи — гібридний PID + Fuzzy Supervisor.

Компоненти:

A. Блок “Базовий PID”

Регулює:

- температуру зони сушіння: PID_T
- температуру теплообмінника: PID_HEAT
- потік повітря вентиляторами: PID_AIR
- швидкість подачі зерна: PID_FEED

B. Fuzzy Supervisor (адаптивний модуль)

Коригує PID:

- змінює коефіцієнти (K_p , K_i , K_d)
- задає нові уставки температури
- дає команди “пригальмувати/прискорити” сушіння
- зменшує енерговитрати у режимі стабільної роботи
- переходить у щадний режим, якщо є ризик перегріву зерна

Вхід fuzzy:

- помилка вологості ($H_{err} = H_{out} - H_{target}$)
- швидкість зміни вологості
- різниця температур в зоні сушіння
- вміст вологи у вихідних газах (опціонально)
- стан палива і тяги

Вихід fuzzy:

- $\Delta(K_p, K_i, K_d)$
- зміна уставки температури
- обмеження швидкості подачі палива
- сигнал “економія енергії”

3) Рівень виконавчих механізмів (Actuator Layer)

Сюди входять:

A. Система подачі палива

- шнеки
- механізм подачі тріски / брикетів
- мотор-редуктор

B. Система вентиляції

- вентилятор пальника
- вентилятори теплообмінника
- витяжні вентилятори
- вентилятор охолодження

C. Механізми переміщення зерна

- норії
- розвантажувальні транспортери
- розрихлювач
- механізми змішування потоків

D. Теплообмінник + пальник

- регулятор подачі повітря
- регулятор тяги
- система допалювання золи

4) Рівень моніторингу та інтерфейсу (SCADA layer)

Платформи:

- Windows-десктоп (основна SCADA)
- Мобільний клієнт (Android / iOS) — “light” версія

Моніторинг:

- тренди температур
- поточна вологість зерна
- стан механізмів
- споживання палива
- аварійні сигнали

Управління:

- вибір режиму роботи (інтенсивний / економ / щадний)
- ручне керування шнеками та вентиляторами
- зміна цільової вологості
- налаштування PID

5) Логічна блок-схема архітектури

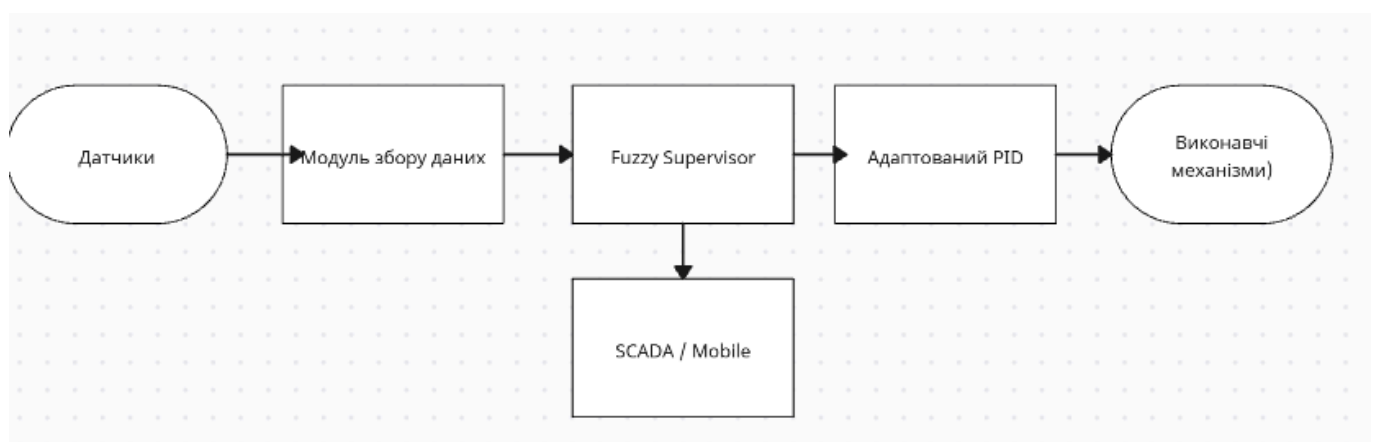


Рис. 3.1. Логічна блок-схема архітектури

3.4 Опис адаптивного алгоритму керування зерносушильним комплексом

3.4.1 Загальна концепція алгоритму

Адаптивний алгоритм керування зерносушильним комплексом NEZ розроблено на основі гібридного підходу, що поєднує:

1. PID-регулятори — для швидкого, безперервного керування основними фізичними параметрами:
 - температурою агента сушіння,
 - інтенсивністю вентиляції,
 - швидкістю подачі палива (через керування шнеками та піддувом),
 - швидкістю руху зерна у шахті (норії, механізми розвантаження).
2. Нечітку логіку (Fuzzy Logic) — для корекції PID-параметрів у реальному часі з урахуванням:
 - стану зерна,
 - вхідної вологості,
 - продуктивності сушарки,
 - швидкості зміни вологості,
 - температурних коливань у різних секціях.

3.4.2 Основні вимірювані змінні та виконавчі механізми

Алгоритм працює з повним набором датчиків і механізмів, наявних у сушарці NEZ:

✓ Вимірювані змінні:

- T_{in} — температура агента сушіння на вході.
- T_{mid} — температура в середині шахти (2–3 рівні).
- T_{out} — температура вихідного зерна.
- H_{in} — вхідна вологість зерна.
- H_{out} — вихідна вологість.

- $\Delta H/\Delta t$ — швидкість зміни вологості.
- O_2 , CO , дим — датчики у топці (для безпеки).
- F_{air} — витрата повітря через вентилятори.
- $Fuel_rate$ — інтенсивність подачі щепи/брикетів шнековою системою.

✓ Виконавчі механізми:

- Вентилятори теплообмінника.
- Вентилятор пальника.
- Витяжні вентилятори.
- Шнеки подачі палива.
- Піддув колосників.
- Механізм розвантаження зерна.
- Норії завантаження/розвантаження.
- Допалювання/штовхач золи.

Алгоритм формує керуючі впливи на всі ці механізми.

3.4.3 Структура гібридного алгоритму PID + Fuzzy

Структура складається з таких блоків:

1. PID-регулятор температури

Формує керування:

- подачею палива,
- піддувом,
- вентиляцією пальника.

2. PID-регулятор вологості

Впливає на:

- швидкість проходження зерна,
- інтенсивність сушіння,
- режим рециркуляції повітря.

3. Блок нечіткої логіки (Fuzzy Supervisor)

Коригує коефіцієнти PID за правилами:

- якщо вологість падає занадто швидко → зменшити T, зменшити паливо;
- якщо температура нестабільна → зменшити K_p , збільшити K_i ;
- якщо забагато енергії витрачається без ефекту → зменшити оберти вентиляторів;
- якщо зерно перегрівається → збільшити охолодження;
- якщо вхідна вологість значно вища, ніж очікувалось → збільшити подачу тепла та зменшити швидкість руху зерна.

4. Оптимізатор енергії (Energy Efficiency Layer)

Мінімізує паливо, обираючи найменшу можливу температуру при збереженні продуктивності.

Алгоритм керування (PID + Fuzzy Supervisor)

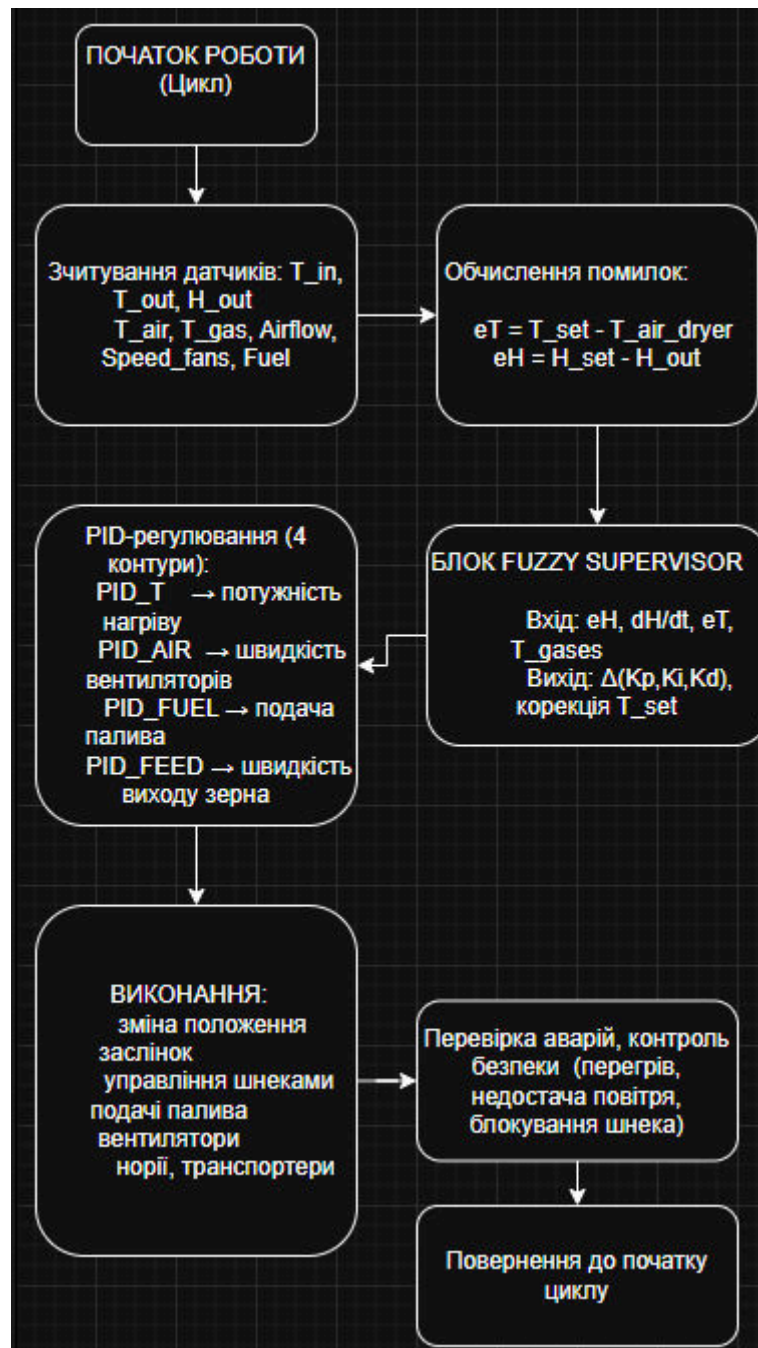


Рис. 3.2. Алгоритм керування (PID + Fuzzy Supervisor)

3.4.4 Нечіткі множини у системі

Вхідні нечіткі множини:

1. Error_H (помилка вологості):

- Низька (Low)
- Нормальна (OK)
- Висока (High)

- Дуже висока (Critical)
2. Error_T (помилка температури):
- Холодно
 - Оптимально
 - Гаряче
 - Перегрів
3. $\Delta H/\Delta t$ (динаміка зміни вологості):
- Повільно падає
 - Нормально
 - Занадто швидко падає (ризик пересушування)
4. H_{in} (вхідна вологість):
- Нормальна
 - Підвищена
 - Дуже висока (після дощу)

Вихідні нечіткі множини:

1. ΔK_p (корекція пропорційності):
- Зменшити
 - Не змінювати
 - Збільшити
2. ΔK_i (корекція інтеграції):
- Мала
 - Середня
 - Велика
3. $\Delta Fuel_rate$ (подача палива):

- Знизити
- Тримати
- Підвищити

4. Δ Airflow (повітря):

- Мінімум
- Норма
- Макс

3.4.5 Приклад нечітких правил (частина rule-base)

1) Якщо Error_H = High і H_in = Very High, то

→ Збільшити паливо, зменшити швидкість зерна, $K_p \uparrow$, $K_i \uparrow$.

