

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Система автоматизованого керування технологічним процесом сушки зерна елеваторного комплексу»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-24м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(цифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Зоряна ТИМКІВ
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. кафедри КЕМСК

Олександр ПАЯНОК
(прізвище та ініціали)

«25» 11 2025 р.

Опонент:

Юрій Вобшич
(прізвище та ініціали)

«19» 12 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри

«25» 11 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електроприводу»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

“14” 10 20 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Тимків Зоряні Олегівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система автоматизованого керування технологічним процесом сушки зерна елеваторного комплексу

керівник роботи Паянок Олександр Анатолійович, к.т.н., доц. каф. КЕМСК

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “14” вересня 20 року № 313

2. Строк подання студентом роботи 25.11.20

3. Вихідні дані до роботи: конструкція шахтої сушарки елеваторного комплексу – датчики температури, рівня, вологості, тиску, вимоги до безпечного функціонування сушильного обладнання, необхідність реалізації автоматизованого контролю та керування параметрами сушки, побудова АСУТП з використання ПЛК, частотних перетворювачів, панелі оператора та SCADA.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1 Аналіз сучасного стану технологічного процесу сушки зерна елеваторного комплексу. 2 Обґрунтування архітектури АСУТП та вибір технічних засобів для сушильного комплексу. 3 Розробка структурної, функціональної та електричної схеми АСУТП сушильного комплексу. 4 Промна реалізація автоматизованої системи керування сушильним комплексом 5 Техніко-економічне обґрунтування системи автоматизованого керування технологічним процесом сушки зерна елеваторного комплексу. 6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки.

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

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження. 1. Загальна характеристика технологічного процесу сушки зерна елеваторного комплексу. 2. Способи сушіння та класифікація зерносушарок. 3. Структурна схема автоматизованої системи керування сушильним комплексом. 4. Функціональна схема АСУТП із зазначенням основних вимірювальних та керуючих елементів. 5. Принципова електрична схема живлення та керування. 6. Схема підключення датчиків температури, вологості та рівня, включно з інтеграцією датчика Hydronix НРХТ02. 7. Кабельний журнал та схема підключення клем шафи керування.

Структура програмного забезпечення ПЛК та логіка обробки технологічних механізмів
 Економічна частина. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	К. Т. Н., доц. каф. КЕМСК Паянок О.А.	14.10.25р. 	21.11.25р.
Економічна частина	Шулле Ю.А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	14.10.25р. 	21.11.25р.

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	24.09.25р.	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	28.10.25р.	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	21.11.25р.	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	21.11.25р.	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	21.11.25р.	
6	Попередній захист МКР	25.11.25р.	
7	Нормоконтроль МКР	24.11.25р.	
8	Рецензування МКР	19.12.25р.	
9	Захист МКР	23.12.25р.	

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК: 628.440.22

Тимків З.О. Система автоматизованого керування технологічним процесом сушки зерна елеваторного комплексу. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2024. 118 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 23 назв; рис.: 29; табл. 8.

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено систему автоматизованого керування технологічним процесом сушіння зерна на елеваторному комплексі. Проведений аналіз існуючих типів зерносушарок показав, що традиційні системи контролю вологості не забезпечують необхідної точності, мають значну інерційність та не реалізують автоматичну корекцію режимів, що негативно впливає на якість продукції та енергоефективність комплексу.

У роботі обґрунтовано застосування мікрохвильового датчика вологості Hydronix HPXT02, який завдяки діелектричному принципу вимірювання забезпечує високу точність незалежно від температури, щільності та швидкості руху зерна. Розроблено схему його підключення через Modbus RTU та наведено методику інтеграції датчика у промисловий контролер для реалізації адаптивного регулювання параметрів сушіння.

Створено структурну та функціональну схеми АСУТП, електричні схеми керування та програмні модулі для обробки сигналів датчиків і керування виконавчими механізмами. Запропоновані алгоритми забезпечують стабілізацію технологічних параметрів і підвищення енергоефективності роботи сушильного комплексу.

У розділі охорони праці розглянуто вимоги безпечної експлуатації сушильного обладнання та заходи із забезпечення електробезпеки і пожежної безпеки.

Ключові слова: автоматизація, зерносушарка, Hydronix HPXT02, вологість, АСУТП, промисловий контролер, Modbus RTU.

ABSTRACT

Letyuchy R.I. Increasing the efficiency of the speed stabilization electric drive with scalar control. Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, ducational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2024. – 118 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 23 titles; fig.: 37; tabl. 13.

The master's thesis develops a system for automated control of the grain drying process at an elevator complex. An analysis of existing types of grain dryers has shown that traditional humidity control systems do not provide the necessary accuracy, have significant inertia, and do not implement automatic mode correction, which negatively affects product quality and the energy efficiency of the complex.

The work justifies the use of the Hydronix HPXT02 microwave moisture sensor, which, thanks to the dielectric measurement principle, provides high accuracy regardless of temperature, density, and grain movement speed. A connection diagram via Modbus RTU has been developed and a method for integrating the sensor into an industrial controller for adaptive control of drying parameters has been presented.

Structural and functional diagrams of the automated control system, electrical control diagrams, and software modules for processing sensor signals and controlling actuators have been created. The proposed algorithms ensure the stabilization of technological parameters and increase the energy efficiency of the drying complex.

The section on occupational safety considers the requirements for the safe operation of drying equipment and measures to ensure electrical and fire safety.

Keywords: automation, grain dryer, Hydronix HPXT02, humidity, automated control system, industrial controller, Modbus RTU.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШКИ ЗЕРНА ЕЛЕВАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ.....	8
1.1 Загальна характеристика процесу сушіння зерна	8
1.2 Способи сушіння та класифікація зерносушарок.....	9
1.3 Технологічні параметри процесу сушіння.....	13
1.4 Недоліки традиційних систем керування сушильними агрегатами	15
1.5 Сучасні вимірювальні засоби для автоматизації сушіння зерна	17
1.6 Тенденції розвитку автоматизованих систем керування сушильними комплексами	18
1.7 Висновки	20
2 ОБҐРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ АСУТП ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ СУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ	22
2.1 Аналіз технологічного процесу сушіння зерна та його параметрів	22
2.2 Засоби вимірювання вологості та температури в системі керування сушаркою	24
2.3 Інтеграція вимірювальних засобів у систему керування	31
2.4 Вибір програмованих логічних контролерів	32
2.5 Концептуальна архітектура автоматизованої системи керування сушильним комплексом	37
2.6 Висновки	39
3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ, ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ АСУТП СУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ .	40
3.1 Структурна схема автоматизованої системи керування.....	40
3.2 Функціональна схема автоматизованої системи керування сушильного комплексу	41
3.3 Принципова електрична схема живлення та керування	44
3.4 Кабельний журнал і схема підключення клем шафи керування	46

3.5 Конструктивне виконання шафи керування 1ШУ	47
3.6 Інтеграція мікрохвильового датчика вологості Hydronix HPXT02 у систему автоматизованого керування сушильним комплексом	49
3.7 Висновок	53
4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СУШИЛЬНИМ КОМПЛЕКСОМ.....	54
4.1 Загальні принципи програмної реалізації АСУТП.....	54
4.2 Оголошення глобальних змінних та їх роль в архітектурі програми....	55
4.3 Обробка одиничних механізмів на основі типового функціонального блоку	56
4.4 Типовий функціональний блок обробки механізму мовою LD	57
4.5 Структурована архітектура програмної логіки та опис одиничного механізму	58
4.6 Висновки	61
5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ СУШКИ ЗЕРНА ЕЛЕВАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ	62
5.1 Оцінка капітальних витрат на розробку та впровадження системи	64
5.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу	68
5.3 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання	69
5.4 Розрахунок терміну окупності та показників ефективності інвестицій	71
5.5 Висновки	75
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	76
6.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час експлуатації зерносушильного обладнання	76
6.2 Вимоги до мікроклімату, освітлення, шуму та вібрації на робочих місцях	79
6.2.1 Мікроклімат виробничих приміщень	80
6.2.2 Освітлення робочих місць	

6.2.3 Шум і вібрація

6.3 Засоби індивідуального захисту персоналу

6.4 Розробка заходів із пожежної та електробезпеки

6.4.1 Пожежна безпека

6.4.2 Електробезпека

6.5 Висновок

ВИСНОВКИ.....

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....

Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....

Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Процес сушіння зерна є одним із ключових етапів післязбиральної обробки, що безпосередньо впливає на якість готової продукції, довготривале зберігання та економічну ефективність роботи елеваторного комплексу. Порушення режимів сушіння призводить до значних втрат врожаю, перевитрат енергоресурсів, зниження товарної якості та виникнення аварійних ситуацій. В умовах зростання обсягів виробництва сільськогосподарської продукції та підвищених вимог до її якості актуальним є впровадження сучасних автоматизованих систем керування сушильними агрегатами.

Традиційні системи керування нерідко характеризуються низькою точністю підтримання параметрів сушіння, великими інерційними процесами та значним впливом людського фактора. Використання сучасних датчиків вологості, температури, інтелектуальних контролерів та алгоритмів регулювання дає можливість реалізувати енергоефективний і стабільний технологічний процес [2]. Тому розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом сушіння зерна є актуальною технічною та науковою задачею, що відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації.

Об'єкт дослідження - технологічний процес сушіння зерна в елеваторному комплексі.

Предмет дослідження - методи, засоби та алгоритми побудови автоматизованої системи керування сушінням у шахтній сушарці безперервної дії.

Мета роботи Розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом сушіння зерна з підвищеною точністю, енергоефективністю та надійністю функціонування.

Методи дослідження У роботі використовуються:

- методи системного аналізу для побудови структури АСУТП;
- методи моделювання технологічних процесів сушіння;

- інструменти розробки алгоритмів та функціональних схем;
- аналіз технічних характеристик обладнання та сенсорів;
- методи порівняльної оцінки ефективності різних варіантів автоматизації.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше обґрунтовано застосування мікрохвильового датчика вологості Hydronix НРХТ02 у системах автоматизованого керування сушінням зерна, визначено його переваги, зумовлені діелектричним принципом вимірювання (висока точність незалежно від температури, щільності та швидкості руху зернової маси). Розроблено схему його підключення за протоколом Modbus RTU, методику інтеграції у промисловий контролер та удосконалено науково-технічні засади побудови систем керування сушінням, які враховують інерційність зернової маси, змінність температурно-вологісних параметрів і стохастичний характер тепломасообміну у шахтних сушарках безперервної дії.

2. Розроблено структурно-функціональну модель автоматизованої системи керування технологічним процесом сушіння зерна, у якій реалізовано багаторівневу систему моніторингу та регулювання, що забезпечує адаптивне керування в режимі реального часу з підвищеною ефективністю та надійністю.

Практичне значення одержаних у роботі результатів:

1. Розроблена система автоматизованого керування процесом сушіння зерна придатна до впровадження на елеваторних підприємствах для модернізації існуючих сушарок різних типів (шахтних, рециркуляційних тощо). Її інтеграція не потребує суттєвої реконструкції технологічної лінії, що забезпечує можливість поетапного та економічно обґрунтованого впровадження.

2. Запропонований алгоритм керування забезпечує високоточне підтримання технологічних параметрів процесу сушіння - температури,

витрати повітря, вологості зерна - з оперативним реагуванням на зміни зовнішніх і внутрішніх умов. Це сприяє підвищенню стабільності технологічного процесу, поліпшенню якості готової продукції та зниженню технологічних втрат.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором самостійно. Здобувачем проведено аналіз сучасного стану технологічних процесів сушіння зерна та систем їх автоматизації, узагальнено вимоги до побудови автоматизованих систем керування для елеваторних комплексів. Самостійно розроблено структурну та функціональну схеми автоматизованої системи керування, виконано вибір контрольно-вимірювального та виконавчого обладнання, обґрунтовано архітектуру системи та розроблено алгоритм керування сушильним процесом із врахуванням інерційних властивостей об'єкта.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на VI міжнародній науково-технічній конференції «оптимальне керування електроустановками» (ОКЕУ 2025).

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 2 тези доповідей матеріалів конференцій:

- З.О. Тимків, О.А. Паянок Застосування програмних середовищ для підвищення ефективності автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна. Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ- 2025). Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, С 137-139, 22-23 жовтня 2025 року URI: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/924/1612/2930-2>.

- З.О. Тимків, О.А. Паянок Принципи побудови програмних середовищ автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна. Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2025), С 2738-2742, 24-27 червня 2025 року URI:

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/904/1576/2888-1>.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШКИ ЗЕРНА ЕЛЕВАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ

1.1 Загальна характеристика процесу сушіння зерна

Процес сушіння зерна є одним із ключових етапів післязбиральної доробки та визначає можливість його тривалого зберігання, стабільність якісних показників і економічну ефективність роботи елеваторного комплексу. Порушення режимів сушіння призводить до погіршення фізико-хімічних властивостей зернової маси, розвитку мікрофлори, самозігрівання, зниження натури, випадання зародка та втрати товарної вартості продукції. За статистичними даними, до 30 % післязбиральних втрат пов'язані саме з неконтрольованими процесами сушіння й охолодження зерна [4].

Сушіння є складним тепломасообмінним процесом, що полягає у видаленні надлишкової вологи шляхом її випаровування під дією теплоносія та подальшої дифузії внутрішньої вологи до поверхневих шарів зерна. На першому етапі відбувається зовнішнє випаровування вологи з поверхні, а на другому - внутрішня волога переміщується до оболонки зернини під впливом температурного та вологообмінного градієнтів. Ефективність цього процесу визначається широтою власної дифузійної здатності культури, структурою зернівки та швидкістю нагрівання [5].

Режим сушіння формується сукупністю параметрів: температурою та вологістю теплоносія, швидкістю руху повітря, тривалістю перебування зерна в шахті сушарки, товщиною шару зернової маси та конструктивними особливостями обладнання. Перевищення допустимих температур може спричинити поверхневі "опіки", зниження схожості насіннєвого матеріалу, розтріскування зернівки та підвищені енергетичні витрати на процес. Низькі ж температури ведуть до неповного зневоднення, що унеможливорює тривале зберігання та підвищує ризики самозігрівання.

На роботу сушарки істотно впливає і початкова вологість зерна. При високих значеннях вологості (>20–22 %) збільшується опір проходженню

повітря через зернову масу, погіршується однорідність сушіння та зростає небезпека утворення “мостів” і локальних зон перегріву. Тому для забезпечення стабільного процесу необхідно застосовувати автоматизовані системи контролю параметрів теплоносія, вологості та температури зерна в різних зонах сушильної шахти [4].

Тип сушарки - шахтна, барабанна, модульна, конвективна або рециркуляційна - визначає характер розподілу теплових потоків та інтенсивність тепломасообміну. У сучасних шахтних сушарках використовуються зональні режими та рециркуляція зерна, що дає змогу підвищити рівномірність осушування, зменшити питомі витрати палива та забезпечити високий рівень автоматизації. Грамотний вибір сушарки та параметрів її роботи дозволяє знизити енергоспоживання на 10–20 % і зменшити втрати маси природного убутку під час сушіння, що істотно впливає на економічні результати роботи підприємства [5].

Таким чином, процес сушіння є комплексним багатоетапним тепломасообмінним явищем, від правильності організації якого залежить стабільність технологічного циклу, якість готової продукції та ефективність функціонування елеваторного комплексу. Застосування автоматизованих систем керування та моніторингу забезпечує підтримання оптимальних режимів сушіння, мінімізацію втрат і підвищення надійності технологічного процесу [5].

1.2 Способи сушіння та класифікація зерносушарок

У промисловості застосовується значна кількість типів зерносушильного обладнання, які відрізняються принципом подачі теплоносія, інтенсивністю тепломасообміну та рівнем енергоефективності. Найпоширенішими є шахтні, барабанні, баштові та рециркуляційні сушарки, що дозволяє вибрати оптимальний варіант відповідно до продуктивності елеватора та вимог до якості обробки зерна [6].

Шахтні сушарки (рис. 1.1) працюють у безперервному режимі: зерно

переміщується зверху вниз під дією сили тяжіння, а теплоносії подається через бокові канали. Така геометрія шахти забезпечує відносно рівномірний розподіл температури та вологи за висоти зернового шару, що сприяє стабільності кінцевих показників сушіння та високій добовій продуктивності. Шахтні сушарки переважають на великих елеваторних комплексах завдяки простоті обслуговування, масштабованості та можливості роботи в потоковому режимі [6].

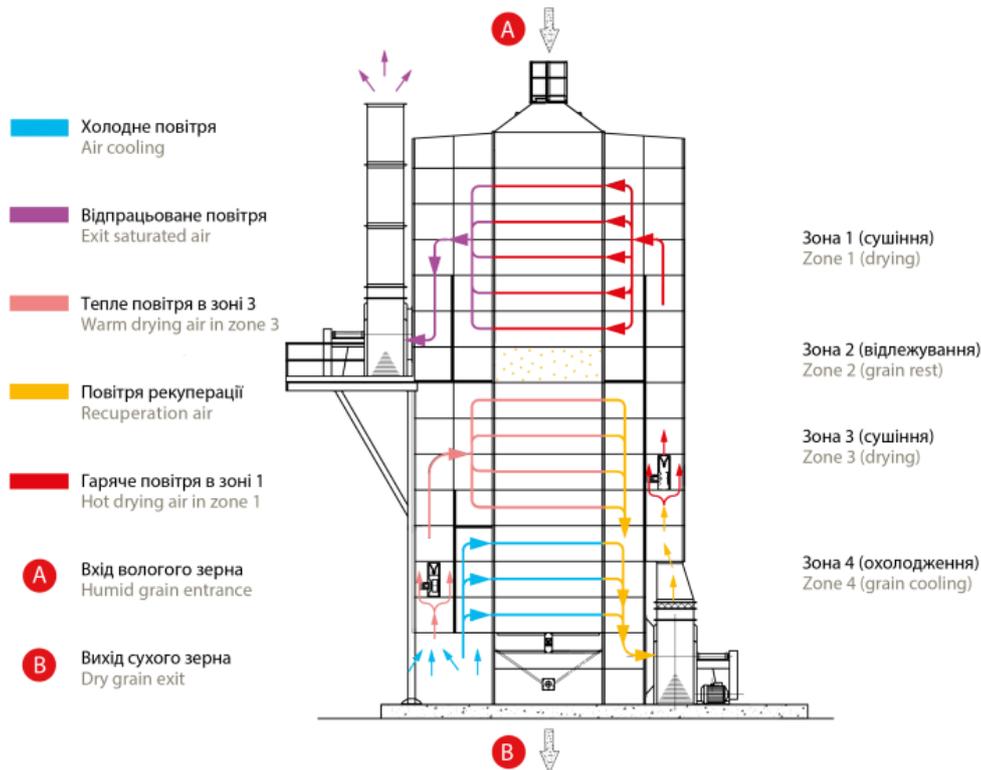


Рисунок 1.1. – Теплова схема потокової шахтної зерносушарки без системи рекуперації тепла.

Разом із тим традиційні шахтні апарати мають істотний недолік - значні втрати теплоти з відпрацьованим повітрям. Відсутність систем рекуперації призводить до того, що нагріте повітря, пройшовши через зернову масу, викидається в атмосферу, не використовуючись повторно. Це збільшує витрати природного газу або дизельного палива та знижує загальний коефіцієнт корисної дії сушильного агрегата, що особливо помітно в умовах інтенсивного потокового виробництва [6].

Широкого застосування набули барабанні сушарки, у яких зерно перемішується всередині обертового циліндра та контактує з теплоносієм у режимі активної циркуляції (рис. 1.2). Механічне перемішування сприяє вирівнюванню температури та вологості по всій масі продукту, що підвищує однорідність процесу сушіння. Однак робота барабана супроводжується зношуванням металевих поверхонь, збільшенням витрат на технічне обслуговування та додатковими енерговитратами на привід, що необхідно враховувати під час проєктування виробничої схеми [4].

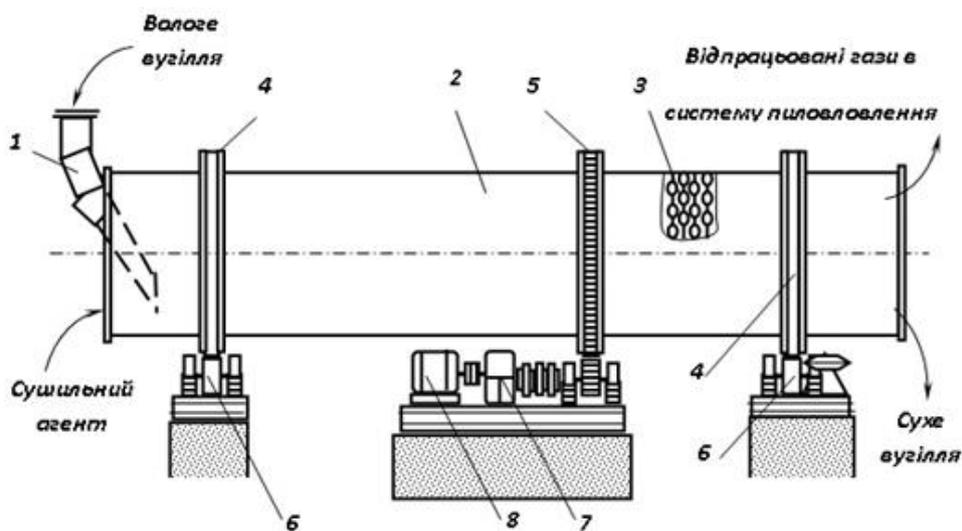


Рисунок 1.2. – Схема барабанної сушарки

За напрямком руху агента сушіння відносно руху зерна сушарки поділяють на прямотокові, протипотокові та змішанопотокові [3]. Прямотокові агрегати забезпечують «м'який» температурний режим, що важливо для культур, чутливих до перегріву. Протипотокові сушарки гарантують високу інтенсивність тепломасообміну та можливість досягнення низьких кінцевих значень вологості, однак потребують точного контролю, щоб уникнути пересушування верхніх шарів. Змішанопотокові конструкції об'єднують переваги обох методів, формуючи більш стабільний температурний профіль і зменшуючи ризик локального перегріву зерна [3].

Окрему групу становлять рециркуляційні сушарки, у яких зерно багаторазово проходить через зону сушіння з проміжним перемішуванням і

охолодженням (рис. 1.3). Такий режим є оптимальним для насінневого матеріалу, оскільки дозволяє працювати при знижених температурах і повністю виключає утворення зон перегріву. Крім того, рециркуляційні системи легко поєднуються з технологіями рекуперації теплоти відпрацьованих газів, що суттєво зменшує енергоспоживання сушильного комплексу та підвищує його продуктивність [5].

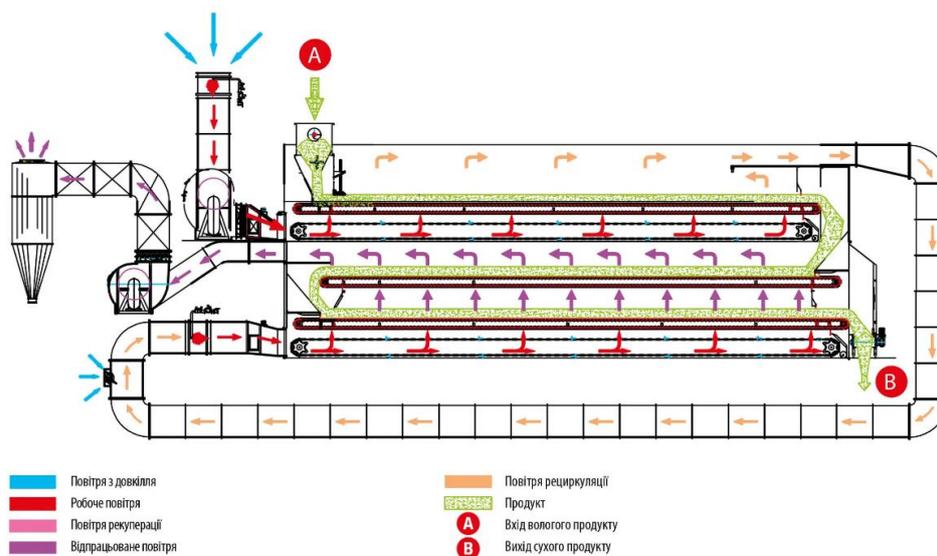


Рисунок 1.3. – Тепло схема рециркуляційної сушарки

Систематизація сушильного обладнання здійснюється також за видом теплоносія (нагріте повітря, димові гази, суміш повітря з продуктами згоряння), конструктивними характеристиками (шахтні, баштові, барабанні, стрічкові, пневматичні, камерні) та рівнем автоматизації [3]. Баштові сушарки з модульною вертикальною конструкцією забезпечують високу продуктивність за компактних габаритів, тоді як стрічкові установки працюють при низьких температурах і підходять для делікатних культур. Пневматичні сушарки забезпечують надвисоку швидкість тепломасообміну, але характеризуються значними енергетичними витратами та підвищеним зношуванням обладнання [4].

Сучасні тенденції розвитку зерносушильних апаратів спрямовані на підвищення їхньої енергоефективності та автоматизації. Впровадження

систем рекуперації теплоти, теплової ізоляції сушильних камер, мінімізація аеродинамічних втрат у повітропроводах і застосування пальників з модуляцією потужності дозволяють досягати коефіцієнта корисної дії на рівні 75–85 %, тоді як традиційні моделі часто не перевищують 55–60 % [5]. Паралельно розвиваються комбіновані енергетичні рішення, що поєднують традиційні газові пальники з біопаливом, тепловими насосами та сонячними колекторами, що знижує витрати палива та покращує екологічні показники сушильних комплексів [5].

Не менш важливим напрямом є вдосконалення систем автоматизованого керування. Використання промислових контролерів Siemens, Schneider Electric та інших виробників у поєднанні з датчиками температури, вологості, тиску та витрати повітря дає змогу реалізувати замкнені контури регулювання, підвищити стабільність технологічних режимів та забезпечити адаптивне керування залежно від властивостей зерна [1]. Інтеграція сушарки в SCADA-системи спрощує візуалізацію параметрів, дозволяє здійснювати архівування даних, аналіз енерговитрат та впроваджувати предиктивну діагностику на основі історичних трендів роботи обладнання [8].

Таким чином, сучасні зерносушильні установки являють собою широкий спектр конструктивних і технологічних рішень, що відрізняються рівнем продуктивності, типом теплоносія, інтенсивністю тепломасообміну та можливостями автоматизації. Незмінним залишається загальний вектор розвитку - підвищення енергоефективності процесу, поліпшення рівномірності сушіння, інтеграція інтелектуальних систем керування та відповідність сучасним вимогам зернопереробної промисловості [1].

1.3 Технологічні параметри процесу сушіння

Ефективність процесу сушіння визначається комплексом технологічних параметрів, які впливають на інтенсивність тепломасообміну,

рівномірність видалення вологи та якість кінцевої продукції. Контроль цих параметрів є ключовою умовою стабільної роботи сушильного комплексу та досягнення оптимальних енергетичних показників [7].

Температура теплоносія є основним керованим параметром процесу сушіння. Від її значення залежить швидкість випаровування вологи, рівномірність прогрівання зерна та ризик термічного пошкодження продукту. Підвищені температури прискорюють видалення вологи, однак можуть спричинити розтріскування зернівки, погіршення хлібопекарських властивостей, зниження схожості насіннєвого матеріалу та втрати маси. Низькі температури, навпаки, уповільнюють процес, збільшують тривалість сушіння й підвищують енергоспоживання. Тому температурні режими встановлюються з урахуванням культури, її початкової вологості та призначення (харчове зерно, фуражне, насіннєве) [7].

Вологість зерна на вході та виході є другим ключовим фактором, що визначає оптимальність режиму сушіння. Висока початкова вологість потребує зниження продуктивності та більш інтенсивних режимів теплопідведення, тоді як пересушене зерно втрачає товарні властивості та призводить до перевитрати енергії. Постійний контроль вологості дозволяє регулювати тривалість циклу, уникати локального перегріву та забезпечувати задані характеристики кінцевого продукту [7].

Витрата та швидкість повітря визначають інтенсивність тепломасообміну у шахтних, барабанних та рециркуляційних сушарках. Збільшення швидкості теплоносія підвищує ефективність випаровування, проте надмірні потоки можуть спричинити нерівномірність сушіння, винесення дрібних частинок і зростання аеродинамічних втрат. Оптимальне значення витрати повітря залежить від конструкції сушильної камери, товщини шару зерна та фізико-механічних характеристик культури [7].

Рівномірність розподілу повітряних потоків у поперечному перерізі сушильного каналу безпосередньо впливає на однорідність сушіння. У разі порушення рівномірності утворюються «холодні зони», де зерно

підсушується недостатньо, і «гарячі зони», де можливе його перегрівання. Для вирівнювання повітряного потоку застосовують спеціальні розподільники, оптимізовану геометрію повітряних каналів, а також системи автоматичного балансування тиску [7].

Час перебування зерна в сушильній камері визначається швидкістю руху зернового потоку, конструкцією робочих органів та інтенсивністю перемішування. Збільшення тривалості перебування сприяє більш глибокому видаленню вологи, однак знижує продуктивність сушарки. Занадто короткий час призводить до недосушування та необхідності повторного пропуску зерна через установку. У сучасних сушарках цей параметр регулюється частотними перетворювачами, автоматизованими заслінками та датчиками рівня зерна [7].

Таким чином, технологічні параметри сушіння утворюють взаємопов'язану систему, де зміна одного показника впливає на інші. Підтримання їх у оптимальних межах забезпечує високу якість обробки, мінімізацію питомих витрат енергії та стабільну роботу обладнання. Автоматизовані системи контролю дозволяють у режимі реального часу коригувати режими сушіння, реагувати на коливання вхідних характеристик зернової маси та забезпечувати прогнозовані результати незалежно від зовнішніх умов [7].

1.4 Недоліки традиційних систем керування сушильними агрегатами

Застарілі системи керування зерносушильними комплексами характеризуються обмеженими можливостями автоматизації та високою залежністю від дій оператора. Значна частина процесів виконується вручну, що підвищує ймовірність помилок та ускладнює стабільне підтримання параметрів сушіння. Однією з ключових проблем таких систем є низька точність вимірювальних вузлів, які часто використовують датчики застарілого типу з обмеженою роздільною здатністю та нестабільністю

показань при зміні температури або запиленості. У результаті оператор отримує неточні дані щодо температури, вологості та витрати повітря, що унеможлиблює адекватне керування процесом у режимі реального часу.

Відсутність автоматичної корекції технологічних режимів ще більше ускладнює роботу обладнання. Коли параметри сушіння змінюються через коливання вологості вхідної маси, нестабільність тяги або роботу пальників, застарілі системи не реагують на це автоматично. Вони не можуть компенсувати інерційність процесу, а всі дії з коригування температури, швидкості вентиляторів чи продуктивності транспортерів виконуються вручну. Це спричиняє значні відхилення від заданих режимів, збільшення ймовірності перегріву або недосушування зерна та загальне зниження продуктивності [8].

Інерційність технологічного процесу у старих сушильних комплексах проявляється особливо гостро. Нерівномірне нагрівання теплоносія, нестабільність подачі палива, різна тепловіддача окремих секцій сушильної камери та відсутність синхронізації роботи вентиляторів створюють «хвилеподібний» режим сушіння. Це призводить до виникнення зон перегріву та зон з недостатньою кількістю тепла, що знижує однорідність кінцевої вологості зерна. Нагрівачі й вентилятори у застарілих установках працюють без координованого керування, а їхнє регулювання здебільшого зводиться до двопозиційного принципу «увімкнути/вимкнути», що є низькоефективним і енерговитратним.

Окремою проблемою є повна відсутність системи архівації даних та оперативної сигналізації відхилень. Без журналу подій і історії параметрів неможливо аналізувати реальну роботу сушарки, визначати причини аварійних ситуацій чи оптимізувати режими сушіння. Немає також інструментів для віддаленого моніторингу, що унеможлиблює впровадження сучасних методів технічної діагностики та енергетичного аудиту. У комплексі це призводить до перевитрат палива, підвищеного зношування

обладнання та нестабільної якості готової продукції, що суттєво погіршує ефективність виробничого процесу [8].

1.5 Сучасні вимірювальні засоби для автоматизації сушіння зерна

Новітні технології контролю та вимірювання, що впроваджуються у сучасні зерносушильні комплекси, істотно підвищують точність моніторингу параметрів та забезпечують можливість автоматичного регулювання режимів у реальному часі. Одним із ключових напрямів розвитку є застосування високоточних датчиків вологості. Ємнісні датчики, такі як Primex, функціонують на основі зміни діелектричної проникності зернової маси залежно від її вологості. Вони забезпечують стабільні показники навіть у складних умовах підвищеної запиленості та вібрації, що суттєво розширює можливості їх використання у промислових сушарках.

Не менш важливими є мікрохвильові датчики вологості, зокрема Hydronix Hydro-Probe ХТ[13], які здійснюють вимірювання на основі взаємодії електромагнітної хвилі з матеріалом. На відміну від традиційних методів, такі прилади практично не залежать від зміни температури, щільності зернового шару чи швидкості його руху. Це дозволяє отримувати точні дані під час безперервної подачі зерна, що є критично важливим для алгоритмів автоматичного керування.

Високоточні цифрові температурні датчики з функцією калібрування забезпечують мінімальну похибку вимірювання та дозволяють контролювати температуру в різних зонах сушильної камери, теплогенератора та каналів подачі повітря. Завдяки цьому система може виявляти локальні перегріву або холодні зони та миттєво коригувати параметри сушіння.

Контроль аеродинамічних параметрів здійснюється за допомогою датчиків швидкості та витрати повітря, що входять у замкнені контури регулювання. Отримані значення дозволяють адаптивно змінювати роботу вентиляторів, стабілізувати подачу теплоносія та забезпечувати рівномірний розподіл повітряних потоків по висоті та ширині шахти.

У поєднанні ці засоби вимірювання формують інтелектуальну систему збору даних і дозволяють реалізовувати складні ПДД-алгоритми, що автоматично підтримують необхідні технологічні параметри. Це забезпечує стабільність режимів сушіння, мінімізацію енергоспоживання та досягнення однорідної кінцевої вологості зерна, що є визначальним для сучасних елеваторних комплексів [9].

1.6 Тенденції розвитку автоматизованих систем керування сушильними комплексами

Розвиток автоматизованих систем керування сушильними комплексами (АСУТП) визначає сучасний напрям модернізації елеваторної інфраструктури. Сучасні технологічні рішення спрямовані на підвищення ефективності використання енергоресурсів, стабільність технологічних режимів та мінімізацію впливу людського фактора. Однією з ключових тенденцій є повна інтеграція сушарок у SCADA-системи, що забезпечує централізований контроль усіх технологічних параметрів, можливість архівації даних, формування звітів та оперативне реагування на відхилення. Такий підхід дозволяє не просто моніторити процес, а й проводити аналітику у довгостроковій перспективі, застосовуючи алгоритми машинного навчання або статистичної оптимізації для покращення режимів сушіння.

Іншим важливим напрямом розвитку є впровадження адаптивних алгоритмів регулювання, здатних коригувати налаштування в реальному часі залежно від вологості вхідної сировини, температури зовнішнього повітря та коливань у роботі теплогенератора. Такі алгоритми особливо актуальні для сушарок із високою інерційністю, де зміни у режимах відбуваються із затримкою, а ручне регулювання не забезпечує необхідної точності. Використання адаптивного ПДД- та каскадного регулювання дає можливість мінімізувати енергоспоживання і досягати рівномірного видалення вологи по всьому об'єму зернової маси.

Окрему увагу приділено оптимізації режимів сушіння з урахуванням погодних умов, зокрема температури та вологості зовнішнього повітря. Сучасні алгоритми здатні автоматично змінювати витрату повітря, продуктивність вентиляторів та інтенсивність нагрівання з урахуванням атмосферних параметрів. Це дозволяє адаптувати процес сушіння до змін кліматичних умов і зменшити витрати теплової енергії у міжсезоння.

Зростає роль енергоефективних рішень, таких як рекуперація тепла відпрацьованого повітря, ізоляція сушильної камери та застосування пальників із модуляцією потужності. Використання цих технологій дає можливість суттєво знизити питомі витрати газу або біопалива, забезпечуючи рентабельність сушильного процесу.

Важливою тенденцією є розвиток дистанційного моніторингу та керування, який ґрунтується на використанні промислових мережевих технологій та інтернет-платформ. Оператор може відстежувати роботу сушарки з будь-якої точки, своєчасно отримувати повідомлення про аварійні ситуації та коригувати режими у віддаленому режимі. Це підвищує мобільність персоналу і знижує ризики, пов'язані з відсутністю постійного нагляду.

Сучасні АСУТП базуються на використанні надійних промислових контролерів, зокрема Siemens S7-1200, WAGO, Schneider Modicon та інших високопродуктивних платформ, які забезпечують функціонування складних алгоритмів, взаємодію з великою кількістю датчиків і можливість розширення системи. Контролери такого класу підтримують різні промислові протоколи (Modbus TCP, Profinet, EtherCAT), що полегшує інтеграцію сушарки з іншими технологічними об'єктами елеваторного комплексу.

Згідно з результатами сучасних досліджень, впровадження повноцінної автоматизації дозволяє зменшити енергоспоживання на 15–25%, а також суттєво скоротити втрати, пов'язані з недосушуванням або пересушуванням

зерна - до 30%, що підтверджує високу ефективність інтелектуальних систем керування і доцільність їх застосування у промислових масштабах [10].

1.7 Висновки

У першому розділі проведено комплексний аналіз технологічного процесу сушіння зерна, сучасних конструкцій сушильного обладнання та тенденцій розвитку систем автоматизованого керування. Встановлено, що процес сушіння є ключовим етапом післязбиральної доробки та значною мірою визначає якість, збереженість і рентабельність продукції елеваторного комплексу. Його ефективність залежить від інтенсивності тепломасообміну, рівномірності видалення вологи та здатності підтримувати стабільні температурні режими для запобігання термічним ушкодженням зерна.

Проаналізовано основні типи промислових сушарок - шахтні, барабанні, рециркуляційні, баштові, стрічкові та пневматичні, які різняться конструктивними особливостями, напрямками руху теплоносія, рівнем механічного впливу на зернову масу та енергоефективністю. Показано, що сучасні сушильні агрегати орієнтовані на підвищення продуктивності, рівномірності сушіння та скорочення тепловтрат, зокрема за рахунок застосування теплоізоляції, рекуперації енергії та оптимізації конструкції повітряних каналів.

Окрему увагу приділено аналізу технологічних параметрів, що визначають стабільність процесу сушіння: температурі теплоносія, вологості на вході та виході, витраті повітря, рівномірності його розподілу та часу перебування зерна в сушильній камері. Підтримання цих параметрів у заданих межах є основою для досягнення високої якості продукції, зменшення питомих витрат енергії та забезпечення довготривалого зберігання зерна.

Проведений огляд показав, що застарілі системи керування мають низку суттєвих недоліків: низьку точність вимірювань, великий вплив

людського фактора, обмеженість у регулюванні режимів і відсутність механізмів автоматичної корекції. Це призводить до нестабільної роботи сушарки, надмірного споживання енергії та зниження якості зерна. У протиположності цьому сучасні вимірювальні технології - мікрохвильові, ємнісні та цифрові датчики, датчики витрати повітря - забезпечують високоточний моніторинг параметрів у реальному часі та створюють передумови для застосування складних алгоритмів автоматичного регулювання.