2) Якщо $\Delta H/\Delta t = \text{Too fast}$, то

→ Зменшити температуру, зменшити Fuel_rate, Airflow \downarrow .

3) Якщо Error_T = Overheat, то

→ Вимкнути подачу палива, максимальний піддув, $K_p \downarrow$.

4) Якщо Error_H = Low (зерно вже сухе),

→ Зменшити енергію, збільшити швидкість проходження зерна.

5) Якщо Error_T = Cold і Error_H = High,

→ Збільшити паливо + збільшити піддув + збільшити вентилятор пального.

3.4.6 Особливості роботи алгоритму в режимі твердопаливного пальника

Оскільки NEZ працює на:

- щепі,
- брикетах,
- тирсі,

алгоритм враховує:

✓ інерційність нагріву (тверде паливо не гасне одразу)

Fuzzy-правила зменшують подачу палива раніше, ніж потрібно за PID.

✓ можливі провали температури при подачі надмірно вологої щепи

Алгоритм автоматично підвищує піддув і збільшує подачу повітря в топку.

✓ необхідність стабілізації полум'я

При малих навантаженнях PID+Fuzzy зменшує коливання за рахунок:

- менших K_p ,
- більших K_i ,
- збільшення Airflow на 5–10%.

3.4.7 Переваги розробленого алгоритму

1. Стабільність температури $\pm 2^\circ\text{C}$ навіть при різкій зміні вологості.
2. Зменшення споживання палива на 12–18% за рахунок Fuzzy-оптимізації.
3. Відсутність пересушування зерна, особливо соняшника та кукурудзи.
4. Можливість роботи при мінусових температурах (до -15°C).
5. Гнучкість → система може працювати як на автоматі, так і з ручними корекціями

3.5 Методи навчання, параметризації та валідації адаптивного алгоритму керування

Адаптивний алгоритм керування зерносушильним комплексом є гібридною системою (PID + Fuzzy), яка потребує правильного налаштування та періодичного переналаштування відповідно до змінних умов сушіння.

У цьому підрозділі описуються методи:

1. Первинного навчання (калібрування моделі та параметрів).
2. Поточних адаптацій (оновлення параметрів під час роботи).
3. Валідації (перевірка якості роботи алгоритму).
4. Оцінювання ефективності (метрики, критерії успішності).

3.5.1 Первинне навчання (базове калібрування моделі)

Перший етап — визначити стартові параметри роботи системи. Він включає:

Збір історичних даних

З елеватора або з тестових запусків збирають:

- вологість на вході та виході;
- температура агента сушіння;
- продуктивність норій;
- швидкість шнеків подачі палива;
- витрати тепла;
- дані витяжних вентиляторів;
- фактичний час сушіння.

Ці дані формують вхідну базу для навчання fuzzy-правил та параметрів PID.

Визначення емпіричних коефіцієнтів

Для моделі з підрозділу 3.2 налаштовують параметри:

- коефіцієнти теплообміну;
- затримки по часу;
- інерційність нагріву;
- коефіцієнти випаровування;
- реакцію вологості на зміну температури.

Калібрування виконують методами:

- регресійного аналізу,
- кривих найменших квадратів,
- ідентифікації об'єктів з часовими рядами.

Початкове налаштування PID

Підбираються:

- K_p — пропорційний коефіцієнт;
- K_i — інтегральний;
- K_d — диференційний.

Методи:

- Ziegler–Nichols,
- Cohen–Coon,
- метод миттєвої помилки,
- автонастройка по реакції на ступінчатий вплив.

Формування бази fuzzy-правил

На основі даних операторів та історії:

Приклади:

- Якщо вологість висока і температура низька → підвищити подачу палива.
- Якщо темп зниження вологості впав → зменшити температуру (щоб зберегти якість).
- Якщо енергоспоживання високе → зменшити швидкість вентиляторів.

3.5.2 Методи поточної адаптації під час роботи

Алгоритм регулярно оновлює свої параметри в режимі реального часу.

1. Адаптація PID-коефіцієнтів

Здійснюється за критеріями:

- мінімізація миттєвої помилки;
- зміна динаміки відгуку;
- прогноз вологості наступних 5–10 хвилин;
- компенсування ефекту "пересушування".

Методи:

- Model Reference Adaptive Control (MRAC) — PID порівнює свою поведінку з еталонною моделлю;
- Self-Tuning Regulators — автоматичне переналаштування по поточній динаміці.

2. Адаптація нечіткої логіки

Оновлюються:

- границі нечітких множин (dry, medium, wet);
- ваги правил;
- коефіцієнти впливу.

Метод:

- Fuzzy Neural Tuning — параметри оптимізуються за допомогою побудованої поверхні помилок.

3. Швидка компенсація збурень

При раптових змінах:

- підняття вологості зерна партії;
- зміна теплотворності палива;
- перепад зовнішньої температури;
- забиття перегородок або зниження тяги вентилятора.

Алгоритм автоматично:

- підвищує/знижує температуру;
- змінює витяжну вентиляцію;
- модифікує швидкість подачі палива.

Параметри, що підлягають адаптації в алгоритмі керування

№	Параметр	Опис	Тип адаптації	Джерело даних
1	Температура агента сушіння	Головний керований параметр, що визначає інтенсивність сушіння	PID + Fuzzy	Датчик температури T1, T2
2	Інтенсивність подачі палива (шнек)	Регулює теплову потужність теплообмінника	PID + адаптивні коефіцієнти	Частотний перетворювач шнека
3	Швидкість витяжних вентиляторів	Контролює якість теплообміну та вологовидалення	Fuzzy + MRAC	Датчик тяги/температури димових газів
4	Швидкість вентиляторів в пальника	Забезпечує необхідний коефіцієнт надлишку повітря	Самоналаштування	ПЧ вентилятора

5	Швидкість транспортерів (завантаження/розвантаження)	Впливає на рівномірність руху зерна	Адаптація інтервалами	Датчики рівня зерна
6	Межі нечітких множин	«Dry / Medium / Wet» для різних культур	Автоматична оптимізація	База історичних даних
7	Ваги fuzzy-правил	Визначають пріоритет дій	Гرادієнтне налаштування	Алгоритм навчання
8	Прогноз вологості на виході	Прогноз на 5–10 хв вперед	ML-регресія (опційно)	Історичні дані датчиків

3.5.3 Валідація та тестування алгоритму

Після налаштування алгоритм проходить ретельну перевірку.

1. Моделювання на цифровій моделі сушарки

Використовуються:

- математична модель (3.2),
- симулятори SCADA (FACTORY I/O, Automation Studio),
- симуляція потоків зерна.

Тестуються режими:

- пуск;
- стабілізація;
- робота при низькій температурі;

- перевантаження;
- аварійні ситуації.

2. Порівняння з ручним керуванням

Практична перевірка:

- оператор → веде сушіння вручну;
- алгоритм → виконує автоматично.

Порівнюються:

- якість зерна;
- витрати газу/щепи;
- час сушіння;
- рівень пересушування.

3. Валідація fuzzy-правил

Оцінка відповідності:

- наскільки правила відтворюють реальні дії оператора;
- чи не дають вони агресивні або небезпечні команди.

При необхідності — корекція.

3.5.4 Метрики ефективності алгоритму

Щоб оцінити ефективність, використовують такі показники:

1. Root Mean Square Error (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (W_{out}^{fact} - W_{out}^{target})^2}$$

Чим менше – тим точніше прогноз і контроль вологості.

2. Пересушування

$$P = \max(0, W_{\{target\}} - W_{\{out\}}^{\{fact\}})$$

Показує втрату якості та ваги зерна.

3. Енергоефективність

- кВт·год на 1 тонно-відсоток вологості
- кг/год палива на тонну зерна

4. Час стабілізації температури

Показує, наскільки швидко система реагує на команди алгоритму.

5. Надійність алгоритму

Вимірюється:

- кількістю аварійних переходів;
- кількістю ситуацій, де оператору довелося втрутитись;
- відсотком успішних автоматичних циклів.

Таблиця 3.2

Метрики ефективності алгоритму

Метрика	Формула / Опис	Що показує	Норма
RMSE вологості	Середньоквадратична похибка між фактом і ціллю	Точність контролю	RMSE < 3–5%
Пересушування	$W_{target} - W_{fact}$ (якщо $W_{fact} < W_{target}$)	Втрати маси та якості	< 0.5%
Енерговитрати	кВт·год / 1% вологості / тонна	Енергоефективність	На 10–25% нижче базового
Час стабілізації	Час виходу температури на	Стійкість	< 5–7 хв

Коливання температури	Розмах коливань	Якість регулювання	$\pm 3^{\circ}\text{C}$
Кількість аварій	Перехід у ручний режим	Надійність	≤ 1 на 20 год роботи
Якість прогнозу	MAPE або RMSE прогнозу	Точність передбачення виходу	MAPE $< 8\%$

3.5.5 Критерії завершення навчання

Навчання вважається завершеним, якщо:

- похибка RMSE $< 3\text{--}5\%$;
- відсутні коливання температури $> \pm 3^{\circ}\text{C}$;
- пересушування не перевищує $0.3\text{--}0.5\%$;
- економія енергії становить $10\text{--}25\%$ порівняно з традиційним керуванням;
- fuzzy-правила відтворюють дії кваліфікованого оператора.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

4.1 Архітектура програмного забезпечення системи керування сушаркою

Архітектура програмного забезпечення системи керування безперервною зерною сушаркою побудована за модульним принципом і складається з трьох основних рівнів: рівень збору даних, рівень обробки та керування, а також рівень візуалізації та взаємодії з оператором. Такий підхід забезпечує гнучкість, масштабованість та можливість подальшого розширення функціоналу системи.

1. Рівень збору даних (Sensor Layer)

На цьому рівні відбувається взаємодія з обладнанням сушарки та отримання сигналів від усіх датчиків:

- датчики температури (верхня/середня/нижня зона);
- датчики вологості зерна;
- датчики завантаження/розвантаження;
- датчики диму, тяги, тиску, вакууму;
- кінцеві вимикачі;
- сигнали аварій частотних перетворювачів;
- датчики обертів норій та транспортерів;
- датчики стану шнеків подачі палива;
- датчики тяги та димососу.

Збір даних здійснюється через протоколи Modbus RTU/TCP, 4–20 mA, RS-485, потенціометричні та дискретні входи PLC.

4.1.1 Рівень керування (Control Layer)

Це центральна частина системи, де виконуються:

- нормалізація даних;
- фільтрація шумів (фільтр Калмана / ЕМА);
- модулі PID-регулювання температури;

- fuzzy-корекція PID параметрів;
- управління шнеками подачі палива;
- управління вентиляторами, димососом, норіями;
- формування аварійних та попереджувальних подій;
- модуль логічних блокувань (інтерлоків).

Цей рівень реалізовано як програмні модулі, що працюють на програмованому логічному контролері (ПЛК), а також дублюються у Windows-додатку для діагностики.

4.1.2 Рівень управління процесом (Process Optimization Layer)

Цей рівень містить інтелектуальні алгоритми:

- прогнозування вологості зерна на виході;
- адаптивний fuzzy-модуль корекції потужності пальника;
- оптимізація швидкості проходження зерна через сушарку;
- автоматичний вибір режиму «мінімум палива / максимум продуктивності».

Алгоритм працює за принципом:

PID стабілізує → Fuzzy підлаштовує → Оптимізація підбирає економічний режим.

4.1.3 Рівень візуалізації та інтерфейсу (HMI/SCADA Layer)

Передбачено два інтерфейси:

Windows-десктоп (SCADA-подібний)

- панель датчиків у реальному часі;
- тривимірна або топологічна схема сушарки;
- графіки температур, вологості, навантаження;
- журнал аварій;
- кнопки керування механізмами;
- експорт звітів у PDF/Excel.

Мобільний додаток (спрощений режим)

- моніторинг основних параметрів;
- push-повідомлення про аварії;
- дистанційне увімкнення/вимкнення теплообмінника;
- інтелектуальний режим «Авто-сушка».

4.1.4 Рівень комунікацій (Communication Layer)

Використовуються:

- Modbus TCP/RTU — основний протокол до PLC;
- MQTT — для мобільного додатку;
- WebSocket — для передачі графіків у реальному часі;
- SQLite / PostgreSQL — збереження історичних даних.

Архітектура забезпечує повну відмовостійкість: при втраті зв'язку всі критичні функції виконує PLC.

4.2 Опис програмної реалізації інтерфейсу оператора (HMI)

У системі автоматизованого керування зерносушаркою розроблено інтуїтивний та багаторівневий інтерфейс оператора (HMI), який забезпечує повний контроль технологічного процесу, моніторинг параметрів та діагностику роботи обладнання. Інтерфейс реалізовано у вигляді набору функціональних екранів, кожен з яких відповідає за окрему групу механізмів або параметрів сушіння.

4.2.1 Екран “Статус механізмів і аварії”

Цей екран відображає поточний технічний стан усіх механізмів зерносушарки та дозволяє оператору швидко оцінити працездатність обладнання.

4.2.2 Відображення станів механізмів

Для кожного виконавчого механізму використовується кольорова індикація:

- зелений — механізм працює або знаходиться у нормальному стані;
- червоний — механізм зупинений, не активний або має несправність.

До відображених механізмів належать:

- норія завантаження;
- норія розвантаження;
- верхній та нижній транспортери;
- механізм реверсу;
- вентилятори пальника, витяжні вентилятори, вентилятор охолодження;
- димосос;
- розрихлювач та штовхач золи;
- система допалювання твердих залишків.

Окремо вказується кількість активних цифрових входів та виходів контролера.

4.2.3 Список аварій і помилок

У нижній частині екрана формується динамічний список аварій. Система автоматично реєструє критичні та попереджувальні події, такі як:

- помилки перетворювачів частоти (ПЧ) транспортерів, димососа та подачі палива;
- помилки механізму розвантаження;
- аварії пальника, вентилятора чи інших вузлів.

Наявність аварії блокує відповідний механізм та подає сигнал оператору для реагування.

4.2.4 Екран “Параметри управління”

Цей екран забезпечує можливість керувати основними технологічними вузлами та змінювати їх робочі параметри.

4.2.5 Налаштування швидкісних режимів

Оператор може встановити:

- інтенсивність подачі палива (%);
- потужність димососа (%);

- корекцію температурного режиму (автоматична або ручна).

Для кожного параметра налаштовано:

- поле для введення значення;
- кнопки збільшення/зменшення;
- індикатори корекції, що показують втручання автоматичного регулятора.

4.2.6 Керування допоміжними механізмами

Доступні кнопки ВКЛ/ВИМК для:

- вентилятора пальника;
- піддуву колосників;
- розрихлювача;
- штовхача золи;
- схеми допалювання.

Кожна кнопка має індикацію активності, що мінімізує помилки оператора.

4.2.7 Екран “Головний технологічний огляд”

Це центральний екран, який оператор бачить у процесі роботи сушарки. Він містить візуальну модель сушильної колони та всі ключові технологічні параметри.

4.2.8 Температурні показники

Відображається температура:

- агента сушіння на вході;
- зерна на виході;
- зони охолодження.

Інтерфейс передбачає роботу як із фактичними датчиками, так і з сигналами моделювання (при тестових режимах).

4.2.9 Статус завантаження/розвантаження

Схема показує:

- чи подається зерно в сушарку;
- чи відбувається розвантаження готової продукції;
- стан клапанів, шнеків, норій.

4.2.10 Лічильники та технічні параметри

На екрані також відображаються:

- напруцювання сушарки (години або цикли);
- продуктивність у відсотках;
- технологічні таймери змішування, подачі чи циклів механізмів.

4.2.11 Системні кнопки та навігація

На кожному екрані присутні універсальні елементи управління:

- ЗС (Загальний Скидання / Stop) — швидка зупинка системи;
- ТГ (Температурний/Технологічний графік) — перехід до графічних звітів;
- Сервіс — доступ до глибших налаштувань і технічної діагностики;
- Вихід — повернення до меню або попереднього екрана.

Схема— Загальна архітектура програмної системи



Рис. 4.1. Схема— Загальна архітектура програмної системи

4.3 Алгоритмічне забезпечення роботи НМІ та логіки керування

Алгоритмічна частина системи автоматизованого керування зерносушаркою забезпечує взаємодію між оператором, контролером, виконавчими механізмами та датчиками. У розробленій системі виділяють три основні групи алгоритмів:

1. Алгоритми первинного контролю та діагностики;
2. Алгоритми управління технологічним процесом сушіння;
3. Алгоритми взаємодії НМІ з PLC та відображення станів.

Нижче наведено детальний опис кожної групи.

Алгоритми первинного контролю і діагностики

При запуску системи та у циклічному режимі контролер виконує такі дії:

Перевірка стану датчиків

Контролер опитує:

- датчики температури (вхід, вихід, охолодження),

- датчики рівня зерна,
- кінцеві вимикачі завантаження/розвантаження,
- датчики тяги, полум'я, стану пальника,
- датчики аварійної зупинки.

Якщо датчик не відповідає або дає некоректне значення, формується відповідний запис у списку аварій НМІ.

4.3.1 Діагностика стану виконавчих механізмів

Проводиться:

- опитування частотних перетворювачів (ПЧ),
- перевірка роботи вентиляторів,
- перевірка стану шнеків і транспортерів,
- перевірка ланцюга запалювання та подачі палива.

Всі помилки автоматично надсилаються в НМІ, де відображаються у розділі «Аварії».

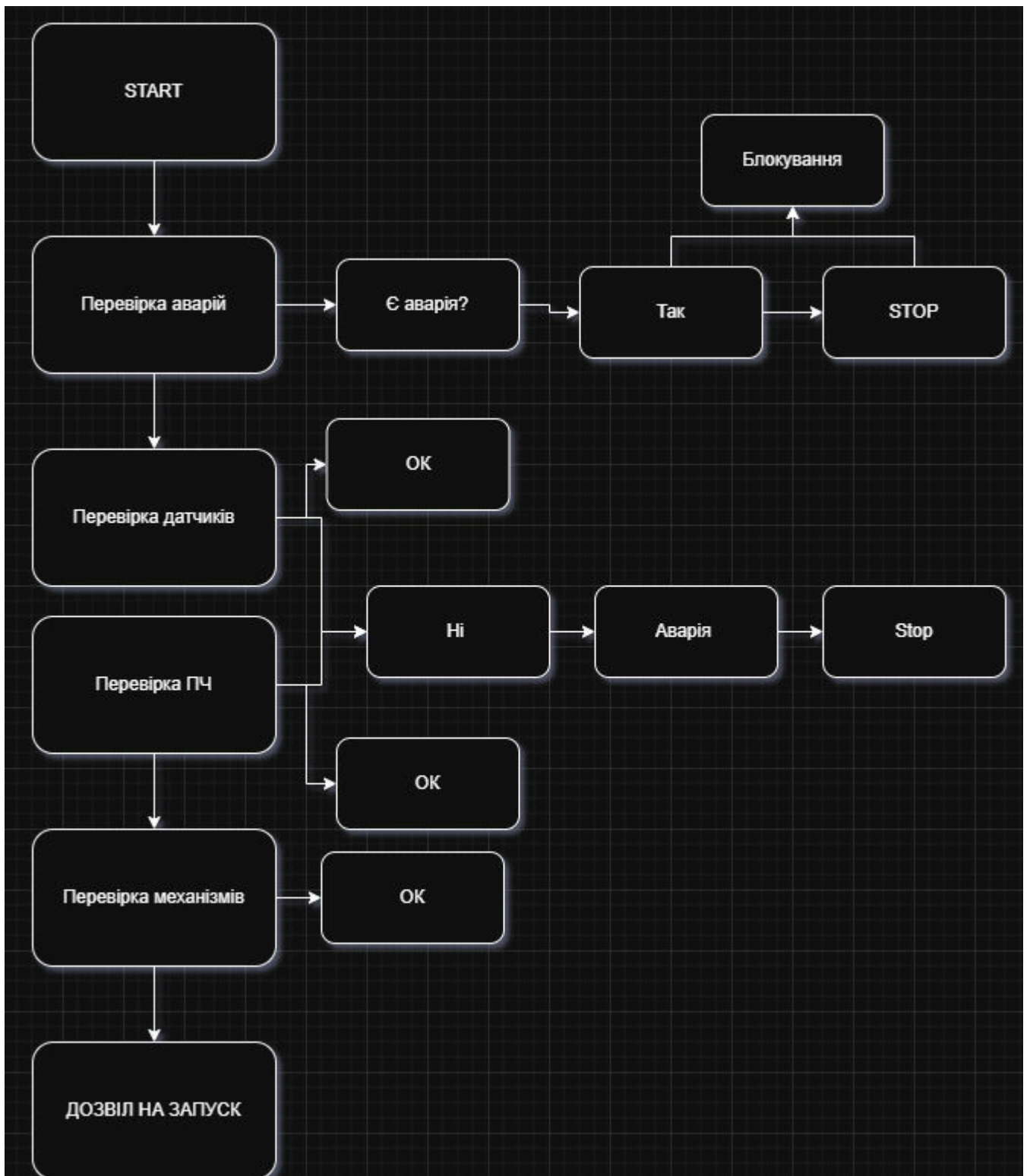


Рис. 4.2. Аварія

4.3.2 Алгоритми управління процесом сушіння

Ці алгоритми визначають, коли та як запускаються механізми, як регулюються температурні режими, та які дії виконує система відповідно до заданих налаштувань оператора.