Аналіз тенденцій розвитку автоматизованих систем керування засвідчив, що сучасні АСУТП орієнтуються на повну інтеграцію в SCADA-системи, застосування адаптивних та інтелектуальних алгоритмів, дистанційний моніторинг, підвищення енергоефективності та використання промислових контролерів нового покоління. За результатами досліджень, впровадження таких систем дає можливість знизити витрати енергії на 15–25% та зменшити втрати від нестабільного сушіння до 30%, що підкреслює їхню практичну ефективність.

Таким чином, результати аналізу підтверджують, що сучасні тенденції у сфері сушіння зерна спрямовані на модернізацію обладнання, підвищення точності вимірювань та впровадження високорівневих автоматизованих систем керування. Це створює підґрунтя для розробки конкурентоспроможних технічних рішень у наступних розділах роботи, де буде обґрунтовано вибір структури АСУТП та розроблено алгоритми керування для підвищення ефективності роботи сушарки та всього елеваторного комплексу.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ АСУТП ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ СУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

2.1 Аналіз технологічного процесу сушіння зерна та його параметрів

Ефективність функціонування автоматизованої системи керування сушильним комплексом визначається розумінням фізико-технічної природи тепло- та масообмінних процесів, які відбуваються всередині зернової маси під час її обробки нагрітим агентом сушіння. Зерно є капілярно-пористою біологічною структурою, що містить як вільну, так і зв'язану вологу; тому механізми її видалення формуються під одночасним впливом температурних та дифузійних градієнтів [14].

На рисунку 2.1 детально показано загальну схему тепло- та масообміну між агентом сушіння й зерновою масою.

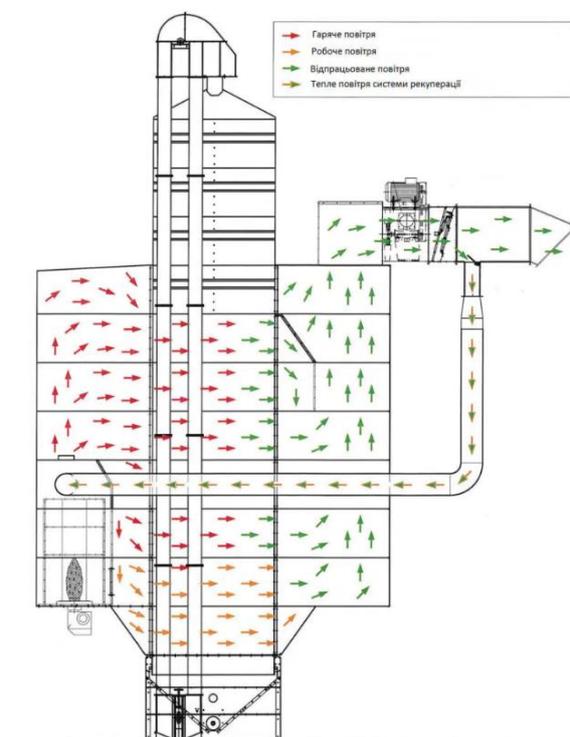


Рисунок 2.1 – Схема процесу тепло- та масообміну між агентом сушіння і зерновою масою

Характерною особливістю процесу є те, що тепло від теплоносія надходить до поверхні зерна, після чого внутрішня волога починає переміщуватися до периферії та випаровуватися.

У процесі сушіння задіяні одночасно два фундаментальні явища: перенесення теплоти та переміщення вологи. На початковому етапі тепло передається зерну конвективним шляхом від гарячого повітря, а згодом поширюється по тілу зернини за рахунок теплопровідності. Вода, що міститься у внутрішніх клітинах, дифундує до поверхні, звідки випаровується у повітряний потік. Така багаторівнева взаємодія визначає нелінійність та інерційність об'єкта керування .

Поведінку теплових процесів описують диференціальні рівняння теплопереносу, зокрема узагальнене рівняння теплопередачі:

$$Q = k_T \cdot F \cdot \Delta t \cdot \tau, \quad (2.1)$$

де $k_T = f(\lambda, \alpha)$ – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м² · К);

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · К);

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² · К);

Δt – різниця температур;

F – площа поверхні теплообміну;

τ – час, с.

Це співвідношення дозволяє оцінити кількість теплоти, що надходить до зернового шару від агента сушіння. Підвищення температури або збільшення швидкості повітря сприяє інтенсифікації випаровування, однак надмірні значення температури можуть порушувати структурні властивості зерна та погіршувати його якість, що особливо суттєво для насінневого матеріалу.

Масообмін під час сушіння характеризується рівнянням:

$$-\frac{dW^c}{d\tau} = k \cdot (W^c - W_p^c), \quad (2.2)$$

де $k = f(\alpha_{з.м.}, \alpha_{в.диф})$ – коефіцієнт сушіння, c^{-1} ;

$\alpha_{з.м.}$ – коефіцієнт зовнішнього масообміну, m^2/c (функція парціального тиску);

$\alpha_{в.диф}$ – коефіцієнт внутрішньої дифузії, m/c (функція температури нагрівання зерна).

Рівняння (2.1) - (2.2) дозволяють побудувати адекватну модель температурно-вологісних процесів, необхідну для подальшого вибору датчиків, регуляторів та логіки алгоритмічного керування [15].

2.2 Засоби вимірювання вологості та температури в системі керування сушаркою

Стабільність технологічного процесу сушіння напряму залежить від точності, швидкодії та надійності вимірювальних засобів, які забезпечують формування коректних сигналів для системи автоматичного регулювання. У рамках даної роботи наукова новизна полягає у впровадженні мікрохвильового сенсора Hydro-Mix ХТ виробництва Hydronix Ltd як основного датчика вологості у потокових умовах роботи зерносушильного комплексу. На відміну від традиційних ємнісних та термогравіметричних методів, мікрохвильовий принцип вимірювання забезпечує суттєво вищу точність за змін фізичних характеристик матеріалу, що є критично важливим у реальних виробничих умовах.

На рисунку 2.2 наведено зовнішній вигляд датчика Hydro-Mix ХТ, конструкція якого передбачає посилений робочий елемент зі зносостійкого карбиду вольфраму. Це дозволяє датчику працювати у середовищі з високим абразивним навантаженням та забезпечує його тривалий ресурс. Як продемонстровано на рисунку 2.3, сенсор встановлюється безпосередньо у зоні транспортування зерна, що забезпечує безперервний контроль вологості у потоці та усуває затримки, характерні для лабораторних або вибіркових

вимірювань. При такому розміщенні мінімізується вплив ущільнення матеріалу та забезпечується репрезентативність вимірюваної проби.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд мікрохвильового датчика вологості Hydro-Probe XT (Hydronix Ltd)

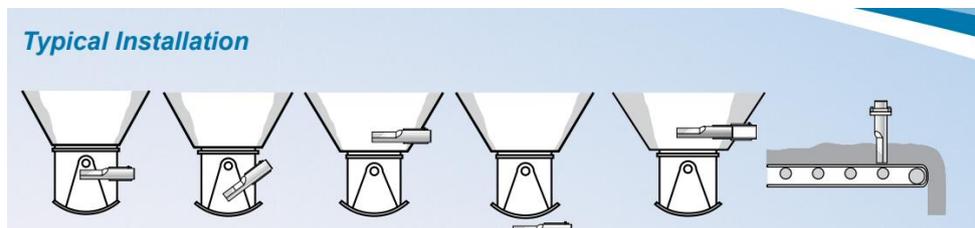


Рисунок 2.3 – Встановлення датчика Hydro-Mix XT у технологічній лінії

Особливу увагу виробник приділяє правильному монтажу сенсора у технологічну лінію. На рисунку 2.4 наведено рекомендований кут орієнтації датчика, що запобігає частковому перекриттю робочої поверхні зерновою масою або виникненню «мертвих зон». Дотримання рекомендацій щодо монтажу суттєво підвищує повторюваність результатів та дозволяє мінімізувати похибку під час роботи з різними культурами.

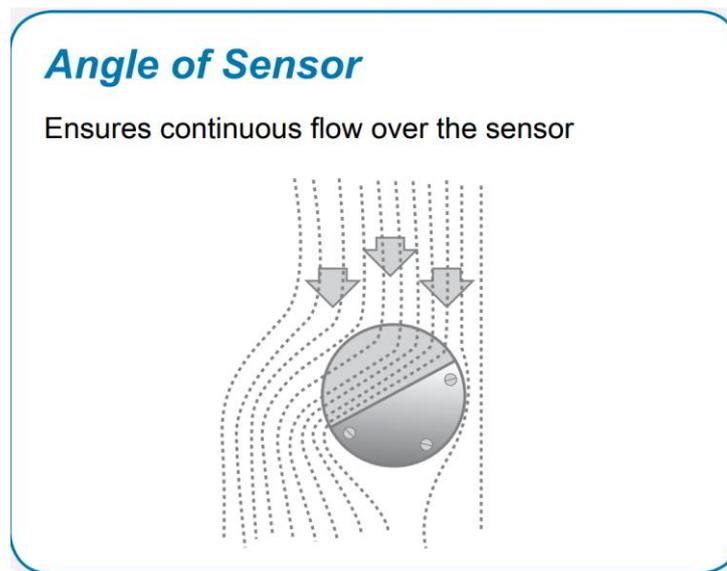


Рисунок 2.4 – Кут установлення сенсора для забезпечення безперервного потоку матеріалу над поверхнею вимірювання (Hydronix Ltd)

Принцип дії Hydro-Mix XT базується на аналізі зміни частоти та амплітуди мікрохвильового сигналу, що проходить через зернову масу. Залежність цих параметрів від вологості матеріалу наведено на рисунку 2.5. На відміну від поверхневих методів, мікрохвильовий аналіз забезпечує оцінювання об'ємної вологості, що дозволяє отримувати значно точніші результати у випадках неоднорідної структури потоку або наявності різних фракцій.

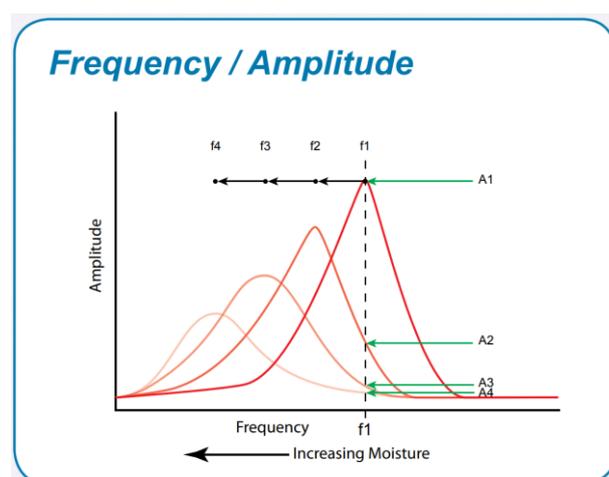


Рисунок 2.5 – Залежність частоти та амплітуди мікрохвильового сигналу від вологості матеріалу (Hydronix Ltd)

Для проведення порівняльного аналізу також розглянуто ємнісний датчик Primex 80, який належить до більш традиційних рішень для контролю вологості зернових матеріалів. Хоча такі сенсори є доступнішими та простішими в інтеграції, їх точність залежить від температури, щільності та гранулометричного складу матеріалу, що знижує відтворюваність вимірювань у динамічних умовах потокового сушіння. У зв'язку з цим мікрохвильові сенсори мають суттєві переваги, особливо при роботі у високопродуктивних сушильних системах [16].

Для контролю температури агента сушіння та зернової маси застосовано термоперетворювачі опору Pt100, зображені на рисунку 2.6. Їх конструкція забезпечує високу стабільність, лінійність та точність у широкому температурному діапазоні, що робить їх оптимальними для роботи з високотемпературними режимами, характерними для шахтних і барабанних сушарок. Поєднання температурних і вологостних вимірювальних каналів дозволяє реалізувати алгоритми компенсації та адаптивного керування.



Рисунок 2.6 – Термоперетворювачі опору Pt100

Технічні характеристики мікрохвильового датчика Hydro-Mix ХТ наведено в таблиці 2.1. Аналіз параметрів вказує, що прилад має розширений температурний діапазон роботи, підтримує високий ступінь захисту IP68 та

володіє широким набором інтерфейсів для інтеграції у промислові системи автоматизації. Важливою перевагою є частота оновлення до 25 вимірювань за секунду, що дозволяє відстежувати швидкі зміни у складі матеріалу та реалізовувати алгоритми високодинамічного регулювання.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики мікрохвильового датчика Hydro-Mix XT

Параметр	Значення
Тип сенсора	Мікрохвильовий сенсор вологості в реальному часі
Призначення	Вимірювання вологості у змішувальних процесах (бетон, зерно, комбікорм, сипучі матеріали)
Діапазон вимірювання вологості	0...100% (залежить від матеріалу)
Точність	До $\pm 0,2\%$ (після калібрування під конкретний матеріал)
Метод вимірювання	Патентований метод мікрохвильового аналізу об'ємної вологості
Матеріал робочої поверхні	Надміцний зносостійкий карбід вольфраму
Живлення	15...30 VDC
Споживаний струм	< 200 mA
Інтерфейси зв'язку	RS485 (Modbus), 4–20 mA, 0–10 V
Температурний діапазон роботи	-20...+70 °C
Температура поверхні матеріалу (максимум)	До 80–90 °C
Герметичність / Захист	IP68
Монтаж	Фланцеве кріплення в стінку змішувача/каналу
Робочий тиск	До 5 бар
Частота оновлення даних	До 25 вимірювань/сек

Таблиця 2.2 містить результати порівняння характеристик датчиків Hydro-Mix XT та Primex 80 [14]. Проведений аналіз засвідчив істотні відмінності у точності, швидкодії, стійкості до температурних коливань та механічних впливів. Hydro-Mix XT демонструє високу метрологічну стабільність та здатність працювати у складних умовах змішування або

інтенсивного транспортування, тоді як Primex 80 [14] є оптимальним для ліній із меншою швидкістю пропуску матеріалу.

Таблиця 2.2 – Порівняння датчиків Hydro-Mix XT та Primex 80

Параметр	Hydro-Mix XT (Hydronix)	Primex 80 (Primex Sensors)
Тип сенсора	Мікрохвильовий сенсор вологості для змішувачів та конвеєрів	Мікрохвильовий сенсор вологості для сипучих матеріалів
Призначення	Контроль вологості в режимі реального часу у змішувачах, млинах, конвеєрах	Контроль вологості зерна, комбікорму, сипучих продуктів
Діапазон вимірювання вологості	0–100% (залежно від матеріалу)	5–45% (типово для зернових матеріалів)
Точність вимірювання	До $\pm 0,2\%$ після калібрування	$\pm 0,5 \dots 1,0\%$ в залежності від матеріалу
Метод вимірювання	Об'ємний мікрохвильовий аналіз	Двочастотний мікрохвильовий метод
Робочий температурний діапазон	$-20 \dots +70$ °C	$-10 \dots +60$ °C
Макс. температура матеріалу	До 80–90 °C	До 60 °C
Матеріал робочої поверхні	Карбід вольфраму (високий зносостійкий ресурс)	Нержавіюча сталь / полімер
Ступінь захисту	IP68	IP67
Живлення	15–30 VDC	12–24 VDC
Інтерфейси виходу	RS485 (Modbus), 4–20 mA, 0–10 V	RS485 (Modbus), 4–20 mA
Частота оновлення даних	До 25 вимірювань/сек	До 10 вимірювань/сек
Монтаж	Фланцевий монтаж у стінку змішувача або каналу	Монтаж у жолобах, транспортерах, накопичувачах
Особливості	Висока точність, стабільність, стійкість до зношування	Доступніший варіант, простіша інтеграція
Сфера оптимального застосування	Високоточні технологічні лінії, змішувачі, комбікормові та бетонні заводи	Елеватори, зерносховища, лінії транспортування зернових

Порівняльний аналіз технічних характеристик мікрохвильових датчиків Hydro-Mix XT (Hydronix) та Primex 80 засвідчив, що перший прилад забезпечує більш високий рівень метрологічної точності, стабільності вимірювання та придатності до роботи в умовах змінних технологічних навантажень. З урахуванням вимог до автоматизованої системи керування, зокрема потреби у точному контролі вологості матеріалу в реальному часі, вибір датчика Hydro-Mix XT є технічно обґрунтованим.

Передусім, датчик Hydro-Mix XT реалізує об'ємний мікрохвильовий метод вимірювання, що характеризується високою точністю та низькою залежністю результатів від зміни гранулометричного складу або щільності матеріалу. У порівнянні з ним, датчик Primex 80 застосовує двочастотний метод, чутливість якого до зовнішніх факторів є вищою, що може призводити до збільшення похибки під час роботи з різними видами сипучих продуктів.

Крім того, конструктивне виконання Hydro-Mix XT із застосуванням зносостійких матеріалів (зокрема карбиду вольфраму) забезпечує можливість його використання у змішувальних апаратах та обладнанні, де присутні ударні та абразивні навантаження. Датчик Primex 80 конструктивно орієнтований на використання у транспортних або накопичувальних системах, що обмежує його застосування в умовах інтенсивного механічного впливу.

Важливим аргументом є також розширений температурний діапазон роботи Hydro-Mix XT, а також можливість контролю матеріалів із підвищеною температурою. Це дозволяє інтегрувати датчик у технологічні процеси, що супроводжуються нагріванням або різкими змінами температурних параметрів. У випадку Primex 80 такі можливості є обмеженими, що зменшує сферу його застосування.

З погляду інтеграції у систему автоматизованого керування, Hydro-Mix XT підтримує набір стандартних інтерфейсів (Modbus RTU, 4–20 мА, 0–10 В) та забезпечує високу частоту оновлення даних. Це важливо для побудови

адаптивних алгоритмів регулювання, які потребують оперативного отримання актуальних значень вологості. Пропускна здатність і швидкодія Primeх 80 є нижчими, що може бути критичним у швидкоплинних процесах.

Таким чином, з урахуванням технічних, конструктивних та експлуатаційних характеристик, датчик Hydro-Mix XT є більш придатним для використання у складі автоматизованої системи керування технологічним процесом, де необхідне високоточне, стабільне та оперативне вимірювання вологості матеріалу.

2.3 Інтеграція вимірювальних засобів у систему керування

Однією з вимог до сучасних систем автоматизації є забезпечення стійкого та надійного каналу комунікацій між датчиками та контролером. На рисунку 2.7 детально показано структуру взаємодії сенсорів і ПЛК через протокол Modbus RTU. Як видно зі схеми, використання цього інтерфейсу дозволяє підключати до однієї лінії щонайменше 32 пристрої, зберігаючи стійкість до завад та високу надійність [18].

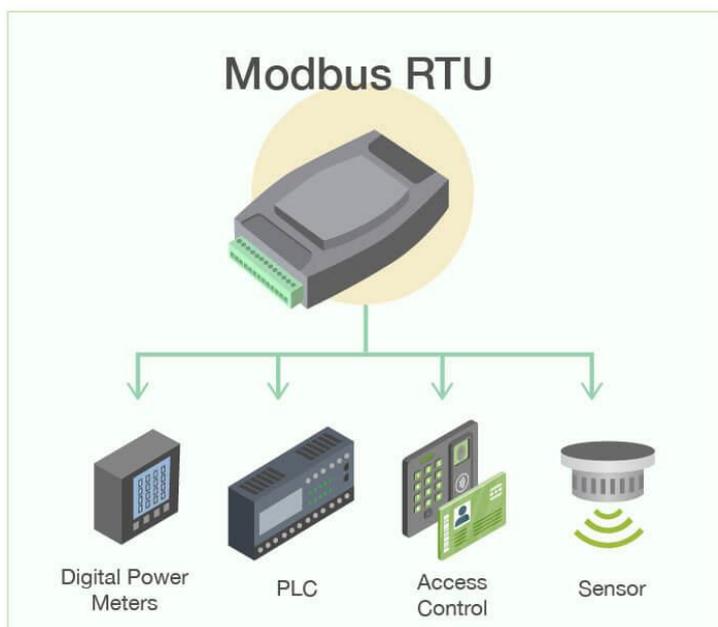


Рисунок 2.7 – Взаємодія сенсорів і контролера через інтерфейс Modbus RTU

Для моніторингу параметрів сушіння, формування архівів та аналізу роботи обладнання застосовується SCADA-система. На рисунку 2.8 наведено спрощену архітектуру SCADA-рішення, де видно взаємозв'язок між контролером, сервером, операторською станцією та системою історичних даних.