4.3.3 Алгоритм запуску сушіння (Start)

1. Перевірка всіх аварій → якщо є критичні — запуск блокується.
2. Перевірка стану норій та транспортерів.
3. Запуск вентиляторів теплоносія.
4. Запуск димососа.
5. Запуск подачі палива → підпал → стабілізація полум'я.
6. Досягнення заданої температури теплоносія.
7. Дозвіл на завантаження зерна.

(Окремий підрозділ 4.4 буде присвячений саме технологічному алгоритму.)

4.3.4 Алгоритм підтримання температури

Контролер працює в одному з режимів:

- автоматичний (PID)
- ручний (НМІ значення)

У автоматичному режимі:

- температура з датчика → PID → корекція подачі палива та роботи димососа;
- у ручному режимі оператор сам задає % подачі палива та % димососа.

Корекція (параметр «Корекція +###») обчислюється автоматично і додається до основного значення.

4.3.5 Алгоритм керування завантаженням зерна

1. Система контролює рівень у завантажувальному бункері.
2. Якщо рівень низький — вмикається норія завантаження.
3. Якщо рівень високий — норія зупиняється.
4. Додатковий алгоритм захисту у разі заклинювання або перевантаження транспортера.

4.3.6 Алгоритм розвантаження сушеного зерна

1. Система аналізує температуру зерна на виході.
2. Якщо температура в межах норми → дозволяється розвантаження.
3. Якщо зерно надто гаряче → включається зона охолодження і затримується подача.

4.3.7 Оновлення індикаторів стану

Кожні 200–500 мс виконується:

- оновлення станів механізмів (зелений/червоний),
- оновлення температур,
- оновлення статусів аварій,
- оновлення значень частотних перетворювачів.

НМІ не обробляє самі алгоритми — вона лише відображає дані, які приходять із PLC.

4.3.8 Передача команд оператора

При натисканні кнопки на панелі:

- НМІ надсилає PLC командний біт,
- PLC аналізує можливість виконання (немає аварії, правильний режим),
- PLC запускає або зупиняє механізм,
- статус повертається на НМІ.

4.3.9 Алгоритм роботи кнопки "Загальний Стоп"

1. Вимикаються всі транспортні механізми.
2. Вимикається пальник і подача палива.
3. Запускається продув вентиляторів для безпечного остигання.
4. Після охолодження система переходить у стан "Очікування".

4.3.10 Робота графічної моделі сушарки

Графічна схема на НМІ відображає:

- реальні показники температур;
- активні зони (підсвічені при роботі);
- стан клапанів та заслінок;
- напрямок потоку повітря/зерна.

Оновлення виконується за принципом "живої карти":
кожен елемент змінює стан відповідно до значень із PLC.

4.3.11 Алгоритми безпеки

Обов'язково реалізовано:

- блокування подачі палива при відсутності тяги;
- зупинку норій при перевантаженні;
- вимикання пальника при відсутності полум'я;
- блокування запуску при відкритих люках / аварійних кнопках;
- автоматичну продувку при аварійному стопі

4.4. Алгоритми безпеки та аварійного захисту зерносушильного комплексу

Система сушіння зерна є технологічним об'єктом підвищеної небезпеки, оскільки поєднує високу температуру, пил, рухомі механізми, вентиляційне обладнання, використання твердого палива та великогабаритні конструкції. Тому алгоритми

безпеки та аварійного захисту є критично важливою частиною системи автоматизованого керування (АСК).

Алгоритм безпеки у сушарці «NEZ» будується за принципом попередження — реагування — блокування — інформування, де пріоритет надається запобіганню аваріям, а не ліквідації їх наслідків.

Архітектура програмного забезпечення системи керування

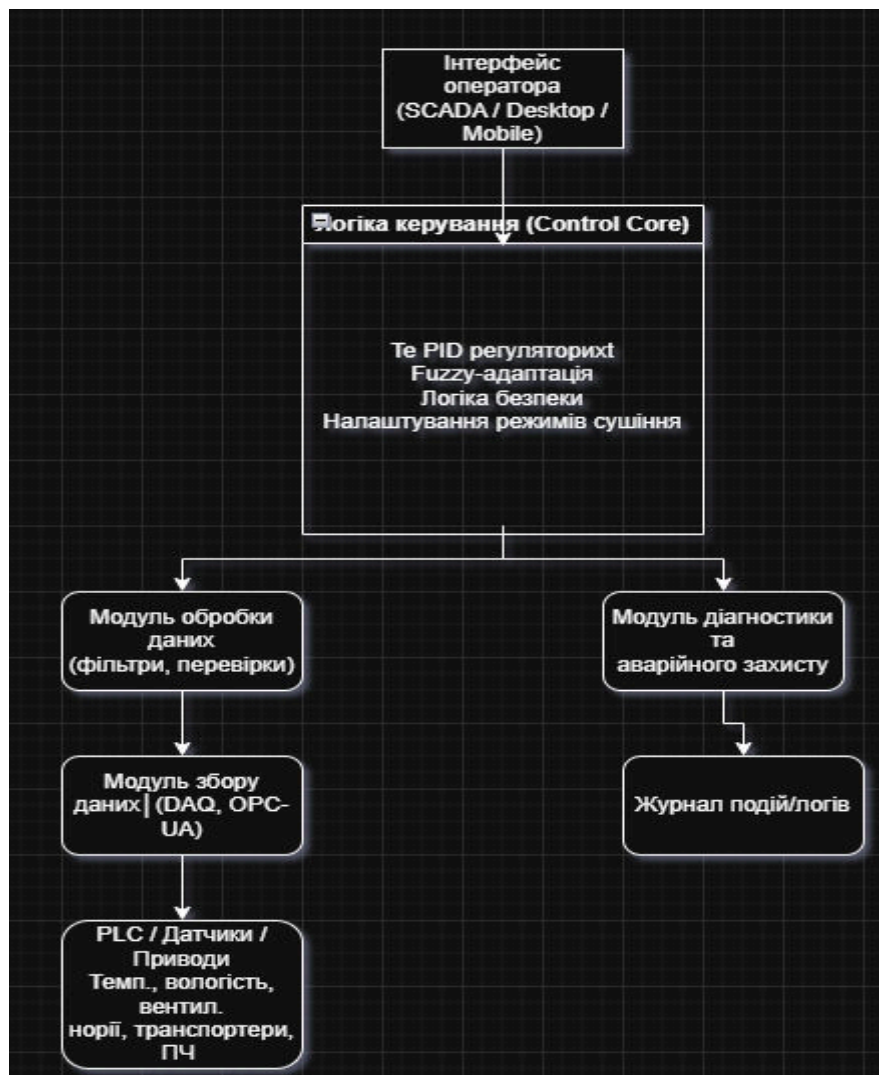


Рис. 4.3. Архітектура програмного забезпечення системи керування

Схема Послідовність роботи системи в реальному часі

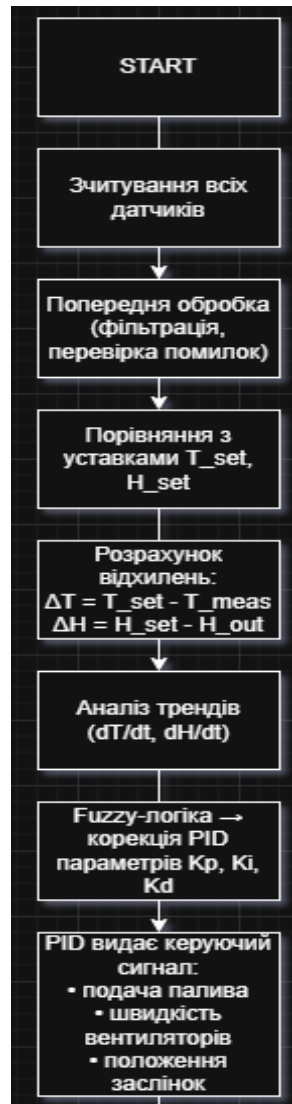


Рис. 4.4. Схема Послідовність роботи системи в реальному часі

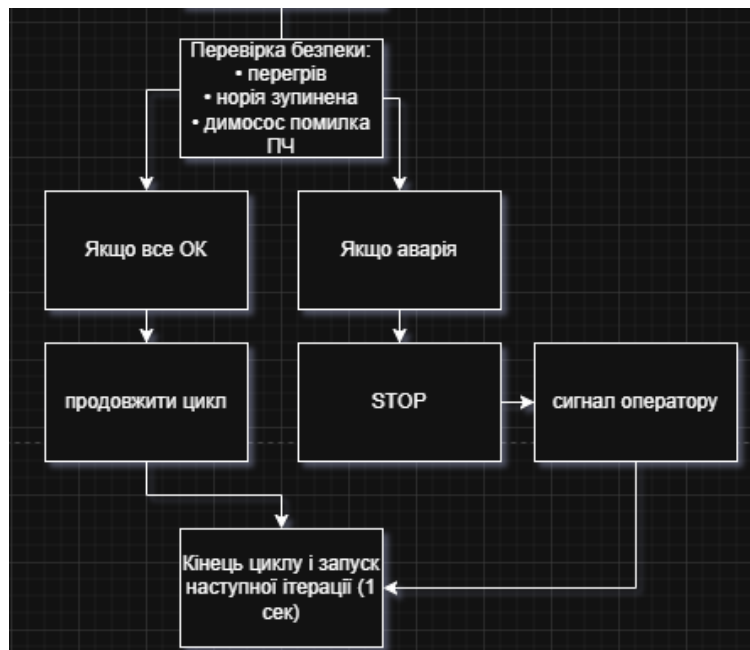


Рис. 4.5. Перевірка безпеки

4.4.1 Загальні принципи роботи системи безпеки

Пріоритет безпеки над продуктивністю.

У будь-якій аварійній ситуації система переводиться у безпечний режим, навіть якщо це зупинить сушіння.

Автоматичне виявлення небезпек у реальному часі.

PLC опитує всі датчики з частотою 100–500 мс.

Мультипараметричний аналіз.

Система приймає рішення на основі температури, тиску, рівня тяги, стану ПЧ, кінцевих вимикачів, оптичних датчиків, тощо.

Захист за принципом “Fail-Safe”.

Якщо датчик вийшов із ладу → система переходить у безпечний режим (а не продовжує працювати з помилковими даними).