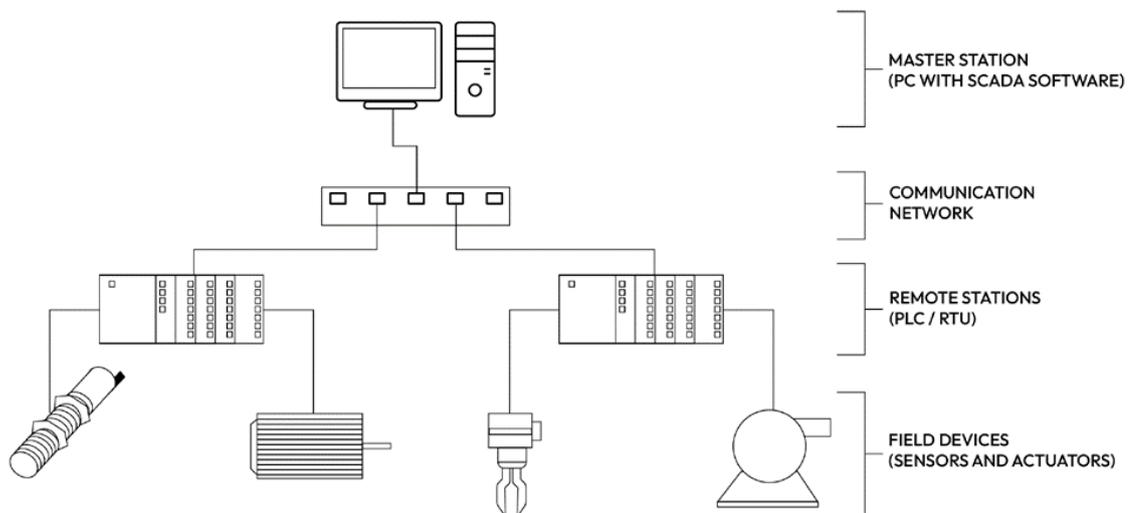


Рисунок 2.8 – Спрощена архітектура SCADA-системи для керування процесом сушіння зерна

2.4 Вибір програмованих логічних контролерів

Для реалізації АСУТП розглянуто два варіанти промислових контролерів - Schneider Electric Modicon M241 та Siemens SIMATIC S7-1200. На рисунку 2.9 наведено зовнішній вигляд контролера M241, який вирізняється наявністю двох інтерфейсів RS-485, підтримкою Modbus RTU/TCP та достатньою кількістю дискретних входів і виходів.



Рисунок 2.9 – Програмований логічний контролер
M241 24 вх/вих реле 2rs485

Контролер Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1211C). На рисунку 2.10 зображено контролер Siemens S7-1200 (CPU 1211C). Як продемонстровано на рисунку, контролер підтримує промислові протоколи Profinet, має високу надійність, розвинену систему модулів розширення та широкі можливості інтеграції з НМІ-панелями [19–20].

Це один із найпоширеніших контролерів у промисловій автоматизації.

Переваги:

- висока надійність;
- підтримка протоколів Profinet / Modbus;
- інтеграція НМІ;
- підтримка розширень (модулі температури, аналогових входів).



Рисунок 2.10 – Контролер Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1211C) – центральний елемент системи керування

У контролері реалізовано каскадні адаптивні ПД-регулятори, які автоматично коригують коефіцієнти залежно від зміни динаміки процесу. Це дозволяє компенсувати вплив інерційності зернової маси, затримок у тепломасообміні та коливань продуктивності сушарки [14]. Зовнішній контур вологості керує внутрішнім контуром температури через зміну уставки або швидкості руху матеріалу в сушильній шахті, що забезпечує стабільність режимів та запобігає пересушуванню або недосушуванню продукту.

Таблиця 2.3 – Порівняння контролерів M241 та Siemens S7-1200

Параметр	Schneider Modicon M241	Siemens S7-1200
Виробник	Schneider Electric	Siemens
Серія / клас	Modicon MachineStruxure	SIMATIC S7-1200
Призначення	Машинобудування, автономні системи керування, швидкі процеси	Промислові АСУ ТП, інтегровані системи, мережеві архітектури
Архітектура	Контролер із широкими можливостями розширення	Модульна архітектура з гнучким масштабуванням
Процесорна продуктивність	До 0,2 мкс/інстр. (швидкий цикл обробки руху)	Середня: ~1 мкс/інстр., пріоритет на надійність
ОЗП / Пам'ять програми	256–512 КБ	50–1000 КБ (залежно від CPU)

Продовження таблиці 2.3 – Порівняння контролерів M241 та Siemens S7-1200

Кількість локальних входів/виходів	14...38 I/O (залежно від моделі)	14...30 I/O (залежно від CPU)
Максимальна кількість розширень	До 14 модулів розширення	До 7 модулів розширення
Підтримка аналогових модулів	Є (AI, AO 0–10 В, 4–20 мА)	Є (AI, AO 0–10 В, 4–20 мА)
Комунікації Ethernet	Ethernet TCP/IP, Modbus TCP (вбудовано)	Profinet (вбудовано), Modbus TCP (через GATEWAY)
Підтримка Modbus RTU (RS485)	Є (вбудований порт)	Необхідний модуль CM 1241
Підтримка Profinet	Через додаткові модулі	Вбудовано за замовчуванням
Підтримка CANopen	Є	Відсутня
Підтримка Profibus	Через шлюз	Через CM 1243 або шлюз
Високошвидкісні входи (HSC)	6–8 каналів (100–200 кГц)	3–6 каналів (до 100 кГц)
Виходи для керування рухом (PTO/PWM)	4–6 каналів (до 200 кГц)	2–4 канали (до 100 кГц)
PID-регулятори	Вбудовані, до 16 каналів	Вбудовані, до 14 каналів
Мережеві протоколи	Modbus TCP/RTU, Ethernet/IP	Profinet, Modbus TCP, S7-комунікація
SCADA-сумісність	EcoStruxure Machine Expert, OPC UA	TIA Portal, WinCC, OPC UA (з CPU 1212/1214/1215 FW \geq 4)
Підтримка web-серверів	Повноцінний вбудований web-сервер	Спрощений web-сервер (залежить від моделі CPU)
Складність програмування	Середня	Низька–середня (більш інтуїтивне середовище TIA)
Мова програмування	IEC 61131-3: LD, ST, FBD, SFC, IL	IEC 61131-3: LD, FBD, SCL, S7-Graph
Живлення	24 VDC	24 VDC
Рівень надійності в промисловості	Високий	Дуже високий (стандарт де-факто)
Типові сфери застосування	Пакувальні машини, рухові системи, OEM	Промислові АСК, енергетика, СЕС, логістичні комплекси

Порівняльний аналіз технічних характеристик контролерів Schneider M241 та Siemens S7-1200, а також узгодження цих параметрів із кошторисною частиною проєкту, дає змогу зробити висновок про доцільність застосування в системі автоматизованого керування саме контролера серії Siemens S7-1200.

З огляду на вимоги АСУ ТП, що включають роботу з мікрохвильовим датчиком вологості Hydro-Probe XT[13], обробку аналогових сигналів, забезпечення надійної комунікації по Modbus та Profinet, а також інтеграцію зі SCADA-системою WinCC, контролер Siemens S7-1200 забезпечує необхідний баланс функціональності, масштабованості та промислової надійності. У кошторисній частині проєкту це підтверджується включенням центрального процесора 6ES7214-1AG40-0XB0 та низки спеціалізованих модулів вводу-виводу та зв'язку, що покривають потреби технологічного процесу: аналогові модулі, модулі дискретних входів/виходів, а також комунікаційний модуль для зовнішніх інтерфейсів.

Крім того, обрана апаратна платформа повністю сумісна з ліцензійним програмним забезпеченням WinCC, що дозволяє реалізувати повноцінну систему моніторингу та візуалізації технологічних параметрів. Вартісний аналіз підтверджує, що навіть за наявності додаткових витрат на SCADA-програму, периферійні модулі та робоче місце оператора, загальні капітальні витрати залишаються економічно обґрунтованими (795,12 тис. грн), відповідаючи вимогам щодо точності, надійності та довговічності системи.

Таким чином, у контексті заданих функціональних вимог і наведеної структури витрат, застосування контролера Siemens S7-1200 є технічно виправданим рішенням, забезпечує узгодженість усіх елементів системи та гарантує можливість подальшої модернізації та розширення АСУ ТП без суттєвих додаткових витрат.

2.5 Концептуальна архітектура автоматизованої системи керування сушильним комплексом

На основі проведеного аналізу побудовано концептуальну архітектуру автоматизованої системи керування. Мнемосхема, подана на рисунку 2.11, демонструє інтеграцію датчиків вологості, температури, виконавчих механізмів, пальнової установки, вентиляторів та контролера у єдину систему.

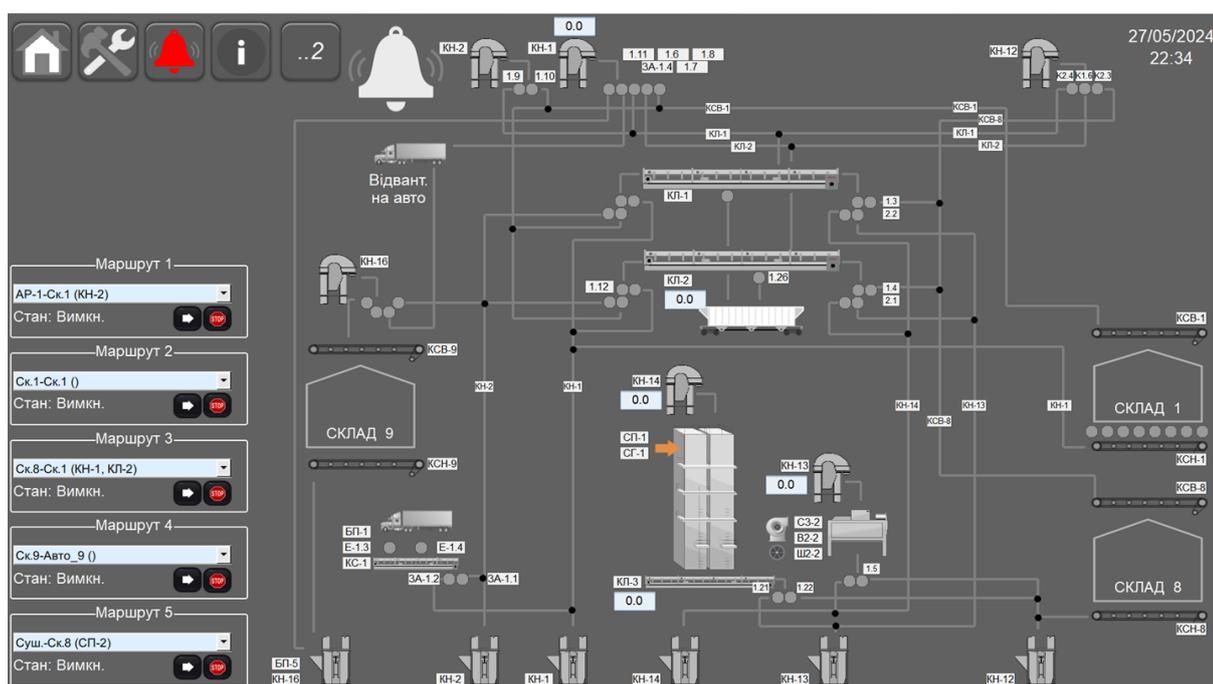


Рисунок 2.11 – Мнемосхема автоматизованої системи керування процесом сушіння зерна

Алгоритм функціонування системи наведено на рисунку 2.12. Як показано в алгоритмі, система виконує послідовний аналіз вимірних параметрів, формує керуючі впливи, контролює аварійні ситуації та забезпечує адаптацію режимів сушіння відповідно до вологості вхідного матеріалу та цільових параметрів.

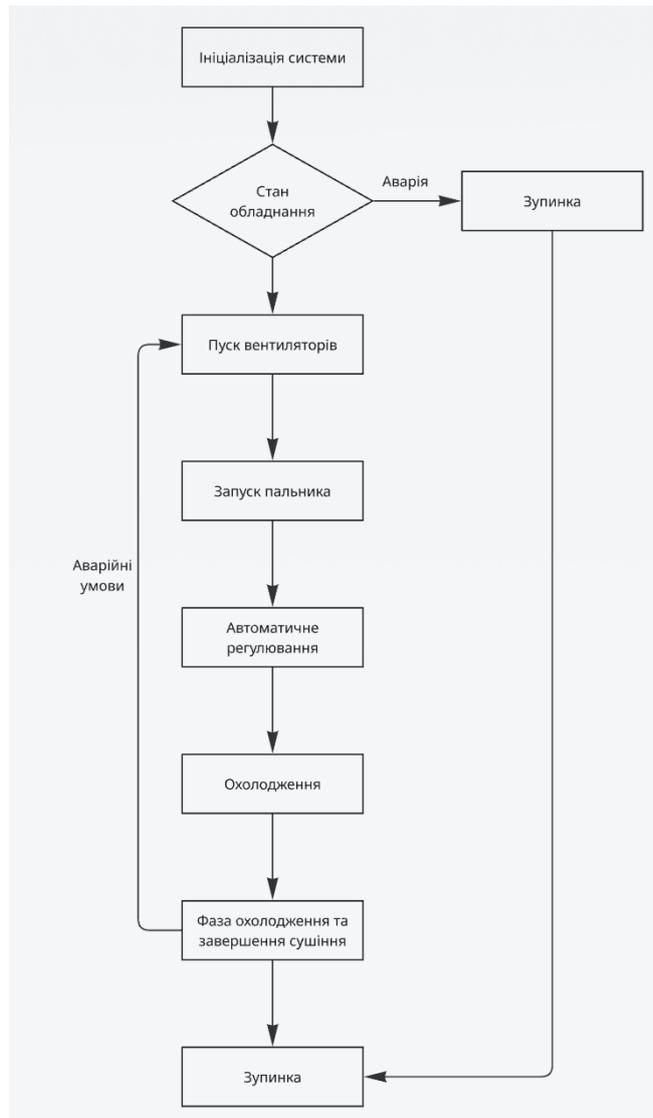


Рисунок 2.12 – Блок-схема алгоритму функціонування системи автоматизованого керування процесом сушіння зерна

У результаті автоматизації забезпечується підвищення енергоефективності, стабільність кінцевої вологості та зменшення впливу людського фактора.

2.6 Висновки

Проведений аналіз фізико-технічних процесів, вимірювальних засобів та комунікаційної інфраструктури дозволив обґрунтувати вибір ключових елементів АСУТП сушильного комплексу.

Застосування датчика Hydro-Mix ХТ забезпечує точність, швидкодію та стабільність процесу вимірювання вологості, а порівняння з Primex 80 підтверджує перевагу мікрохвильової технології для потокового сушіння.

Вибрані контролери Siemens S7-1200 та Schneider M241 забезпечують необхідний рівень надійності, а використання Modbus RTU/TCP та SCADA-системи дозволяє створити масштабовану й ефективну систему керування.

Як продемонстровано на рисунку 3.1, технологічний процес включає:

- вузли приймання зерна, що забезпечують завантаження матеріалу в лінію;
- зернові склади (Склад №1, Склад №2, Склад №3), кожен із власним комплектом норій та конвеєрів;
- перерозподільчі вузли, які направляють зерно у відповідні зони зберігання або обробки;
- ланцюгові та стрічкові транспортери, що забезпечують горизонтальне переміщення;
- норії (ковшові елеватори), що здійснюють вертикальне транспортування;
- сушильний комплекс, інтегрований у центральну частину схеми;
- вузли аспірації та очищення, що забезпечують санітарний та технологічний контроль;
- вузли відвантаження, що формують кінцеве переміщення готового продукту.

Структура дозволяє здійснювати гнучке маршрутизування матеріального потоку, забезпечує можливість одночасної роботи декількох потоків, а також створює умови для інтеграції вимірювальних засобів і виконавчих механізмів у систему керування. Таким чином, рисунок 3.1 є основою як для функціонального аналізу, так і для формування логіки алгоритмів АСУТП [23].

3.2 Функціональна схема автоматизованої системи керування сушильного комплексу

Функціональна схема визначає логічні зв'язки між технологічним обладнанням, вимірювальними засобами, контролером, виконавчими механізмами та системою безпеки. На рисунку 3.2 наведено функціональну схему АСУТП сушильного комплексу, яка відображає повний перелік

сигналів, маршрутів транспортування зерна та взаємодію елементів технологічної лінії.

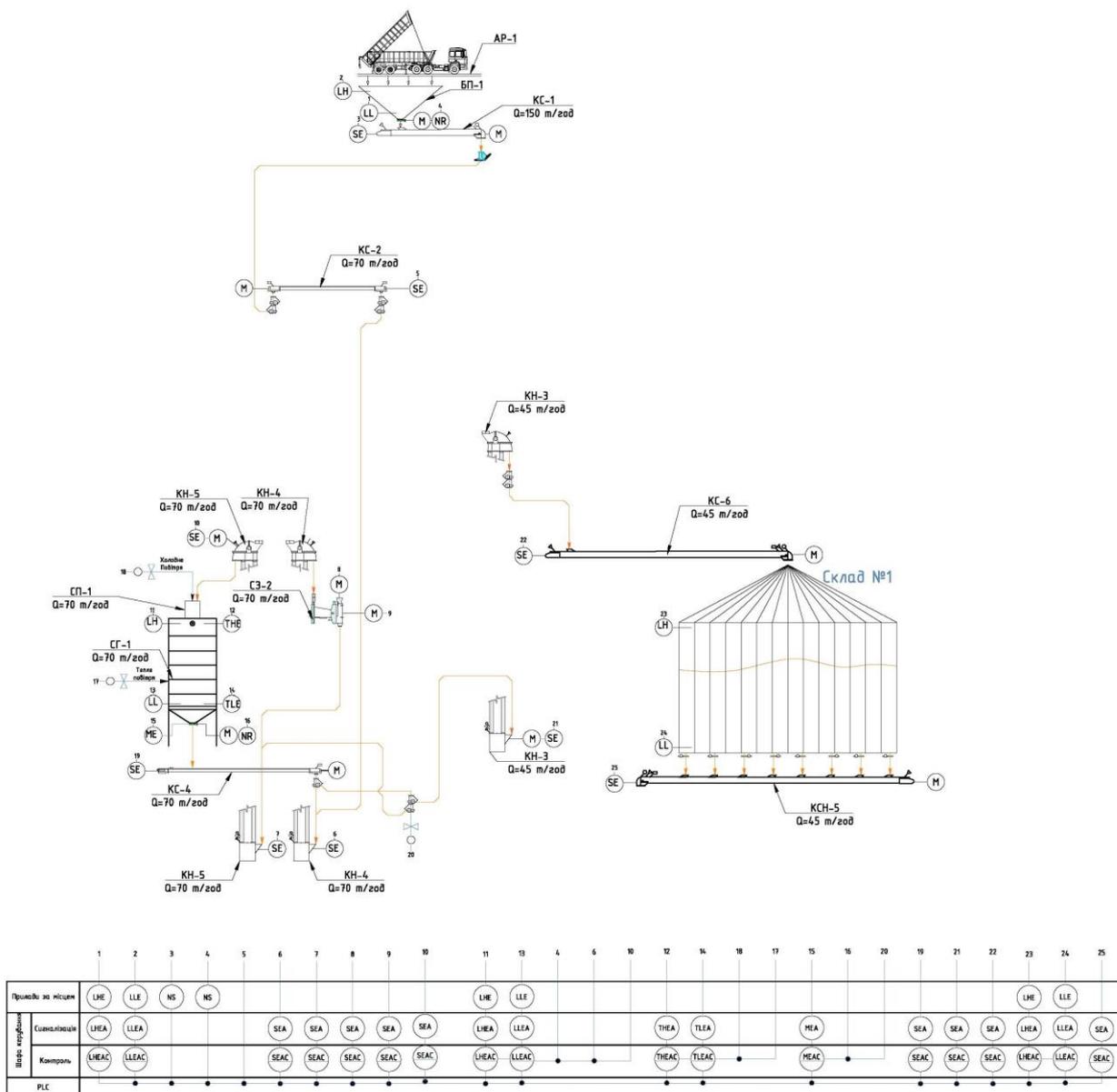


Рисунок 3.2 – Функціональна схема АСУТП сушильного комплексу

Як продемонстровано на рисунку 3.2, схема охоплює такі ключові технологічні вузли:

- зону приймання зерна (АП-1), обладнану датчиками контролю положення транспортера, вібраційними датчиками та виконавчими механізмами для керування заслінками;
- лінії транспортування, які включають ланцюгові транспортери (КС-1, КС-2, КС-3, КС-6, КС-7), кожен з яких оснащений датчиками стану,

аварійними кнопками (E-Stop), індуктивними або кінцевими вимикачами, що зчитуються ПЛК;

- норії (КН-1, КН-3, КН-4, КН-5), що забезпечують вертикальне переміщення зерна та містять набори датчиків контролю обертів, датчиків перевантаження та оптичних кінцевих вимикачів;

- бункерні вузли та пересипні точки (СГ-1, СГ-2, СП-1), які містять датчики рівня зерна (верхнього та нижнього) й забезпечують контроль завантаження;

- сушильний апарат (СГ-1–СГ-2 зона сушіння), який працює у зв'язці з палинковим пристроєм, вентиляторами та датчиками температури;

- склади готової продукції (Склад №1) та відповідні лінії подачі і засувки для розподілу потоків зерна.

Особливу увагу у схемі приділено:

- логіці міжблокувань, які не допускають запуск норій і конвеєрів без послідовного технологічного дозволу;

- сигналам аварійної зупинки, що дублюються по всій лінії;

- контролю стану приводів, включаючи теплові реле, захист від заклинювання та перевантаження;

- системі вимірювання технологічних параметрів, які передаються до центрального контролера (ПЛК).

У нижній частині рисунка 3.2 наведено матрицю сигналів, яка відображає:

- входи контролера: датчики рівня (LLE, LLA), аварійні сигнали (SEA, SAC), сигнали стану приводів;

- виходи контролера: керування пускачами, електроприводами заслінок, мотор-редукторами та тепловими реле;

- сигнали в SCADA: стан всіх вузлів та аварій.

Як видно з рисунка 3.2, функціональна схема організована таким чином, що кожен елемент технологічної лінії має:

- повну діагностику стану,

- силовий автоматичний вимикач;
- теплове реле;
- магнітний пускач;
- коло «Пуск–Стоп»;
- аварійний вимикач;
- сигнальні контакти для передавання інформації до ПЛК.

На рисунку 3.4 продемонстровано фрагмент кола керування, де реалізовано затримки пуску, блокування самопуску, аварійні сценарії та логіку перезапуску після відновлення живлення.

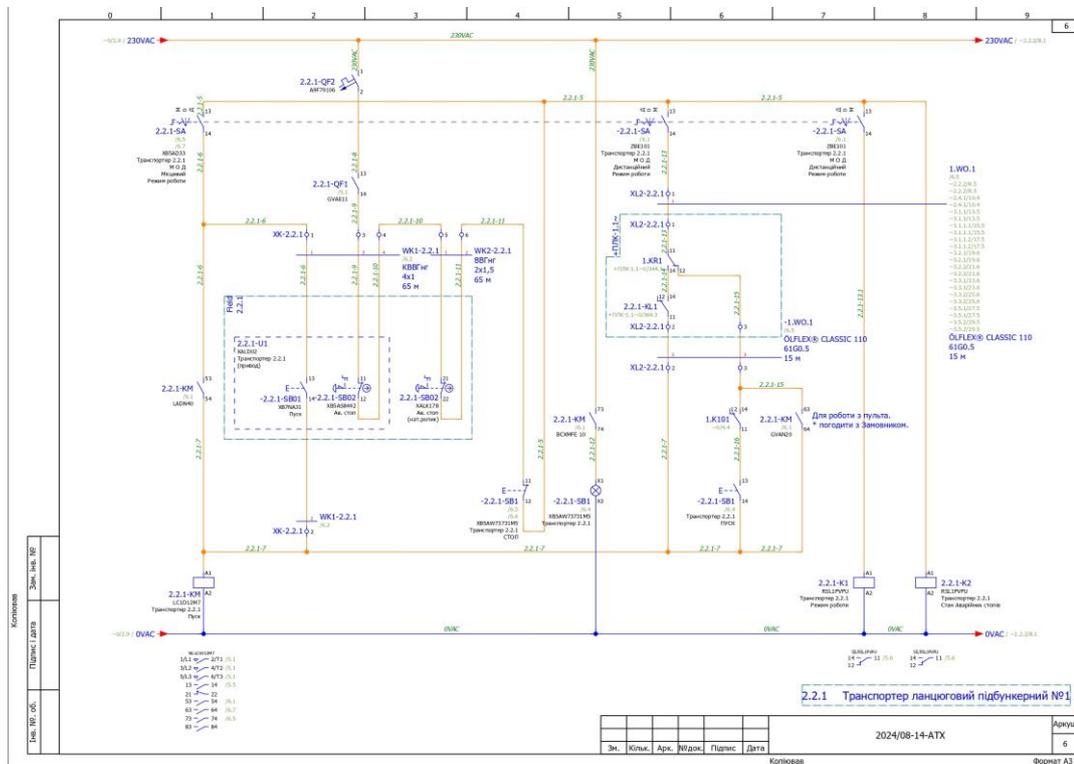


Рисунок 3.4 – Фрагмент схеми кола керування з реалізацією режимів пуску та аварійного зупину

Схема відповідає вимогам електробезпеки та стандартам побудови промислових систем керування [25].

3.4 Кабельний журнал і схема підключення клем шафи керування

Кабельний журнал дозволяє здійснювати трасування всіх електричних ліній між обладнанням і шафою керування. На рисунку 3.5 наведено фрагмент кабельного журналу 1ШУ.

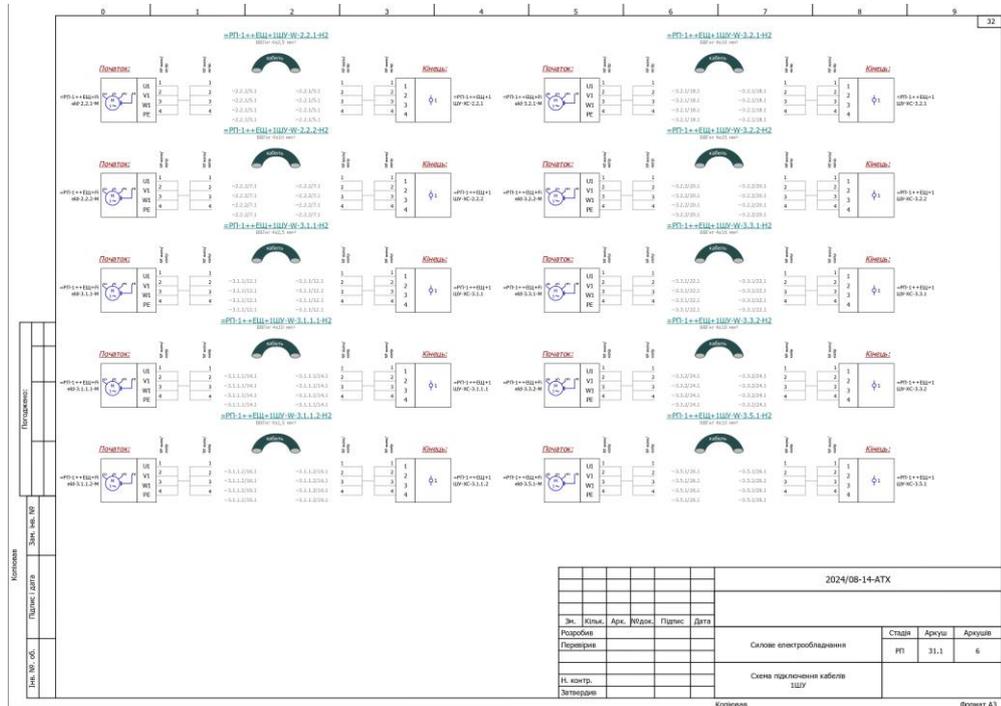


Рисунок 3.5 – Кабельний журнал та схема підключення клем 1ШУ

На рисунку 3.6 показано схему підключення клем шафи 1ШУ, яка є логічним продовженням кабельного журналу та містить нумерацію клем, тип сигналу, призначення кожної жили та відповідність входам/виходам контролера.

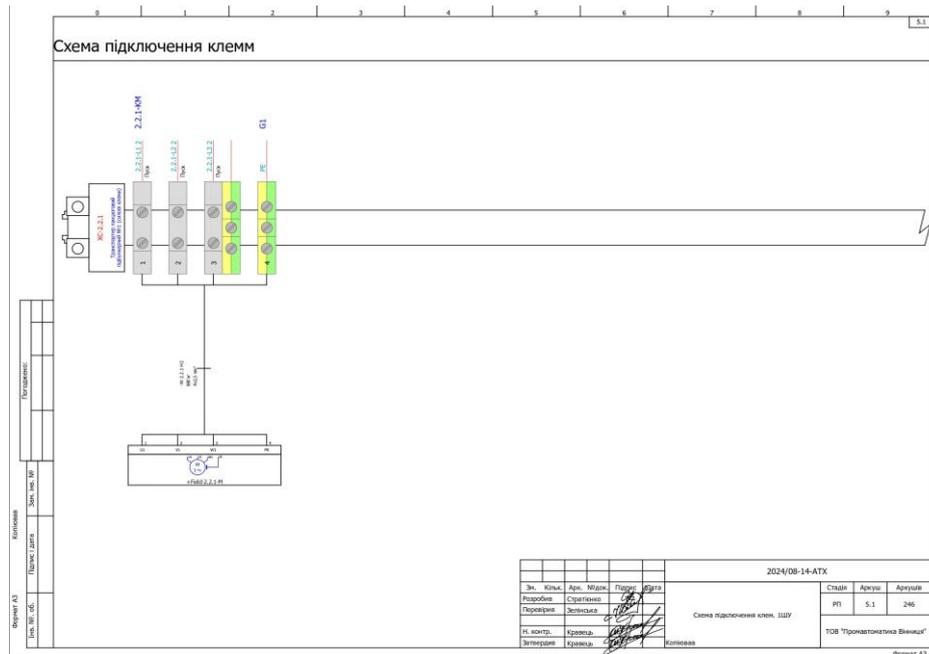


Рисунок 3.6 – Схема підключення клем шафи керування 1ШУ

Така документація суттєво спрощує монтаж, діагностику та експлуатаційне обслуговування системи.

3.5 Конструктивне виконання шафи керування 1ШУ

Шафа керування є центральним елементом апаратної частини АСУТП. На рисунку 3.7 наведено її ізометричний вигляд, який відображає розташування дверей, введів кабелів, вентиляційних отворів та загальні габарити.

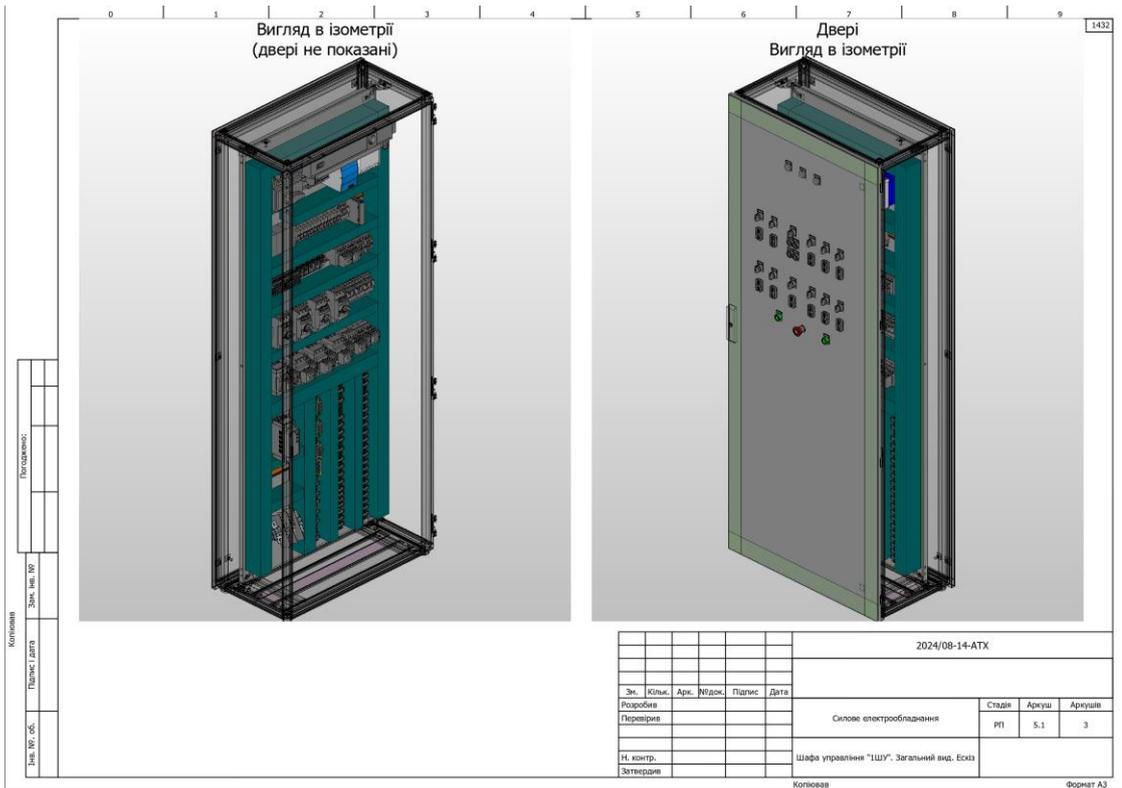
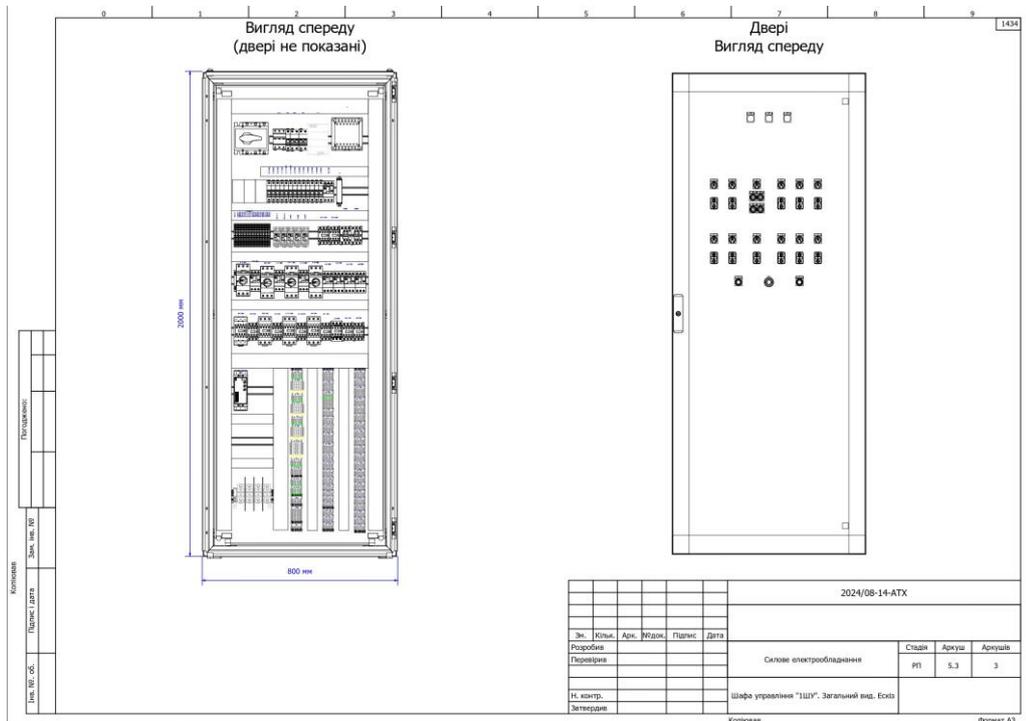


Рисунок 3.7 – Шафа керування 1ШУ: вигляд в ізометрії

На рисунку 3.8 продемонстровано внутрішню компоновку елементів шафи.



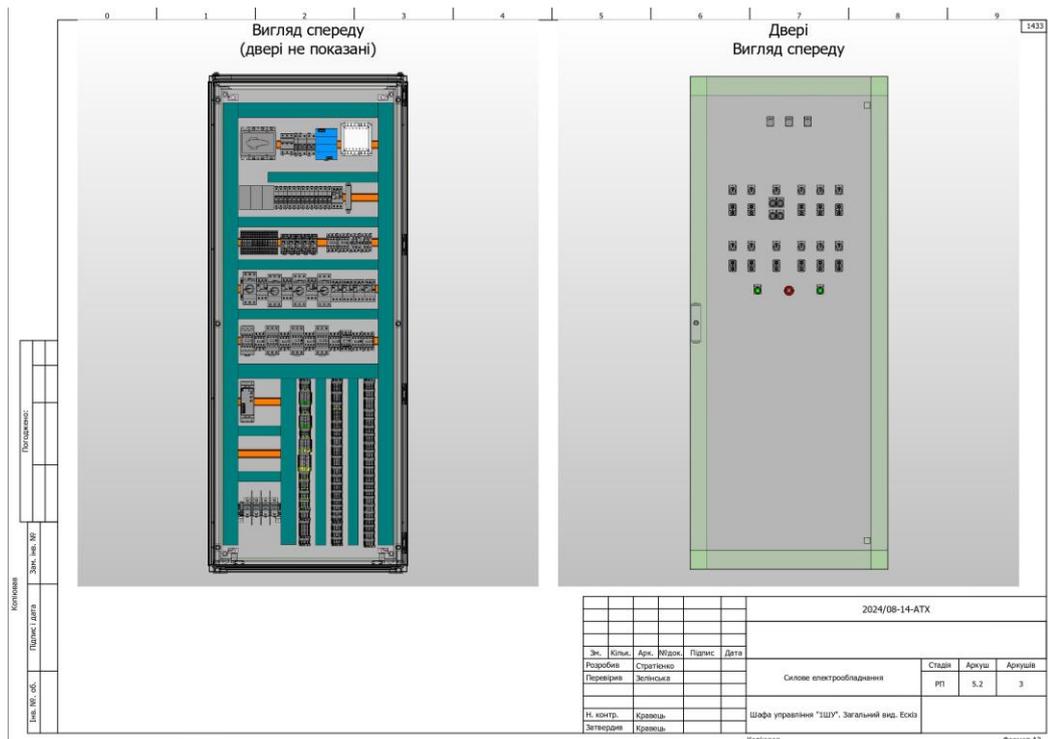


Рисунок 3.8 – Шафа керування ІШУ: вигляд спереду та компоновка елементів

Компоновка включає:

- PLC Siemens S7-1200 або Schneider M241;
- модулі вводу/виводу;
- релейні та автоматичні елементи;
- клемні ряди;
- джерела живлення та захисні апарати.