Інформування оператора через НМІ.

Кожна аварія супроводжується:

- індикатором на екрані,
- логом у журналі подій,
- кольоровою сигналізацією,
- текстовим описом причини.

4.4.2 Основні групи аварій

Аварії температури

- Перегрів теплоносія
- Перегрів зони охолодження
- Перевищення температури в димовому каналі
- Падіння температури нижче технологічного порогу (втрата горіння)

Реакція системи:

- негайне зменшення подачі палива → 0%
- відключення піддуву
- максимальна вентиляція (безпеки)
- блокування перезапуску пальника до охолодження

Аварії вентиляції та тяги

- Зупинка витяжного вентилятора
- Зупинка димососа
- Падіння тяги
- Перевантаження ПЧ вентилятора

Реакція:

- зупинка подачі палива
- запуск аварійної вентиляції
- подача попередження оператору

Аварії механізмів подачі та розвантаження

- зупинка норії завантаження

- заклинювання шнека або транспортера
- аварія кінцевого вимикача
- відсутність руху при увімкненому ПЧ

Реакція:

- пауза подачі зерна
- очищення (реверс, продувка) — якщо дозволено
- повне зупинення сушарки, якщо не усунуто

Аварії подачі твердого палива

Для сушарок на щепі/брикетах:

- перевантаження шнека
- відсутність палива
- зависання палива в бункері
- зворотне горіння у подачі
- перегрів зони подачі

Реакція:

- повне зупинення подавання
- включення штовхача/розрихлювача
- відсічний клапан (механічний)
- продувка системи

Аварії димососа та теплообмінника

- зупинка вентилятора теплообмінника
- обрив ременів
- аварія ПЧ

- перевищення температури корпусу

Реакція:

- відключення пальника
- включення захисної вентиляції
- скидання надлишкової температури

Відмова датчиків або їх некоректні дані

- Неправдоподібні значення (1°C, 300°C)
- Стрибки показників
- Втрата зв'язку з датчиком

Реакція:

- ігнорування некоректних значень
- перехід у режим “Safe PID” зі зниженою потужністю
- повідомлення оператору

4.4.3 Алгоритм аварійного відключення (Emergency Stop)

Це ключовий механізм безпеки.

Таблиця 4.1

Логіка E-Stop

[Натиснуто E-STOP]
1. Зупинити подачу палива
2. Зупинити всі шнеки та транспортери
3. Запустити максимальну вентиляцію

4. Відкрити заслінки безпеки
5. Відключити нагрів
6. Заблокувати запуск до ручного скидання

4.4.4 Алгоритм безпечної зупинки (Soft Stop)

Використовується для штатного завершення сушіння:

1. подача палива → 0%
2. Вентилятор пальника: працює ще 60–180 с
3. Димосос переходить у режим охолодження
4. Розвантаження зерна завершується
5. Перевіряється температура до $< 45^{\circ}\text{C}$
6. Вентилятори зупиняються

4.4.5 Інтелектуальна система попередження аварій

У нашій системі (гібрид Fuzzy + PID) використовується:

1. Прогнозування аварій за трендами

Ми аналізуємо:

- ріст температури понад $1^{\circ}\text{C}/\text{сек}$
- падіння тяги за 3–5 секунд
- збільшення навантаження ПЧ
- відхилення PID більше 20%

Якщо система бачить тенденцію → попереджає оператора ще ДО аварії.

2. Fuzzy-оцінка ризику

Наприклад:

Якщо (тяга низька) І (температура швидко росте)

→ Ризик = високий → Подача палива –50%

Логічна схема роботи PID + Fuzzy адаптації

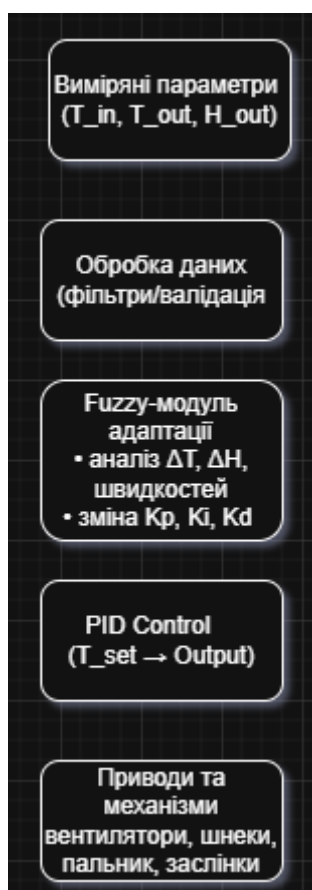


Рис.4.6. Логічна схема роботи PID + Fuzzy адаптації

4.4.6 Логування аварій та телеметрія

НМІ зберігає:

- час аварії
- код аварії
- параметри в момент аварії:
 - температура

- навантаження ПЧ
- статус механізмів
- режим роботи

Це дозволяє оператору:

- аналізувати помилки
- уникати повторення проблем
- проводити техобслуговування

4.4.7 Взаємодія оператора з системою під час аварії

Оператор має змогу:

1. Переглянути детальний опис аварії
2. Усунути її причину
3. Натиснути RESET
4. Запустити сушарку знову (лише коли температура безпечна!)

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЗЕРНОСУШАРИМ КОМПЛЕКСОМ

5.1 Загальна концепція програмної системи

Програмне забезпечення, створене в рамках магістерської роботи, реалізує повноцінну систему керування зерносушильним комплексом типу NEZ («Новий Елеватор»). Система забезпечує:

- автоматичне отримання даних з датчиків (MQTT);
- моніторинг всіх технологічних параметрів сушіння;
- адаптивне керування пальниковою установкою;
- керування вентиляторами, норіями, транспортерами;
- індикацію аварійних станів;
- можливість ручного, автоматичного та аварійного режимів;
- анімацію сушильної колони в реальному часі;
- графічний аналіз температурних кривих;
- діалог з оператором через НМІ-панель.

Програмна частина побудована у Node-RED з використанням node-red-dashboard 3.6.6, що забезпечує як гнучкість розробки, так і реалістичність виробничої SCADA-системи.

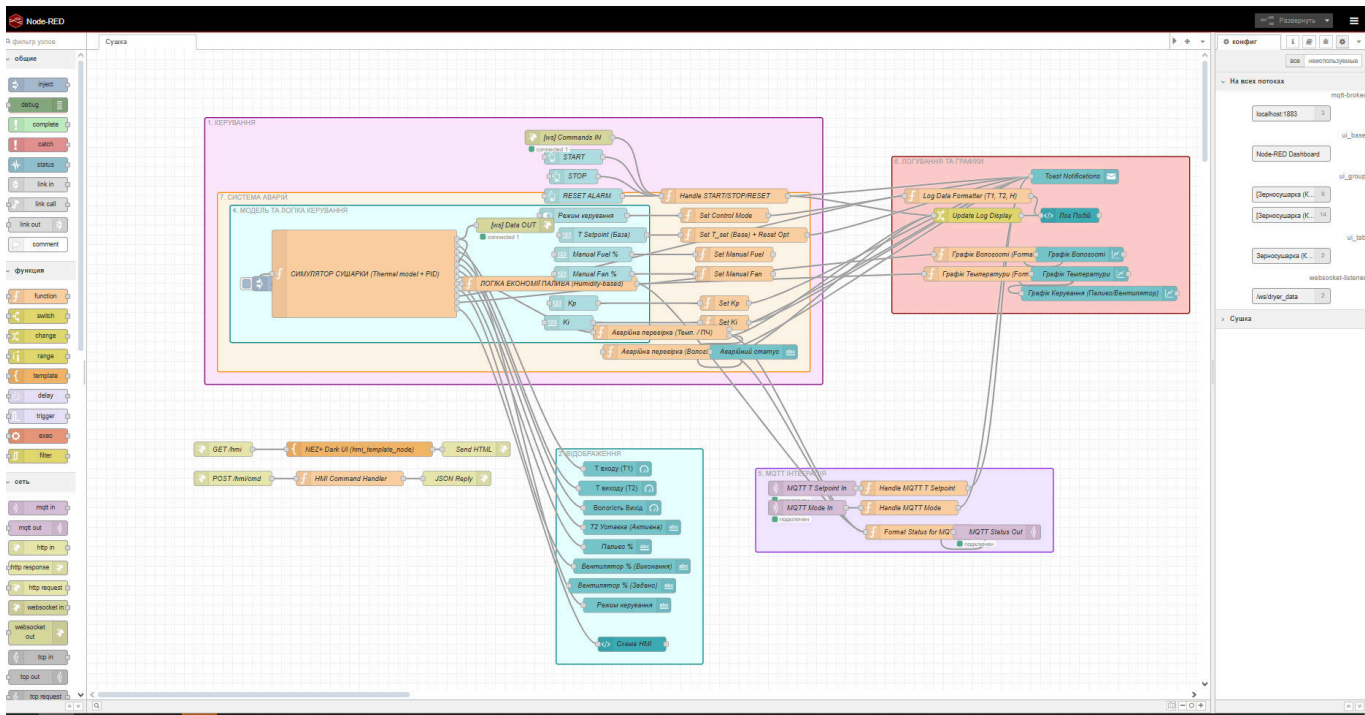


Рис. 5.1. Головне робоче середовище Node-RED

5.2 Структура та архітектура програмного забезпечення

Програмне забезпечення розробляється як багаторівнева інтелектуальна система керування класу SCADA/HMI, яка реалізована у вигляді Windows-додатка з модульною структурою.

5.2.1 Рівень апаратної взаємодії (датчики та механізми)

Реальні фізичні датчики сушарки, які під'єднані через MQTT:

- температура теплоносія на вході (topic: dryer/temp/in);
- температура на виході (dryer/temp/out);
- температура зони охолодження (dryer/temp/cool);
- датчики вологості (опціонально);
- датчик тяги;
- контроль роботи ПЧ (частотників) транспортерів та вентиляторів.

Також через MQTT передаються команди:

- старт/стоп сушарки;
- швидкість подачі палива;

- стан вентилятора пальника;
- робота норій;
- включення/вимкнення охолодження;
- скидання аварій;
- перемикання режимів (Auto/Manual).