Конструкція шафи забезпечує захист від пилу, можливість зручного доступу до елементів, а також відповідність вимогам електробезпеки [26].

3.6 Інтеграція мікрохвильового датчика вологості Hydronix НРХТ02 у систему автоматизованого керування сушильним комплексом

Однією з ключових проблем, визначених у розділі 1, є нестабільність роботи зерносушильних комплексів за умов змінної вологості та температури зернової маси. Нерівномірність цих параметрів безпосередньо впливає на

тепломасообмін, ефективність використання палива та кінцеву якість готової продукції. Як встановлено під час аналізу існуючих технологій, більшість традиційних систем контролю спираються на періодичні вибіркові вимірювання або використання ємнісних датчиків, точність яких значно знижується при високій запиленості, зміні структури зернової суміші або підвищенні температури в сушильній камері. Це призводить до накопичення похибки, нестабільності роботи теплогенератора та збільшення ризику як пересушування, так і недосушування партій зерна, що було підтверджено аналізом існуючих рішень у розділі 2 [13].

Для усунення цих недоліків у даній роботі запропоновано впровадження сучасного мікрохвильового датчика вологості Hydronix НРХТ02, який працює на основі вимірювання діелектричних характеристик матеріалу у високочастотному діапазоні. На відміну від класичних ємнісних або контактних датчиків, цей тип сенсорів виконує аналіз об'ємної вологості, охоплюючи значний шар зернової маси в зоні потоку. Завдяки цьому система отримує більш репрезентативні дані та забезпечує автоматичну корекцію режимів сушіння з високою частотою оновлення сигналу. Важливою перевагою НРХТ02 є мінімальна залежність точності вимірювання від таких змінних, як гранулометричний склад, щільність, швидкість руху зерна та температура агента сушіння, що робить цей метод ефективним для потокових шахтних сушарок [14].

Окремо слід підкреслити, що використання мікрохвильової технології у потокових промислових сушарках в Україні є досить рідкісним, що зумовлює наукову новизну роботи. Вітчизняні комплекси переважно застосовують дешевші ємнісні сенсори, точність яких у реальних умовах може відхилятися в межах 1–2 %, що є критичним при вимірюванні вологості у вузькому робочому діапазоні. Запропоноване рішення дозволяє забезпечити точність до $\pm 0,2$ %, що відповідає вимогам сучасних систем управління зерносушильним обладнанням та дає змогу реалізувати адаптивні алгоритми ПД-регулювання.

На рисунку 3.Х наведено принципову електричну схему підключення датчика НРХТ02 у складі системи керування сушаркою. Як видно зі схеми, датчик живиться від стабілізованого джерела 24 VDC та під'єднується до контролера через диференційну пару ВМ(+)/ВМ(-), що забезпечує стійкість комунікації до електромагнітних перешкод, характерних для середовища з потужними вентиляторами та індукційними двигунами. Комунікаційний інтерфейс RS-485 використовується для передавання даних у форматі Modbus RTU, що дозволяє інтегрувати сенсор у мережу промислових контролерів, таких як Siemens S7-1200 або Schneider Electric M241. Використання перетворювача WKD забезпечує електричне узгодження сигналів та можливість гнучкого налаштування параметрів зв'язку під конкретні умови експлуатації.

Додатковою перевагою мікрохвильових датчиків Hydronix є можливість програмної калібровки під конкретний вид зерна та вибраний температурний режим. Це дозволяє мінімізувати температурну залежність показників та адаптувати систему до сезонних коливань якості зернової маси. Підтримка багатоточкової калібрувальної моделі та фільтрації вимірювань сприяє підвищенню стійкості сигналу та зменшенню впливу шумів, що є важливим при роботі в режимі високих потокових навантажень.

Таким чином, впровадження НРХТ02 у складі автоматизованої системи керування сушильним комплексом дозволяє отримати якісно новий рівень точності вимірювання, оперативності регулювання та стабільності технологічного процесу, що є ключовою умовою для підвищення енергоефективності та продуктивності обладнання. Якщо традиційні засоби контролю лише фіксують кінцевий результат, то мікрохвильові датчики забезпечують безперервний моніторинг у реальному часі, формуючи інформаційне підґрунтя для інтелектуального керування сушінням.

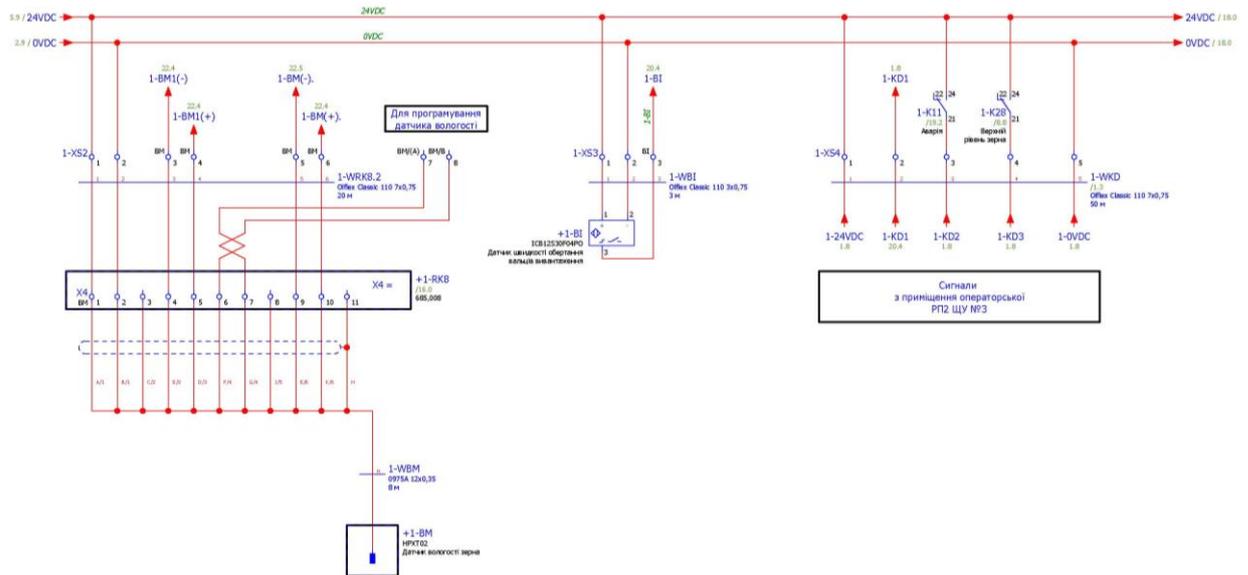


Рисунок 3.9 – Принципова електрична схема підключення мікрохвильового датчика вологості Hydronix NRXT02

Підключення по Modbus RTU дозволяє передавати до ПЛК такі параметри датчика:

- поточне значення вологості;
- інтенсивність мікрохвильового сигналу;
- температуру матеріалу;
- статус калібрування;
- службові діагностичні повідомлення.

Ці дані безпосередньо використовуються у алгоритмах керування (розділ 4), де реалізовано:

- адаптивне регулювання подачі агента сушіння;
- автоматичне переключення сушарки у режим повторного циклу;
- коригування продуктивності в залежності від вологості на виході;
- запобігання пересушуванню та тепловим перевантаженням.

Завдяки цьому система працює у замкненому контурі, а керування стає залежним не від фіксованих часових інтервалів, а від реального технологічного стану зерна. Це забезпечує підвищення точності регулювання та зниження енерговитрат, що узгоджується з теоретичними закономірностями тепло- та масообміну, наведеними у розділі 2 [13].

Таким чином, інтеграція мікрохвильового датчика Hydronix НРХТ02 дозволила:

підвищити точність вимірювання вологості на 1–2 %;

стабілізувати процес сушіння;

зменшити перевитрати палива;

забезпечити повну автоматизацію контролю вологості у режимі реального часу;

реалізувати інтелектуальні алгоритми керування, описані у розділі 4.

Це підтверджує наукову новизну та практичну значущість обраного рішення.

3.7 Висновок

Встановлено, що основною причиною нестабільної роботи зерносушильних комплексів є змінність вологості та температури зерна, а традиційні системи контролю не забезпечують необхідної точності через чутливість ємнісних датчиків до запиленості, неоднорідності маси та впливу температури. Це призводить до порушення теплових режимів, збільшення енергоспоживання та ризику недосушування або пересушування продукції.

Розроблена в роботі схема підключення та методика інтеграції мікрохвильового датчика Hydronix НРХТ02 у ПЛК забезпечили високоточне безперервне вимірювання вологості, що довело його перевагу над альтернативними датчиками. Отримані результати створюють основу для формування адаптивної системи регулювання режимів сушіння та підвищення ефективності роботи зерносушильного комплексу.

4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СУШИЛЬНИМ КОМПЛЕКСОМ**

4.1 Загальні принципи програмної реалізації АСУТП

Програмна реалізація автоматизованої системи керування сушильним комплексом ґрунтується на стандартах ІЕС 61131-3, які визначають підходи до створення програмних модулів, структурування логіки, організацію обробки сигналів від датчиків та формування керуючих впливів. Цей стандарт забезпечує уніфіковану платформу для розробки ПЛК-програм, дозволяючи поєднувати різні мови програмування - ST, LD, FBD - і формувати модульну архітектуру керування, що легко розширюється та супроводжується [28].

З огляду на складність сушильного комплексу, програмна частина побудована за принципами:

модульності - окремий функціональний блок відповідає за конкретний механізм або групу механізмів;

ієрархічності - глобальні змінні, структури даних і типові блоки взаємопов'язані у вигляді деревоподібної структури;

уніфікації - для всіх механізмів застосовується однакова логіка обробки;

масштабованості - система дозволяє легко додавати нові механізми, датчики або режими роботи;

безпеки - на всіх рівнях реалізовано блокування, перевірки стану, аварійні сценарії та діагностичні процедури [29].

У наступних підрозділах наведено опис основних елементів програмної логіки та їх апаратного відображення, здійснено аналіз типових функціональних блоків та структур даних, що використовуються у системі.

4.2 Оголошення глобальних змінних та їх роль в архітектурі програми

Першим етапом побудови ПЛК-програми є визначення глобальних змінних, які забезпечують централізоване зберігання параметрів, станів і керуючих сигналів. На рисунку 4.1 наведено фрагмент оголошення глобальних змінних програми.

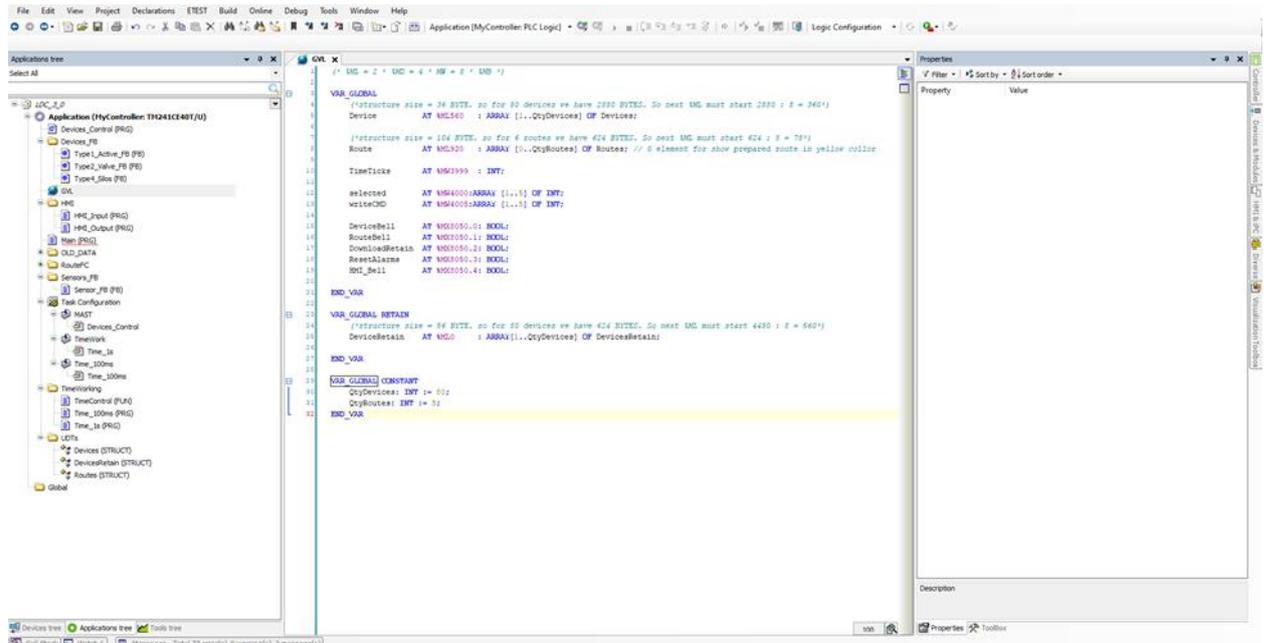


Рисунок 4.1 – Оголошення глобальних змінних

Як проілюстровано на рисунку 4.1, глобальні змінні включають:

- структури даних для окремих пристроїв (конвеєри, норії, заслінки);
- стани керування: startCmd, stopCmd, manualMode, autoMode;
- внутрішні системні змінні: фільтри, часові лічильники, маркери діагностики;
- службові параметри - кількість повторних запусків, покази датчиків, індекси елементів.

Глобальні змінні забезпечують:

- можливість обміну інформацією між функціональними блоками;
- централізоване керування станами механізмів;
- зручність інтеграції із SCADA-системою;

- легкий доступ до параметрів під час налагодження та обслуговування.

Їх оголошення і структура визначають основу для роботи всієї АСУТП.

4.3 Обробка одиничних механізмів на основі типового функціонального блоку

Для керування транспортними механізмами (норіями, транспортерними лініями, заслінками тощо) у системі застосовано уніфікований підхід, що ґрунтується на типовому функціональному блоці обробки одиничного механізму.

На рисунку 4.2 наведено приклад використання такого функціонального блоку для обробки механізму.

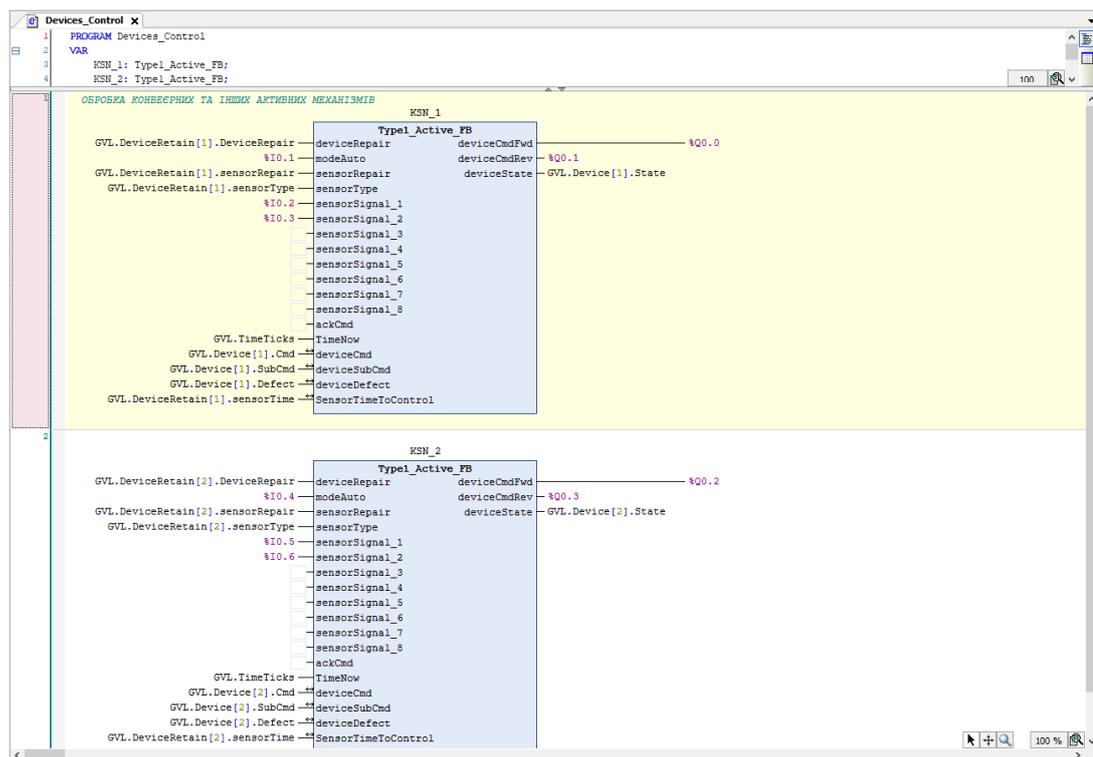


Рисунок 4.2. – Обробка одиничних механізмів на основі типового функціонального блоку.

Як продемонстровано на рисунку 4.2, типовий функціональний блок отримує на вхід:

- команду на запуск (startCmd);
- команду на зупинку (stopCmd);
- сигнали стану (deviceState, errorState);
- сигнали аварійних реле, теплового захисту, кінцевих вимикачів;
- інформацію про час роботи, затримки та дозволи.

На виході формуються:

- команда на пуск пускача або приводу;
- команда на зупинку;
- підтвердження стану механізму;
- сигнали діагностики (аварія, блокування, заборона запуску).

Цей підхід дозволяє уникнути дублювання логіки, а програму зробити більш структурованою та легкою для розширення [30].

4.4 Типовий функціональний блок обробки механізму мовою LD

На рисунку 4.3 наведено типовий функціональний блок, реалізований мовою LD (Ladder Diagram), який використовується для обробки транспортних механізмів.

Як видно з рисунка 4.3, блок включає:

- умови запуску (наявність дозволів, перевірка стану аварійних кнопок, нормальний стан датчиків);
- умови зупинки (натискання кнопки «Стоп», аварійна зупинка, перевантаження);
- керуючу логіку вмикання приводу (пускач або частотний перетворювач);
- блокування повторного пуску після аварії;
- формування вихідних станів для контролера.

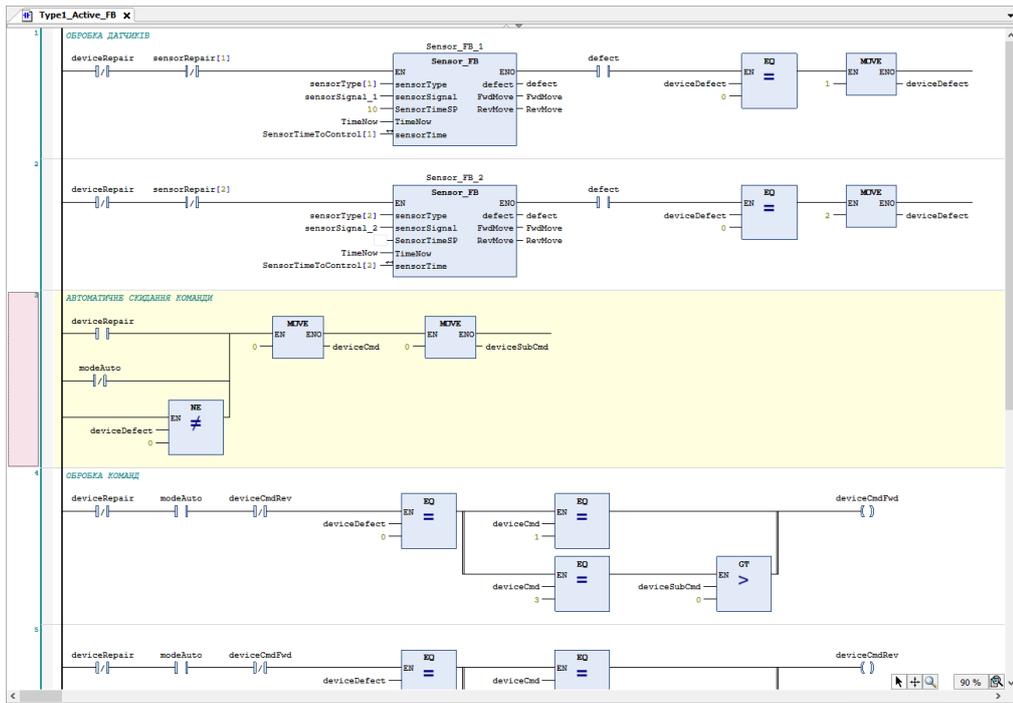


Рисунок 4.3. – Типовий функціональний блок обробки одиночного механізму мовою LD

Завдяки графічному представленню LD-блок є максимально наочним, що підвищує зручність налагодження та значно прискорює пошук несправностей під час роботи комплексу

4.5 Структурована архітектура програмної логіки та опис одиночного механізму

Важливим етапом побудови програмної частини АСУТП є формування єдиної структурованої архітектури, яка забезпечує уніфікацію обробки всіх механізмів сушильного комплексу.

У цій архітектурі центральну роль відіграють:

- структури даних,
- типові функціональні блоки,
- уніфіковані правила взаємодії між FB та змінними,
- логіка обробки команд і станів.

На рисунку 4.4 наведено приклад структури даних Device, яка описує одиничний механізм.

```
1 TYPE Device :
2   STRUCT
3     Cmd          :INT;
4     SubCmd       :INT;
5     State        :INT;
6     Defect       :INT;
7     SensorTimeToControl : ARRAY [1..8] OF INT;
8     starterOut   : BOOL;
9     sStarterOut  : BOOL;
10    stopOut      : BOOL;
11    Auto         : BOOL;
12    sensorSignal  : ARRAY [1..8] OF BOOL;
13  END_STRUCT
14 END_TYPE
15
16 //Cmd - подача команди механізму
17 (* опис
18 0 - зупинитись
19 1 - рух вперед (пускач прямиї)
20 2 - рух назад (пускач реверсний)
21 3 - рух вперед (пускач прямиї) на час (SubCmd*10),c
22 4 - рух назад (пускач реверсний) на час (SubCmd*10),c
23 *)
24
25 //SubCmd - час для тимчасової подачі команди, 100ms
26 //State - опис стану обладнання
27 (* опис
28 0 - вимкнено активний механізм / проміжний невизначений стан засувки чи клапану / бункер пустий
29 1 - виконується операція руху вперед / бункер заповнений
30 2 - виконується операція руху в реверсному напрямку
31 3 - стан ремонту обладнання
32 4 - ручне керування. Механізм вимкнено
33 5 - ручне керування. Механізм вимкнено вперед
34 6 - ручне керування. Механізм вимкнено реверсно
35 7 - ознака аварії в механізмі
36 8 - засувка відкрита / перекидний клапан в положенні ЛІВО
37 9 - засувка закрита / перекидний клапан в положенні ПРАВО
38 ...
39 11 - розподільник потоків в положенні 1
40 12 - розподільник потоків в положенні 2
41 13 - розподільник потоків в положенні 3
42 14 - розподільник потоків в положенні 4
43 15 - розподільник потоків в положенні 5
44 16 - розподільник потоків в положенні 6
45 *)
46
47 //Defect - ознака та причина аварії.
48 (* опис
49 -1 - для засувки чи перекидного клапану спрацювали два кінцевих викидача одночасно
50 0 - аварія відсутня
51 1..8 - номер аварійного датчика
```

Рисунок 4.4. – Оголошення структури даних для опису одиничного механізму

Як показано на рисунку 4.4, структура включає:

- сигнали запуску та зупинки (start, stop);
- індикатори станів (running, ready, fault);
- аварійні параметри (overload, emStop);
- службові поля (timer, enable, resetReq);
- масиви станів датчиків і дозволів.

Цей підхід дозволяє кожен механізм описати єдиним стандартом, що є основою для модульності.

Взаємодія структури даних і функціонального блоку

За структурою даних закріплюється відповідний типовий функціональний блок, якому передається вся необхідна інформація для:

- перевірки умов запуску;

- керування приводом;
- обробки аварій;
- формування вихідних сигналів;
- оновлення даних для SCADA.

Графічну реалізацію такого блоку мовою LD було представлено на рисунку 4.3.

Сумісне використання структури даних і типового FB забезпечує:

- модульність - кожний механізм має власний екземпляр FB;
 - масштабованість - додавання нового обладнання відбувається шляхом створення нового екземпляра структури та FB;
 - зменшення дублювання коду - уся логіка обробки механізмів уніфікована;
 - читабельність і діагностичність - уся інформація про механізм доступна у структурованій формі;
- зручну інтеграцію з НМІ та SCADA - доступ до станів і команд через структуровані змінні.

Переваги структурованої архітектури

Об'єднання структур даних та типових функціональних блоків формує повноцінну об'єктно-орієнтовану архітектуру в межах стандарту IEC 61131-3, що забезпечує:

- логічну ієрархію → механізм описаний як об'єкт зі станами, командами та методами;
- високу надійність → мінімізуються помилки під час обслуговування та розширення;
- адаптивність → можливість швидко змінювати технологічну схему;
- простоту налагодження → ST і LD-блоки легко перевіряти в онлайн-режимі;
- універсальність → одна логіка працює для всіх механізмів (норії, транспортери, заслінки, вентилятори).

Таким чином, структурована архітектура програмної логіки є ключовим елементом у побудові АСУТП, що дозволяє системі залишатися масштабованою, зручною в експлуатації та технічно зрозумілою для інженерів.

4.6 Висновки

У цьому розділі представлено підхід до програмної реалізації автоматизованої системи керування сушильним комплексом на базі сучасних принципів ІЕС 61131-3. Описано структуру глобальних змінних, типові функціональні блоки, структури даних та механізм їх взаємодії. Наведені рисунки (4.1–4.4) демонструють реальні фрагменти програмного коду та графічні блоки керування, що підтверджує практичну реалізацію системи та її відповідність вимогам безпеки, надійності та модульності.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ СУШКИ ЗЕРНА ЕЛЕВАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ

В умовах сучасного виробництва забезпечити сталість параметрів процесу вручну практично неможливо через інерційність тепломасообміну, нерівномірність вологості та температури зерна, а також змінні зовнішні фактори (температура повітря, тиск, вологість). Для усунення цих проблем використовуються автоматизовані системи керування (АСК), які забезпечують оптимізацію режимів роботи сушильних агрегатів, зменшення енерговитрат і підвищення продуктивності комплексу.

Технологічні вимоги визначаються особливостями тепломасообміну в агенті сушіння, динамікою змін вологості та температури, сушильного агрегату. До них належать:

- підтримання необхідних температурних режимів агента сушіння та зерна у заданих межах;
- забезпечення рівномірного руху зернового шару й недопущення застою або перегріву;
- автоматичне регулювання подачі агента сушіння залежно від вологості зерна на вході;
- синхронна робота транспортувальних механізмів і системи рециркуляції повітря;
- контроль температури в декількох зонах сушильної шахти;
- автоматичне блокування при аварійних або граничних значеннях параметрів;
- можливість дистанційного моніторингу та візуалізації процесу на панелі оператора.

Техніко-економічні вимоги відображають економічну доцільність і практичність системи автоматизації, а саме:

- енергоефективність - мінімізація витрат електроенергії та палива за рахунок частотного регулювання вентиляторів і оптимізації режимів сушіння;

- уніфікація апаратних засобів - використання стандартних контролерів, датчиків і модулів, що спрощує обслуговування та знижує витрати;

- висока надійність і довговічність у складних умовах (підвищена запиленість, вологість, перепади температур);

- зручність експлуатації - інтуїтивний інтерфейс, індикація станів, архівація параметрів;

- низька собівартість розробки та монтажу при високій ефективності;

Отже, враховуючи наведені технологічні та техніко-економічні вимоги, можна зробити висновок, що автоматизована система керування процесом сушки зерна повинна забезпечувати узгоджену взаємодію всіх функціональних вузлів сушильного комплексу та оптимальне керування енергетичними й теплотехнічними потоками. Її впровадження дає можливість досягти високого рівня стабільності технологічного процесу, що безпосередньо впливає на якість висушеного зерна, зменшує втрати маси та запобігає виникненню аварійних ситуацій, пов'язаних із перегрівом або порушенням режиму подачі агента сушіння.

Важливим аспектом є реалізація в системі механізмів адаптації до змін зовнішніх умов і властивостей зернової маси. Це досягається завдяки використанню мікропроцесорних контролерів із можливістю обробки сигналів від кількох температурних і вологісних датчиків у реальному часі. Автоматичне коригування режимів роботи вентиляторів і теплогенератора забезпечує не лише підтримання необхідних параметрів сушіння, а й мінімізацію витрат енергоресурсів. Таким чином, система не просто стабілізує технологічний процес, а й активно оптимізує його, враховуючи інерційність об'єкта керування.

У конструктивному та програмному плані така система має бути побудована за модульним принципом, що дає змогу розширювати її функціональність у міру модернізації обладнання або змін технологічної схеми елеватора. Використання уніфікованих датчиків і типових модулів введення-виведення дозволяє зменшити час монтажу, спростити технічне обслуговування та забезпечити високу ремонтпридатність. Інтерфейс оператора повинен бути інтуїтивно зрозумілим, із наочною індикацією станів обладнання, графічним відображенням параметрів процесу та функцією архівації даних для подальшого аналізу ефективності роботи системи.

З економічного погляду, автоматизація сушильного комплексу спрямована на зниження питомих енерговитрат, підвищення коефіцієнта використання обладнання та зменшення експлуатаційних витрат. За рахунок частотного регулювання електроприводів вентиляторів споживання електроенергії може бути скорочене на 15–25 %, а оптимізація температурних режимів забезпечує економію палива в межах 5–8 %. Одночасно зменшується кількість обслуговуючого персоналу, підвищується безпечність роботи й скорочується тривалість простоїв обладнання, що загалом формує значний річний економічний ефект.

Таким чином, автоматизована система керування сушильним процесом виступає ключовим елементом підвищення енергоефективності та технологічної надійності елеваторного комплексу. Вона забезпечує якісно новий рівень керування технологічними параметрами, сприяє стабільності виробничого циклу й створює основу для подальшої цифрової модернізації агропромислових підприємств.

5.1 Оцінка капітальних витрат на розробку та впровадження системи

Економічна доцільність розробки та впровадження автоматизованої системи керування визначається насамперед величиною капітальних витрат, необхідних для реалізації проєкту. До складу таких витрат входять вартість

апаратних засобів, програмного забезпечення, монтажних та пусконаладжувальних робіт, а також витрати на проектування, налаштування і навчання персоналу. Сукупність цих складових формує первісну вартість інвестицій у систему автоматизації.

Для розрахунку капітальних витрат скористаємося орієнтовними даними, наведеними в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Кошторис капіталовкладень

Елементи електротехнічного комплексу	Ціна, грн.
НРХТ02 Мікрохвильовий датчик вологості Hydro-Probe ХТ	208 803,00
Робоче місце оператора(системний блок, ліцензія, комп'ютер, монітор, ДБЖ)	59 387,00
WinCC RC 8192, V8.0 DL	58 431,00
6ES7214-1AG40-0XB0 SIEMENS ЦЕНТРАЛЬНИЙ ПРОЦЕСОР	26 487,00
6ES7241-1CH32-0XB0 КОМУНІКАЦІЙНИЙ МОДУЛЬ	8 541,00
6ES7223-1PL32-0XB0 МОДУЛЬ ДИСКРЕТНОГО ВХОДУ/ВИХОДУ	19 125,00
6ES7221-1BH32-0XB0 МОДУЛЬ ДИСКРЕТНОГО ВХОДУ	12 105,00
6ES7231-5PF32-0XB0 МОДУЛЬ АНАЛОГОВОГО ВХОДУ	35 165,00
6ES7231-4HD32-0XB0 МОДУЛЬ АНАЛОГОВОГО ВХОДУ	15 615,00
Додаткові пристрої системи АСУ ТП	135 000,00
Кабельно-провідникові матеріали	67 781,00
Загальна вартість	646440,00
Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)	84 037,20
Витрати на будівельні роботи (10%)	64 644,00
Капітальні витрати (інвестиції)	795121,2

Основними елементами, які входять до складу системи керування процесом сушки зерна, є програмований логічний контролер (ПЛК), операторська панель НМІ, частотні перетворювачі для регулювання швидкості вентиляторів, датчики температури та вологості, комутаційна апаратура, силовий щит керування, а також кабельні з'єднання і периферійні пристрої. Крім цього, у вартість впровадження включається розробка

прикладного програмного забезпечення, функціонального алгоритму, а також інтеграція системи у технологічну схему сушильного комплексу.

Для визначення капітальних вкладень потрібно до загальної вартості обладнання додати також витрати на транспортування, монтаж і пусконаладження, а також вартість будівельно-установчих робіт, пов'язаних із підготовкою місця встановлення щитів керування, прокладанням кабельних трас, монтажем датчиків і захисної арматури. Окрім того, під час економічного аналізу враховуються амортизаційні відрахування, які характеризують поступове перенесення вартості основних фондів системи автоматизації на собівартість її експлуатації.

Вартість доставки обладнання визначається залежно від відстані транспортування, маси вантажу та тарифу перевезення. Монтажні роботи, до складу яких входить встановлення шаф керування, підключення контролерів, налаштування датчиків і виконавчих механізмів, розраховуються відповідно до діючих нормативів вартості монтажних і пусконаладжувальних робіт. Для спрощення розрахунків їх величину приймають рівною 13 % від загальної вартості обладнання, що цілком відповідає типовим показникам для систем подібного рівня автоматизації:

$$C_{\text{дм}} = C_{\Sigma} \cdot 0,13(\text{грн.}), \quad (5.1)$$

$$C_{\text{дм}} = 646440 \cdot 0,13 = 84037,2(\text{грн.}).$$

Витрати на будівельні роботи (прокладання кабельних каналів, встановлення опорних конструкцій, монтаж захисних коробів, підготовка фундаментів для шаф керування) визначаються за нормативами будівельних витрат і приймаються в укрупненому вигляді на рівні 10 % від вартості обладнання:

$$C_{\text{б}} = C_{\Sigma} \cdot 0,1(\text{грн.}), \quad (5.2)$$

$$C_{\text{б}} = 646440 \cdot 0,1 = 64644(\text{грн.}),$$

Амортизаційні відрахування обчислюються добутком норми амортизації на первісну вартість об'єкта основних фондів. У даному випадку термін експлуатації автоматизованої системи керування приймається рівним 10–12 років, що відповідає середньому життєвому циклу промислових контролерів, датчиків та програмного забезпечення. Відповідно норма амортизації становить 10 % на рік:

$$A_p = \frac{C_{\Sigma} \cdot H_A}{100\%}, \quad (5.3)$$

де H_a – норма амортизації (при умові, що термін експлуатації АСУТП приймемо за 20 років норма амортизації буде рівною 5%)

$$A_p = \frac{795121,2 \cdot 5\%}{100\%} = 39756,1(\text{грн.})$$

Таким чином, розрахунок показує, що до базової вартості апаратного й програмного забезпечення необхідно додати суму транспортно-монтажних і будівельних витрат, унаслідок чого загальна величина інвестицій становить близько 795 тис. грн. Ці кошти охоплюють повний цикл реалізації системи - від закупівлі обладнання до його налаштування, інтеграції у виробничу схему та введення в експлуатацію.

Отримане значення капітальних витрат є цілком обґрунтованим з огляду на функціональні можливості системи. Використання мікрохвильового датчика вологості Hydro-Probe XT, контролера Siemens S7-1200 з модулями аналогових і дискретних входів/виходів, а також програмного середовища WinCC забезпечує реалізацію сучасної архітектури керування, що поєднує точність вимірювань, високу швидкодію та зручність експлуатації. У наступних підрозділах ці дані будуть використані для визначення собівартості експлуатації системи, розрахунку економічного ефекту та оцінки строку окупності проєкту.

5.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Відповідно до правил улаштування електроустановок обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, а група допуску по електробезпеці не нижче третьої. Приймаємо, що АСУТП обслуговує працівник із п'ятим розрядом, оскільки обслуговування такого пристрою потребує вищого рівня професіоналізму та знання комп'ютерних технологій обміну даними та налаштування мікропроцесорних пристроїв.

Розрахунок витрат на заробітну плату обслуговуючого персоналу виконується за наступною формулою:

$$C_3 = C_{30} \cdot C_{3д}, \quad (5.4)$$

де C_{30} – основна заробітна плата по тарифу;

$C_{3д}$ – додаткова заробітна плата.

$$C_{30} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_C \cdot \beta, \quad (5.5)$$

де N – кількість робітників які обслуговують АСУТП ($N = 1$ чол.);

T_1 – годинна тарифна ставка робітника першого розряду. Мінімальна заробітна платня станом на 2025р. не змінювалась і становить 8000 грн., тому розмір годинної тарифної ставки робітника першого розряду приймаємо рівним $T_1 = 48$ грн.;

K – тарифний коефіцієнт (для робітника 4-го розряду: $K = 2,33$, див. таблицю 4.2);

K_C – коефіцієнт співвідношень, що встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_C = 1$);

β – відношення часу, затраченого робітником, на обслуговування установки відносно загального часу своєї роботи ($\beta = 1$);

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд часу обслуговування вітроенергетичної установки:

$$\Phi_{\text{ef}} = \varepsilon \cdot Z_{\text{РД}} \cdot Z_{\text{РЗ}} \cdot t_{\text{РЗ}}, \quad (5.6)$$

де ε – відносна тривалість увімкнення ($\varepsilon = 0,5$);

$Z_{\text{РД}}$ – кількість робочих днів за рік ($Z_{\text{РД}} = 250$ днів/рік);

$Z_{\text{РЗ}}$ – кількість робочих змін ($Z_{\text{РЗ}} = 1$);

$t_{\text{РЗ}}$ – тривалість робочої зміни ($t_{\text{РЗ}} = 1$).

Таблиця 5.2 – Тарифна сітка працівників

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Розраховуємо ефективний фонд часу обслуговування АСУТП та основну заробітну плату по тарифу:

$$\Phi_{\text{ef}} = 0,5 \cdot 250 \cdot 1 \cdot 1 = 125(\text{год.} / \text{рік}).$$

$$C_{30} = 1 \cdot 48 \cdot 2,33 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 1 = 13980(\text{грн.}).$$

Додаткова заробітна плата (премія) становить 10% від розміру основної заробітної плати і відповідно становить:

$$C_{3Д} = 13980 + 1398 = 15378(\text{грн.}).$$

В цілому загальні витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу системи АСУТП становитимуть:

$$C_3 = 13980 + 15378 = 29358(\text{грн.}).$$

5.3 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт електроустаткування проводиться на місці його встановлення із відключенням і зупинкою ремонтним персоналом.