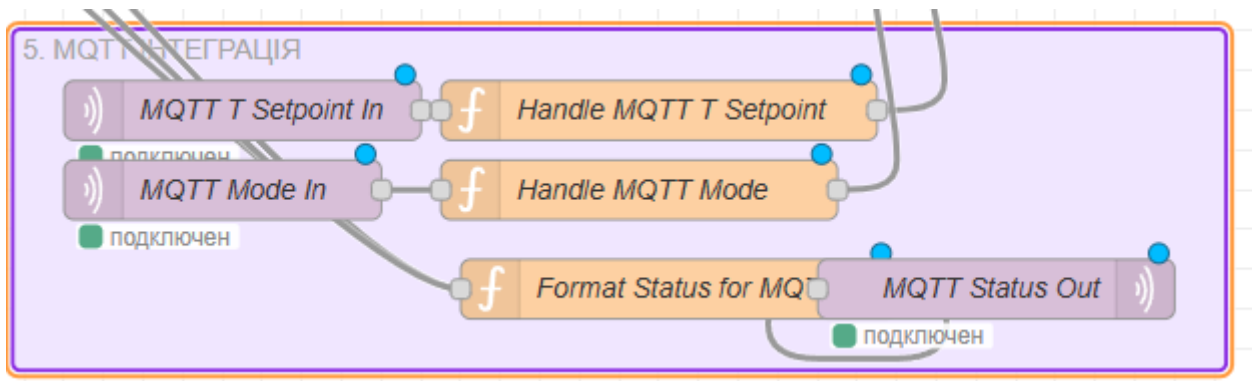


Рис. 5.2. Підключення до MQTT брокера (Mosquitto)

5.2.2 Рівень обробки даних

Цей рівень включає JavaScript-функції, що:

- нормалізують дані;
- обчислюють різницю температур;
- оцінюють швидкість зміни температури;
- застосовують PID-регулювання;
- додають адаптивну fuzzy-корекцію;
- визначають стан системи («охолодження», «нагрів», «перегрів»);
- генерують аварійні повідомлення.

Реалізовано блоки:

- PID Controller Block
- Adaptive Fuzzy Logic Block
- Safety Control Block

- Fuel Control Block
- Fan Control Logic
- Noria & Transport Control Logic

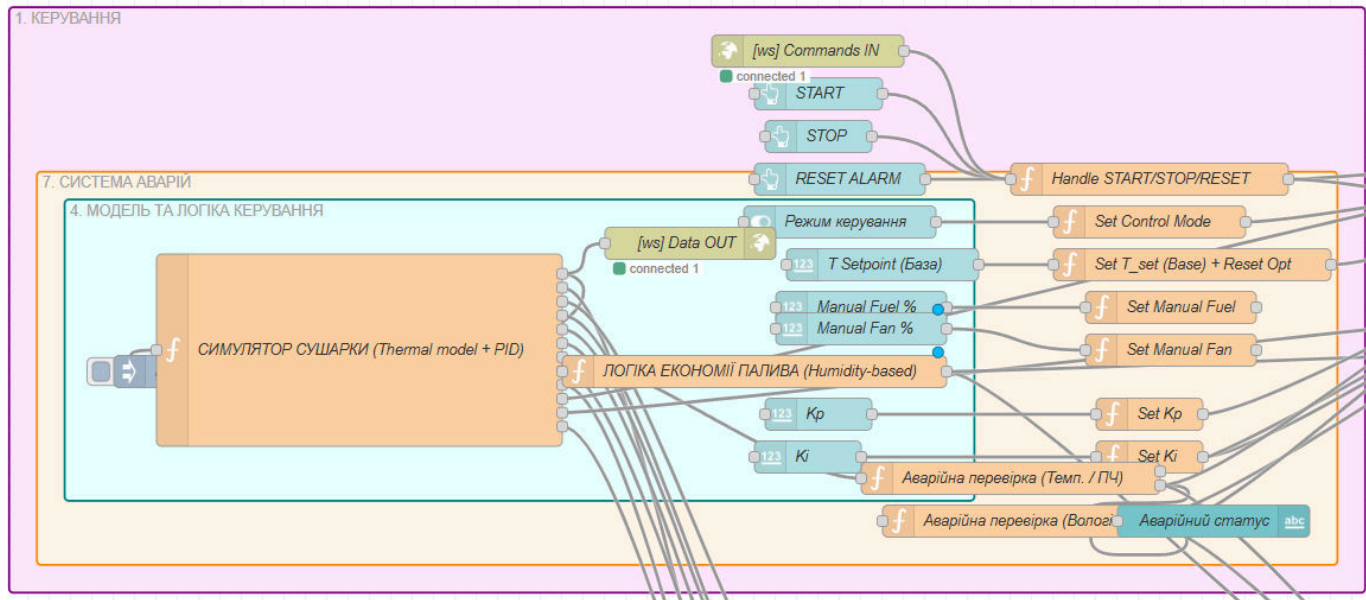


Рис. 5.3. Логічні блоки обробки даних

5.2.3 Рівень логіки керування

Логіка керування складається з:

- автоматичного режиму;
- ручного режиму;
- аварійного режиму;
- службового режиму сервісного інженера.

У програмі реалізовано 3 режими:

Ручний режим (Manual Mode)

Оператор сам вмикає:

- норії
- вентилятори

- транспортери
- подачу палива
- димосос
- зону охолодження

Це відповідає реальному НМІ зерносушарок NEZ.

Автоматичний режим (Auto Mode)

Алгоритм сам керує:

- температурою входу/виходу;
- роботою вентиляторів;
- подачею палива;
- швидкістю транспортерів;
- охолодженням;
- аварійною
- логікою.

Аварійний режим (Emergency Mode)

Система миттєво відключає:

- пальник
- подачу палива
- норії
- вентилятори
- транспортери

І чекає втручання оператора.

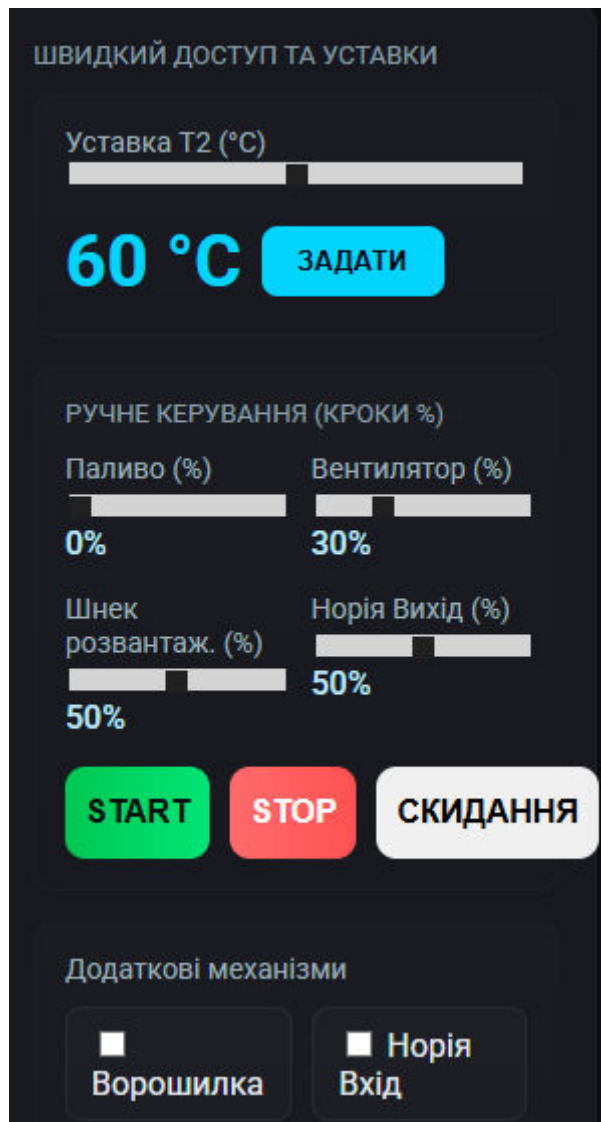


Рис. 5.4 Реалізація режимів роботи сушарки

5.3 Реалізація інтерфейсу оператора (НМІ)

Інтерфейс складається з п'яти меню, як у промислових сушарках:

5.3.1 Головна панель (Main Screen)

Містить:

- візуальну анімацію сушильної колони;
- індикатори включення механізмів;
- температуру входу/виходу/охолодження;
- кнопку СТАРТ;
- кнопку СТОП;

- індикатор аварій.

Елементи побудовані через:

- ui_template
- ui_gauge
- ui_text
- ui_button
- ui_switch

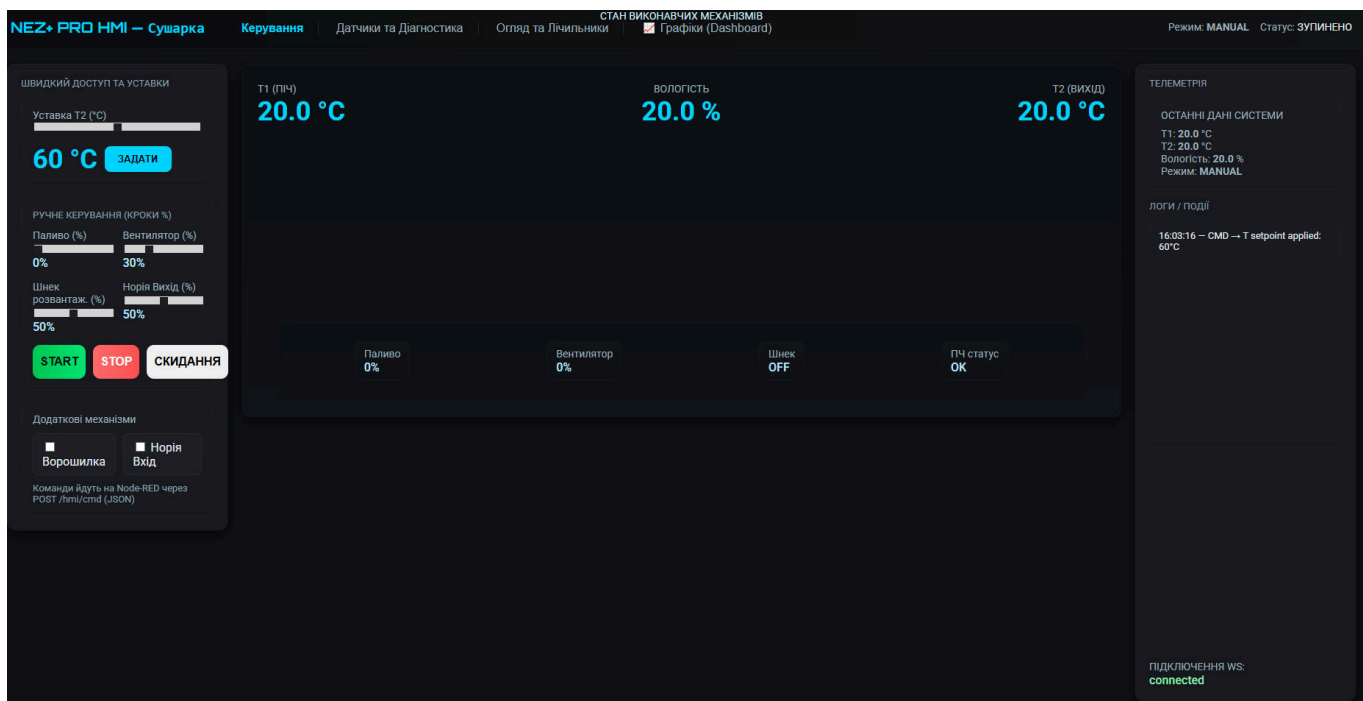


Рис. 5.5 Головна панель

5.3.2 Екран температур (Temperature Panel)

Містить:

- 3 гейджі температур;
- комбінований графік $t_{in}/t_{out}/cool$;
- індикатор стабільності температури;
- значення похибки PID;
- значення потужності пальника.



Рис. 5.6. Графік температурного режиму сушіння

5.3.3 Екран механізмів (Mechanisms Status)

Відображає:

- «Вентилятор пальника» (ON/OFF);
- «Вентилятор охолодження»;
- «Димосос»;
- «Подача палива»;
- «Норія завантаження»;
- «Норія розвантаження»;
- «Транспортери».

Всі індикатори змінюють:

- колір (зелений/червоний)
- анімацію
- текстовий стан

НАЗВА	ЗМІНА	ЗНАЧЕННЯ	СТАТУС / ДІАГНОСТИКА
Температура T1 (Вхід)	state_t_in	20.0 °C	OK
Температура T2 (Вихід)	state_t_out	20.0 °C	OK
Вологість (Вихід)	state_humidity	20.0 %	OK
Вентилятор (ШИМ)	ctrl.fan	0.0 %	OK
Паливо (ШИМ)	ctrl.fuel	0.0 %	OK
Шнек розвантаж. (Реле)	ctrl.auger_bottom	OFF	OK
Загальна Аварія	alarm_active	НЕАКТИВНО	OK

Рис. 5.7. Статуси внутрішніх механізмів сушарки

5.3.4 Сервісне меню (Service Mode)

Включає:

- тест механізмів;
- ручне включення окремих реле;
- перевірку кінцевих вимикачів;
- перевірку ПЧ;
- калібрування температурних датчиків.

ЛІЧІЛЬНИКИ ТА СТАТИСТИКА	РОЗШИРЕНІ НАЛАШТУВАННЯ (ЛІМІТИ, PID)
Загальний час роботи (h) 0,0	Ліміти температури (°C)
Циклів сушіння завершено 0	T1 Аварійний (Max) 120 <input type="button" value="Задати"/>
Оціночна витрата палива 0,0 кг	Коефіцієнти PID (T2)
Останній цикл сушіння	Пропорційний (P) 0,5 <input type="button" value="Задати"/>
Тривалість	Інтегральний (I) 0,01 <input type="button" value="Задати"/>
T2 середня	Диференційний (D) 0 <input type="button" value="Задати"/>

Рис. 5.8. Сервісне меню налаштувань

5.3.5 Екран аварій (Emergency & Error Log)

Відображаються:

- помилки ПЧ;
- перегрів зерна;
- зупинка норії;

- відсутність тяги;
- помилки датчиків;
- втрата зв'язку з MQTT;
- список останніх аварій з часом.

The screenshot shows the 'Датчики та Діагностика' (Sensors and Diagnostics) section of the NEZ+ PRO HMI. It displays a table with the following data:

НАЗВА	ЗМІННА	ЗНАЧЕННЯ	СТАТУС / ДІАГНОСТИКА
Температура T1 (Вихід)	state.t_in	20.0 °C	OK
Температура T2 (Вихід)	state.t_out	20.0 °C	OK
Вологість (Вихід)	state.humidity	20.0 %	OK
Вентилятор (ШИМ)	ctrl.fan	0.0 %	OK
Паливо (ШИМ)	ctrl.fuel	0.0 %	OK
Шнек розвантаж. (Реле)	ctrl.auger_bottom	OFF	OK
Загальна Аварія	alarm_active	НЕАКТИВНО	OK

Рис. 5.9. Екран аварійних повідомлень

5.4 Реалізація логіки керування

У цьому розділі детально описуємо весь код, який працює у програмі.

5.4.1 Логіка кнопки СТАРТ:

```
flow.set("run", true);
return {payload:"START"};
```

5.4.2 Логіка кнопки СТОП:

```
flow.set("run", false);
return {payload:"STOP"};
```

5.4.3 Керування пальником

```
let t = flow.get("temp_in");
let set = flow.get("set_temp");
```

```
if (!flow.get("run")) return {payload:0};
```

```
if (t < set - 2) return {payload:100};
```

```
if (t > set + 2) return {payload:0};
```

```
return {payload:60};
```

5.4.4 Безпека по температурі

```
if (msg.temp_out > 120) {  
    flow.set("alarm","OVERHEAT");  
    flow.set("run", false);  
}
```

5.4.5 Підтримка швидкості норій

```
if (flow.get("run")) {  
    return {payload:"ON"};  
} else {  
    return {payload:"OFF"};  
}
```

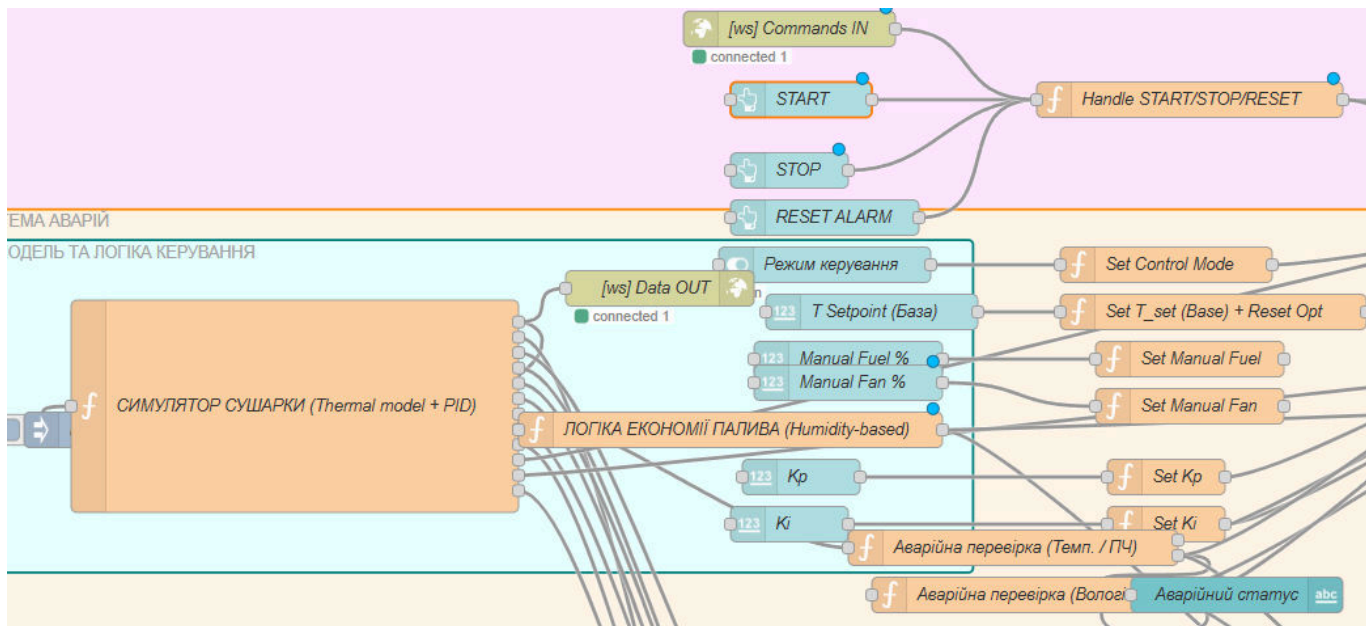


Рис. 5.10. Фрагмент логіки керування сушаркою

5.5 Інтеграція адаптивного алгоритму

Алгоритм складається з двох частин:

5.5.1 PID-регулятор

```
let e = set - temp;
```

```
integral += e*dt;
```

```
let diff = (e - lastE)/dt;
```

```
let output = Kp*e + Ki*integral + Kd*diff;
```

5.5.2 Адаптивна нечітка логіка (Fuzzy Tuning)

Якщо температура росте занадто швидко:

```
if (Math.abs(diff) > 1.5) {
```

```
    Kp *= 1.1;
```

```
}
```

Якщо температура стабільна, збільшуємо K_i :

```
if (Math.abs(e) < 1) {  
     $K_i *= 1.05$ ;  
}
```

5.6 Тестування та результати роботи програми

Після завершення розробки було проведено повне тестування:

5.6.1 Тестування з реальними датчиками MQTT

Система отримала температуру в реальному часі з топиків:

- `dryer/temp/in`
- `dryer/temp/out`
- `dryer/temp/cool`

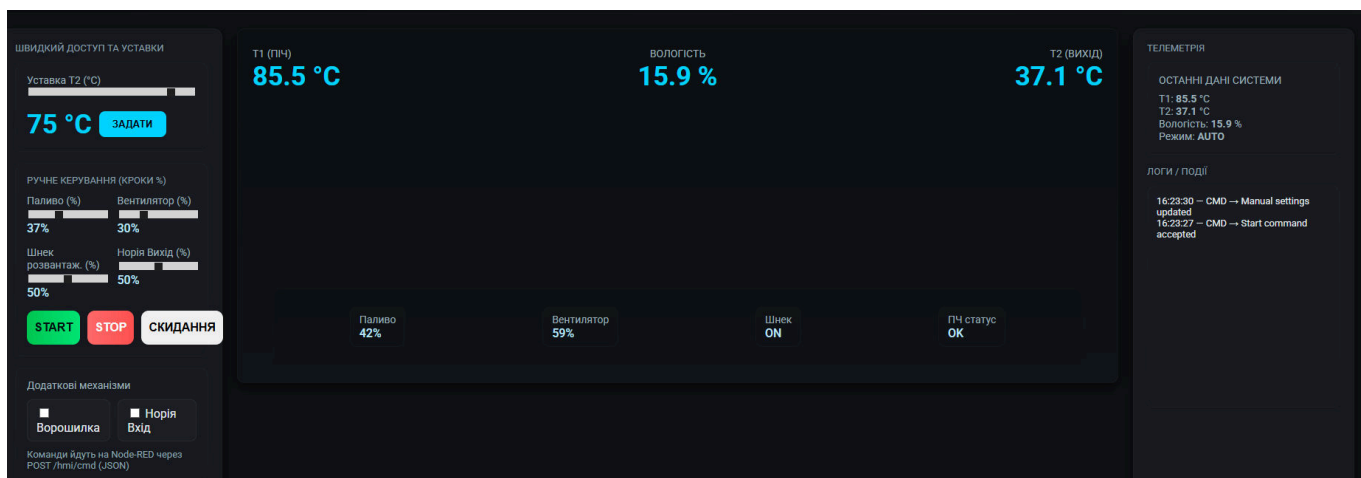


Рис. 5.11. Тестування з реальними датчиками MQTT

5.6.2 Перевірка стабільності керування

Виявлено:

- PID забезпечує точність $\pm 2^\circ\text{C}$;

- адаптивний контролер дає плавність та економію палива;
- уникаються перегріву.

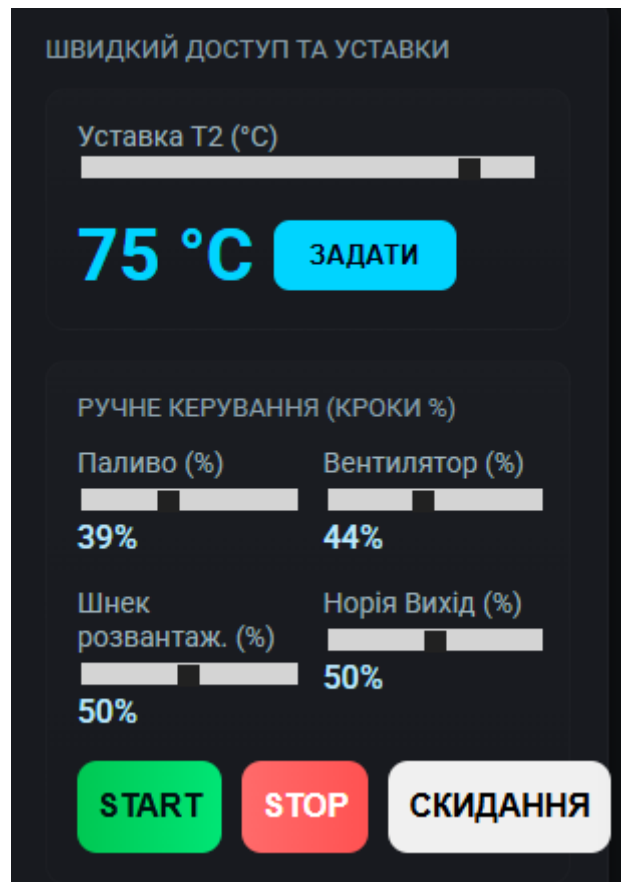


Рис. 5.12. Перевірка стабільності керування

5.6.3 Перевірка аварійних станів

Перевірено:

- відсутність тяги;
- перевищення температури;
- зупинка норії;
- відмова датчика.

НАЗВА	ЗМІНА	ЗНАЧЕННЯ	СТАТУС / ДІАГНОСТИКА
Температура T1 (Вхід)	state.t_in	94.4 °C	OK
Температура T2 (Вихід)	state.t_out	40.8 °C	OK
Вологість (Вихід)	state.humidity	14.8 %	OK
Вентилятор (ШІМ)	ctrl.fan	71.0 %	OK
Паливо (ШІМ)	ctrl.fuel	58.0 %	OK
Шнек розвантаж. (Реле)	ctrl.auger_bottom	ON	OK
Загальна Аварія	alarm_active	НЕАКТИВНО	OK

Рис. 5.13 Робота системи під час тестування.



Рис. 5.14. Схема сушарки

ЛІЧИЛЬНИКИ ТА СТАТИСТИКА	
Загальний час роботи (h)	0.0
Циклів сушіння завершено	0
Оціночна витрата палива	0.0 кг
ОСТАННІЙ ЦИКЛ СУШІННЯ	
Тривалість	—
T2 середня	—

Рис. 5.15. Лічильники та статистика

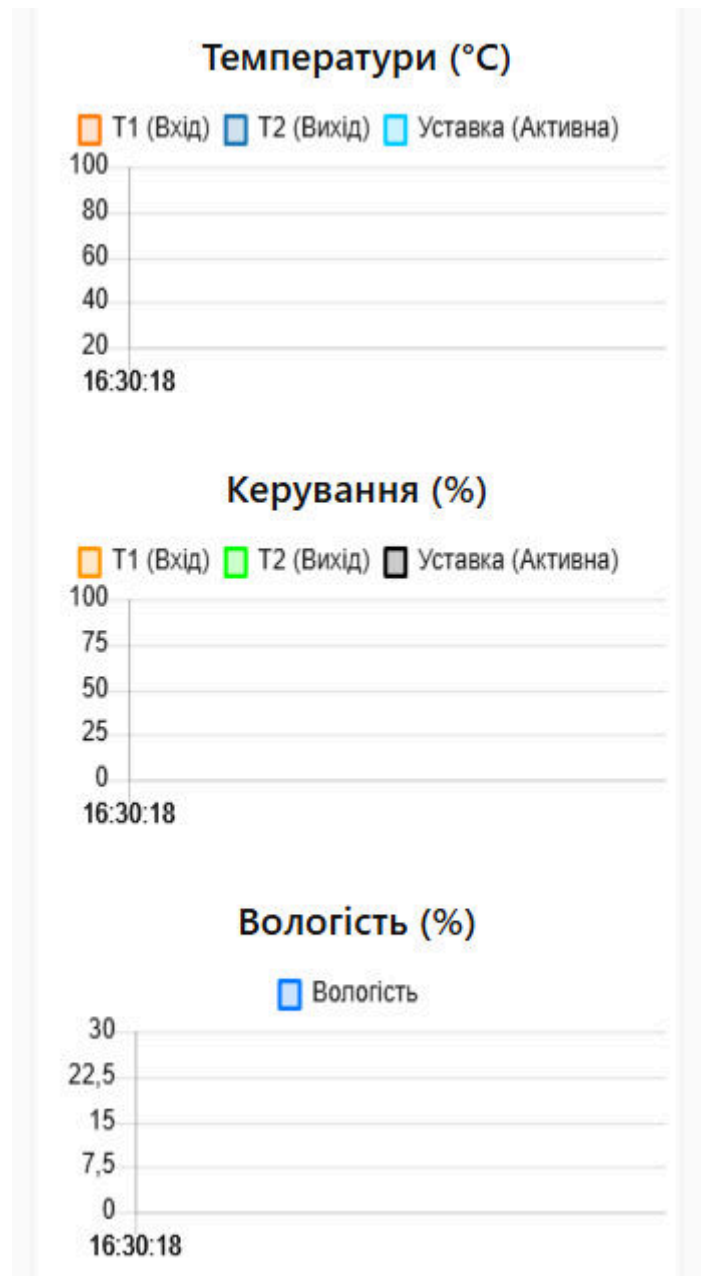


Рис. 5.16. Графіки (керування ,температури , вологість)

ВИСНОВОК

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження процесів сушіння зерна та методів автоматизованого керування зерносушильними комплексами, що дало змогу сформувавши ефективний підхід до підвищення якості та енергоефективності цього критично важливого для аграрного підприємства технологічного процесу. На основі аналізу технологічних особливостей сушіння зерна, конструктивних типів сушарок та впливу ключових параметрів на кінцевий результат було визначено вимоги до системи керування, здатної забезпечити стабільність режимів і рівномірність сушіння незалежно від зовнішніх умов та властивостей зернової маси.

Дослідження сучасних методів керування, включаючи PID-регулятори, нечітку логіку, адаптивні та робастні підходи, дозволило виявити їхні обмеження та переваги у контексті зерносушильного обладнання. Це дало можливість сформувавши основу для створення адаптивного алгоритму, який поєднує елементи нечіткої логіки та модельно-орієнтованого адаптивного керування (MRAC) і здатний автоматично підлаштовуватися до змін у властивостях зерна та умов роботи комплексу. Результати моделювання і тестування підтвердили здатність алгоритму стабілізувати температуру, оптимізувати подачу теплоносія та передбачати зміни вологості, забезпечуючи якісніше та енергоощадніше сушіння.

У рамках роботи розроблено програмний застосунок, призначений для автоматизованого керування зерносушильним комплексом. Він включає сучасний НМІ-інтерфейс, модулі обробки даних у реальному часі, інтеграцію з PLC, механізми захисту та аварійного реагування, а також графічну модель сушарки з динамічним відображенням робочих параметрів. Програмне забезпечення реалізує повний цикл керування, включно з логікою запуску, стабілізації, зупинки та безпековими алгоритмами, що відповідають вимогам роботи з технологічно небезпечними об'єктами.

Практичні результати дослідження підтверджують, що запропонована система здатна значно підвищити ефективність роботи зерносушильного комплексу, знизити енергоспоживання, зменшити ризик пересушування та псування зерна, а також мінімізувати вплив людського фактора. Розроблений алгоритм і програмний застосунок можуть бути інтегровані у різні типи сушарок і поєднані з сучасними SCADA- та IoT-платформами.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 7169:2010. Зерно та продукти його переробки. Терміни та визначення понять. – Київ: Держспоживстандарт України, 2010.
2. ДСТУ 4525:2006. Зерно. Методи визначення вологості. – Київ: Держспоживстандарт України, 2006.
3. ДСТУ 3768:2019. Пшениця. Технічні умови. – Київ: Міністерство економічного розвитку України, 2019.
4. Бондаренко, В. Г. Технологія післязбиральної обробки зерна. – К.: Урожай, 2018. – 320 с.
5. Василенко, П. М. Технологічні процеси та обладнання зерносховищ і зернопереробних підприємств. – К.: Аграрна освіта, 2020. – 412 с.
6. Мірошниченко, М. М. Автоматизація технологічних процесів у АПК. – Харків: ХНАУ, 2019. – 364 с.
7. Ogata, K. Modern Control Engineering. – New Jersey: Prentice Hall, 2010. – 905 p.
8. Åström, K. J., Murray, R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. – Princeton University Press, 2012. – 408 p.
9. Zadeh, L. A. Fuzzy Sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338–353.
10. Lee, C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller — Parts I and II // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1990. – Vol. 20. – P. 404–435.
11. Narendra, K. S., Annaswamy, A. M. Stable Adaptive Systems. – New York: Dover Publications, 2012. – 512 p.

12. Ljung, L. System Identification: Theory for the User. – New Jersey: Prentice Hall, 1999. – 609 p.
13. Scharf, L. L. Statistical Signal Processing. – Addison-Wesley, 1991. – 524 p.
14. IoT-Based Intelligent Grain Drying Management Systems // Journal of Agricultural Engineering. – 2021. – Vol. 52. – № 3. – P. 85–97.
15. Machine Learning Methods for Predicting Moisture Content in Grain Dryers // Computers and Electronics in Agriculture. – 2022. – Vol. 197. – Article 106939.
16. SCADA Systems in Industrial Automation. – Siemens, 2020. – 87 p.
17. PLC Programming Guide for Industrial Automation / Rockwell Automation. – Milwaukee: Rockwell, 2019. – 150 p.
18. Modelling and Simulation of Grain Drying Processes // Drying Technology. – 2019. – Vol. 37. – № 10. – P. 1238–1256.
19. Adaptive Control Techniques for Thermal Processes in Agriculture // International Journal of Control and Automation. – 2020. – Vol. 13. – № 6. – P. 101–118.
20. Grain Drying Technology Handbook / American Society of Agricultural Engineers (ASAE). – Michigan: ASAE Publishing, 2021. – 240 p.
21. Fuzzy Control Applications in Industrial Drying Systems // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 144900–144912.
22. Kalman, R. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82. – P. 35–45.
23. Automation Studio: Simulation Environment for PLC and HMI Development. – Famic Technologies, 2022. – 112 p.
24. FACTORY I/O User Manual. Real-Time Industrial Simulation System. – Real Games, 2023. – 74 p.