Грошові витрати для проведення ремонтних робіт містять в собі витрати на комплектуючі, запасні частини та інші елементи, що потребують заміни, а також витрати на оплату праці працівників, що проводять ремонтні

роботи. Графік планових попереджувальних ремонтних робіт представлено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Графік планових ремонтних робіт

Найменування обладнання	Види ремонтних робіт по місяцях												Трудоміст-ть, люд-год.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Аналіз журналів, оновлення ПЗ	6						6						12
Перевірка ізоляції, чистка шаф		8						8					16
Калібрування датчиків					10					10			20
Передсезонна перевірка, тестування алгоритмів						24							24
Профілактика частотників, очищення					8					8			16
Післясезонна діагностика, ревізія з'єднань												16	16
	Загальна трудомісткість												89

Приймаємо, що виконання даних ремонтних, відновлювальних та налагоджувальних робіт проводитиметься електромонтером шостого розряду. Відповідно до того, що є відомими кількість годин виділених на проведення ремонтних робіт основна заробітна плата працівника знаходитиметься із наступної формули:

$$C_{\text{ЗОР}} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{ефр}} (\text{грн.}), \quad (5.7)$$

$$C_{\text{ЗОР}} = 48 \cdot 2,33 \cdot 125 = 13980 (\text{грн.}).$$

Величина додаткової заробітної плати ремонтного персоналу приймається на рівні 20 %, що зумовлено високим рівнем кваліфікації фахівця, який у разі необхідності виконує обслуговування та ремонт кількох взаємопов'язаних елементів системи - контролера, частотних

перетворювачів, датчиків температури та вологості, а також комутаційного й операторського обладнання автоматизованої системи керування процесом сушки зерна.:

$$C_{здр} = C_{зор} \cdot 0,2(\text{грн.}), \quad (5.8)$$

$$C_{здр} = 13980 \cdot 0,2 = 2796(\text{грн.}).$$

Відповідно витрати на оплату праці ремонтного персоналу складатимуть:

$$C_{зр} = C_{зор} + C_{здр}(\text{грн.}), \quad (5.9)$$

$$C_{зр} = 13980 + 2796 = 16776(\text{грн.}).$$

Витрати на комплектуючі, запасні частини та інші елементи розраховуються відносно основної заробітної плати ремонтного персоналу, і становлять 15 % від її величини.

$$C_{к} = C_{зор} \cdot 0,15(\text{грн.}), \quad (5.10)$$

$$C_{к} = 13980 \cdot 0,15 = 2097(\text{грн.}).$$

Величина загальних річних експлуатаційних витрат розраховується наступним чином:

$$C_{в} = A_{р} + C_{з} + C_{зр} + C_{к} (\text{грн.}), \quad (5.11)$$

$$C_{в} = 39756,2 + 29358 + 16776 + 2097 = 87987,2 (\text{грн.})$$

5.4 Розрахунок терміну окупності та показників ефективності інвестицій

Оцінка економічної ефективності впровадження автоматизованої системи керування процесом сушки зерна є завершальним етапом техніко-економічного аналізу. Вона дає змогу визначити доцільність інвестицій у систему, термін їх окупності та рівень рентабельності вкладень. Основна мета такого розрахунку полягає у встановленні співвідношення між

витратами на створення системи та економічним ефектом, який досягається в результаті її впровадження.

Річний економічний ефект формується за рахунок декількох чинників: зниження енергоспоживання електроустановок сушарки, скорочення витрат палива, зменшення втрат зерна під час сушіння, а також оптимізації витрат на оплату праці обслуговуючого персоналу. Загальна річна економія визначається сумою цих часткових ефектів і розраховується за співвідношенням

$$E = E_{\text{ел}} + E_{\text{газ}} + E_z + E_{\text{зп}}, \quad (5.12)$$

де $E_{\text{ел}}$ – економія електроенергії;

$E_{\text{газ}}$ – економія палива;

E_z – економія від зменшення втрат маси зерна;

$E_{\text{зп}}$ – економія на заробітній платі за рахунок скорочення чисельності персоналу.

Витрати електроенергії до і після впровадження системи визначаються за результатами технічних вимірювань та аналізу режимів роботи сушильного комплексу. Економія електроенергії обчислюється за формулою

$$E_{\text{ел}} = (W_b - W_a) \cdot C_{\text{ел}}, \quad (5.13)$$

де W_b і W_a – річне споживання електроенергії відповідно до і після автоматизації;

$C_{\text{ел}}$ – тариф на електроенергію (4,32грн/кВт*год).

Економія палива, зокрема природного газу, визначається аналогічно:

$$E_{\text{газ}} = (Q_b - Q_a) \cdot C_{\text{газ}}, \quad (5.14)$$

де Q_b і Q_a – річні витрати газу до і після впровадження системи;

$C_{\text{газ}}$ – тариф на газ (7,96 грн/куб.м).

Зменшення втрат маси зерна, спричинених неточним підтриманням температурного режиму, розраховується за формулою

$$E_3 = M \cdot \Delta P \cdot C_3, \quad (5.15)$$

де M – річний обсяг сушіння;

$C_{\text{газ}}$ – тариф на газ (7,96 грн/куб.м).

ΔP – частка зменшення втрат;

C_3 – вартість однієї тонни зерна(орієнтовно 9704).

Економія на оплаті праці визначається різницею між витратами до і після автоматизації:

$$E_{\text{зп}} = (Z_6 - Z_a) \cdot 12, \quad (5.15)$$

де Z_6 і Z_a – місячна заробітна плата персоналу відповідно до і після впровадження системи.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що річне споживання електроенергії до автоматизації становило приблизно 55 тис. кВт·год, а після впровадження АСУ ТП знизилося до 44 тис. кВт·год. За чинним тарифом 4,32 грн/кВт·год економія становить:

$$E_{\text{ел}} = (55000 - 44000) \cdot 4,32 = 47520(\text{грн} / \text{рік}),$$

Зменшення витрат природного газу з 42 тис. м³ до 39,5 тис. м³ при тарифі 7,96 грн/м³ забезпечує додаткову економію:

$$E_{\text{газ}} = (42000 - 39500) \cdot 7,96 = 19900(\text{грн} / \text{рік}),$$

Стабілізація температурного режиму та точне регулювання параметрів процесу сушіння дозволяють знизити втрати маси зерна в середньому на 0,003 %. При річному обсязі сушіння 8 000 т і середній ціні 9704 грн/т це відповідає економії:

$$E_3 = 8000 \cdot 0,003 \cdot 9704 = 232896(\text{грн} / \text{рік}),$$

Крім того, впровадження автоматизації дає змогу скоротити кількість обслуговуючого персоналу з двох до одного оператора, що зменшує річні витрати на оплату праці на:

$$E_{\text{зп}} = (36000 - 18000) \cdot 12 = 216000(\text{грн} / \text{рік}),$$

Отже, сукупна річна економія становить:

$$E = 47250 + 19900 + 232896 + 216000 = 516316 \text{ (грн / рік)},$$

Отримане значення річного економічного ефекту використовується для визначення терміну окупності інвестицій. Термін окупності визначається за співвідношенням між сумою капітальних витрат на впровадження системи та річною економією:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{K}{E}, \quad (5.16)$$

де K – капітальні витрати;

E – річний економічний ефект.

$$T_{\text{окуп}} = \frac{795121,2}{516316} = 1,54 \text{ (року)}.$$

Це означає, що впроваджена система повністю окупить себе менш ніж за два роки експлуатації, що для промислових автоматизованих комплексів вважається високим показником ефективності.

Для більшої наочності рентабельність вкладених коштів можна оцінити через коефіцієнт ефективності інвестицій, який визначається як обернена величина терміну окупності:

$$\eta = \frac{1}{T_{\text{окуп}}}, \quad (5.17)$$

$$\eta = \frac{1}{1,54} = 0,65.$$

Отримане значення свідчить, що кожна гривня, інвестована у впровадження автоматизованої системи, приносить економічний ефект у розмірі близько 60 копійок уже протягом першого року експлуатації.

Таким чином, проведений розрахунок підтверджує високу економічну ефективність упровадження автоматизованої системи керування процесом сушки зерна. Отриманий термін окупності менше двох років забезпечує швидке повернення інвестицій, а подальша експлуатація системи сприятиме

стабільній економії енергоресурсів, зменшенню собівартості продукції та підвищенню конкурентоспроможності підприємства.

5.5 Висновок

Проведене техніко-економічне обґрунтування впровадження автоматизованої системи керування технологічним процесом сушки зерна підтвердило доцільність і високу ефективність даного проєкту. У результаті автоматизації досягається комплексне підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат, стабілізація технологічних параметрів і зменшення втрат зерна під час сушіння.

Розрахунки показали, що після впровадження системи споживання електроенергії зменшується приблизно на 20 %, витрати природного газу - на 6 %, а втрати маси зерна скорочуються на 0,3 % від загального обсягу переробки. Крім того, знижується потреба в обслуговуючому персоналі завдяки підвищенню рівня автоматизації процесів контролю та регулювання. Сукупна річна економія від реалізації системи становить близько 516 тис. грн, що дозволяє повністю відшкодувати початкові капітальні витрати у розмірі 795 тис. грн за період приблизно 1,5 року.

Коефіцієнт ефективності інвестицій дорівнює 0,65, що свідчить про високу рентабельність упровадження системи. Такий результат підтверджує, що автоматизована система керування не лише підвищує технологічну надійність та якість сушіння, а й забезпечує відчутний економічний ефект для підприємства. Її застосування відповідає сучасним вимогам енергозбереження, цифровізації виробництва та конкурентоспроможності агропромислового сектору.

Отже, реалізація АСУ ТП процесу сушки зерна є технічно обґрунтованою, економічно вигідною та перспективною для подальшого масштабування на інші об'єкти зернопереробної галузі.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час експлуатації зерносушильного обладнання

Експлуатація зерносушильних установок на елеваторних комплексах належить до робіт з підвищеною небезпекою, оскільки поєднує дію високих температур, значної запиленості повітря, рухомих механізмів, газопальникового та електротехнічного обладнання [15]. За таких умов зростає ймовірність виникнення травматизму, професійних захворювань та аварійних ситуацій, що потребує системного забезпечення охорони праці та промислової безпеки [30].

Нормативні документи у сфері безпеки праці, зокрема ДСТУ ISO 45001:2019, ДСТУ EN ISO 12100:2016 та НПАОП з питань переробки зерна, визначають необхідність ідентифікації небезпек, оцінювання ризиків і впровадження заходів щодо їх мінімізації [15]. До основних потенційно небезпечних елементів зерносушильного комплексу належать теплогенератори, вентилятори, норії, шнеки, стрічкові транспортери, газові системи та електрощитові.

Серед шкідливих і небезпечних виробничих факторів найбільш характерними є такі.

- Підвищена температура повітря та поверхонь. У зоні теплогенератора, змішувальної камери та шахти сушарки температура може досягати 60–150 °С, що створює ризик опіків та теплових уражень[16].

Підвищена запиленість повітря. Під час транспортування та сушіння зерна утворюється органічний пил, концентрації якого можуть перевищувати гранично допустимі значення [15]. Такий пил спричиняє захворювання органів дихання, а також формує вибухонебезпечні пилоповітряні суміші [26].

- Механічні небезпеки. Рухомі частини - вентилятори, транспортери, ланцюги, норії - становлять загрозу ударів, защемлень і затягування одягу

[30]. Відповідно до вимог стандартів, ці вузли повинні бути обладнані огороженнями та блокуваннями [22].

Шум і вібрація. Робота вентиляторів, електродвигунів і редукторів супроводжується підвищеними рівнями шуму, що може викликати втому, зниження концентрації уваги та порушення слуху [19]. Електричні небезпеки.

Вплив пилу, підвищеної вологості та механічних пошкоджень кабельних ліній може призвести до ураження електричним струмом [21]. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) вимагають обов'язкового захисного заземлення, застосування автоматичних вимикачів, пристроїв захисного відключення, систем вирівнювання потенціалів та використання схем TN-S або TN-CS із нормативним значенням опору заземлювального пристрою [23].

Пожежо- та вибухонебезпека. Органічний пил, газопаливні суміші та високі температури утворюють потенційно вибухонебезпечне середовище [24]. Пилові приміщення відносять до категорії В1г, а зерносушильні установки - до вибухопожежонебезпечних об'єктів категорії В, що потребує застосування вибухозахищеного обладнання, систем пиловидалення та іскробезпечних рішень [27].

Недостатнє освітлення. Низька освітленість робочих платформ і щитових підвищує ризик падінь та помилок під час роботи персоналу [18]. ДБН визначають мінімально допустимі рівні освітленості для таких зон [28].

Хімічні фактори. У разі неповного згоряння палива в теплогенераторі може виділятися чадний газ, концентрація якого за відсутності вентиляції здатна перевищувати гранично допустимі рівні та спричиняти гострі отруєння[16].

Узагальнена характеристика всіх зазначених небезпечних і шкідливих факторів наведена в таблиці 6.1, що дозволяє систематизувати їх джерела, наслідки та відповідні нормативні документи.

Таблиця 6.1 – Узагальнена характеристика основних небезпечних і шкідливих чинників

№	Потенційно небезпечний або шкідливий фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Нормативний документ
1	Висока температура повітря і поверхонь	Теплогенератор, сушильна шахта	Опіки, тепловий удар	ДСН 3.3.6.042-99
2	Запиленість повітря робочої зони	Транспортери, норії, шнеки	Хвороби дихальних шляхів, вибух	ДСН 3.3.6.037-99
3	Рухомі механізми	Вентилятори, шнеки, норії	Механічні травми	ДСТУ EN ISO 13857:2019
4	Шум і вібрація	Вентилятори, двигуни	Погіршення слуху, втома	ДСН 3.3.6.037-99
5	Електричний струм	Електрообладнання	Ураження струмом	ПУЕ, ДСТУ EN 60204-1:2015
6	Пожежо- та вибухонебезпека	Пил, паливо, газ	Пожежа, вибух	НПАОП 40.1-1.32-01
7	Недостатнє освітлення	Робочі платформи, щитові	Травми, помилки оператора	ДБН В.2.5-28:2018
8	Наявність чадного газу	Теплогенератор	Отруєння	ДСН 3.3.6.042-99

Окрім фізичних і хімічних чинників, у роботі операторів автоматизованих систем присутні значні психофізіологічні навантаження [15]. Постійний контроль мнемосхем, аналіз великого обсягу інформації та

необхідність оперативного реагування на аварійні сигнали формують підвищене нервово-емоційне напруження [30]. Для зменшення його впливу важливо дотримуватися раціональних режимів праці та відпочинку, визначених санітарними та гігієнічними рекомендаціями [15].

Оцінювання рівня небезпеки здійснюється за методологією HIRA, що передбачає визначення джерел ризику, аналіз імовірності їх появи та оцінку тяжкості можливих наслідків [30]. Якщо ризик перевищує допустимий рівень, застосовуються технічні та організаційні заходи, серед яких:

- використання блокувань і міжмашинних захистів;
- контроль температури поверхонь і вузлів та встановлення відповідних сповіщувачів;
- забезпечення ефективної вентиляції й пиловидалення;
- регулярна перевірка систем заземлення та апаратури електрозахисту відповідно до ПУЕ;
- інтеграція діагностики та контролю стану обладнання в SCADA-систему [23].

У підсумку експлуатація зерносушильного комплексу відбувається в умовах дії термічних, механічних, електричних, шумових і хімічних факторів [15]. Їхнє зниження можливе лише завдяки комплексному підходу, який охоплює технічні удосконалення обладнання, впровадження автоматичних систем контролю та захисту, дотримання вимог ПУЕ, ДСТУ EN 60204-1, галузевих НПАОП, а також відповідну підготовку персоналу та забезпечення його засобами індивідуального й колективного захисту [21], [23], [30].

6.2 Вимоги до мікроклімату, освітлення, шуму та вібрації на робочих місцях

Створення безпечних і комфортних умов праці під час експлуатації зерносушильного обладнання є важливою складовою системи охорони праці [15]. Параметри мікроклімату, освітленості, шумового та вібраційного

впливу безпосередньо позначаються на працездатності персоналу та надійності керування технологічними процесами [16]. Допустимі межі цих параметрів регламентуються санітарними нормами, державними будівельними нормами та стандартами безпеки [17]–[20].

6.2.1 Мікроклімат виробничих приміщень

Мікроклімат у зоні роботи сушильного обладнання формується під впливом гарячих повітряних потоків, теплового випромінювання від шахти сушарки та теплогенератора, а також виділення вологи із зерна [16]. За відсутності належної вентиляції та теплоізоляції це може спричинити перегрівання повітря, надмірну вологість, теплове перенавантаження та швидку втому персоналу [17].

ДСН встановлюють оптимальні та допустимі параметри температури, вологості й швидкості руху повітря для робіт середньої важкості (категорія II), що застосовуються і для обслуговування сушильних агрегатів та систем автоматики [16]. Відповідні значення наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 - Оптимальні та допустимі параметри мікроклімату для робочих місць сушильного обладнання.

Пора року	Температура повітря, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодна	18–22 (допуст. 16–25)	40–60 (допуст. до 70)	0,2–0,3
Тепла	21–25 (допуст. до 28)	40–60 (допуст. до 75)	0,3–0,4

У реальних умовах експлуатації зерносушильних установок температура повітря в робочій зоні може перевищувати 35–40 °С, особливо поблизу теплогенератора та шахти сушіння [17]. Це потребує обов'язкової організації ефективної загальнообмінної й місцевої вентиляції [17]. Згідно з

вимогами будівельних норм для приміщень з інтенсивними тепловиділеннями кратність повітрообміну повинна бути достатньою для підтримання безпечних параметрів мікроклімату та запобігання перегріванню персоналу [17].

У приміщеннях електрощитових, де працюють шафи керування та ПЛК, рекомендовано забезпечувати стабільну температуру, що відповідає нормам безпечної експлуатації електрообладнання, визначених ДСТУ EN 60204-1 [23].

Найбільш ефективним рішенням є використання припливно-витяжних систем з автоматичним регулюванням подачі повітря [17]. Інтеграція таких систем у SCADA забезпечує підтримання заданих параметрів мікроклімату в режимі реального часу та оперативне реагування на їхні відхилення [30].

6.2.2 Освітлення робочих місць

Рівень та якість освітлення є важливими чинниками безпечної роботи операторів і ремонтного персоналу [18]. Недостатня освітленість, нерівномірний світловий потік або сліпучі відблиски можуть спричинити помилки під час зчитування параметрів з панелей керування, неправильної інтерпретації сигналів тривоги й підвищувати ризик травмування на технологічних майданчиках [18].

Згідно з ДБН В.2.5-28:2018, робочі місця обслуговування зерносушильного обладнання відносять до зорових робіт III розряду, для яких мінімальна освітленість має становити не менше 200 лк при загальному штучному освітленні [18]. Для щитових приміщень, диспетчерських пунктів і зон розміщення панелей керування рекомендовано освітленість на рівні 300 лк і вище, що забезпечує комфортне зчитування інформації з екранів та мнемосхем [28].

Світильники доцільно виконувати на основі світлодіодних джерел із колірною температурою 4000–5000 К, високим коефіцієнтом передачі

кольору та низьким рівнем пульсацій [18]. Це дає змогу зменшити зорову втому й уникнути ефекту мерехтіння на екранах моніторів. У разі повного або часткового знеструмлення має автоматично вмикатися аварійне освітлення з інтенсивністю не менше 10 % від робочого, відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 [28]. Аварійні світильники встановлюють уздовж шляхів евакуації, біля виходів, щитів керування та місць розміщення засобів пожежогасіння [24].

6.2.3 Шум і вібрація

Для зниження шумового навантаження застосовують комплекс технічних рішень: установлення шумопоглинальних кожухів на вентилятори, використання віброізолюючих опор, акустичних екранів і оздоблення приміщень перфорованими панелями з шумопоглинальними матеріалами [19].

У місцях, де навіть після реалізації інженерних заходів рівень шуму перевищує нормативні значення, персонал зобов'язаний використовувати індивідуальні засоби захисту слуху (наушники або вставні вкладиші), сертифіковані за ДСТУ EN 352-2:2017 [19].

Вібраційний вплив особливо актуальний для працівників, які обслуговують вентилятори та приводи транспортерів [20]. Нормування параметрів виробничої вібрації здійснюється згідно з ДСН 3.3.6.039-99, де для операторів встановлено допустимі значення віброшвидкості не вище $0,63 \text{ м/с}^2$ у діапазоні частот 4–8 Гц [20]. Для зменшення вібрацій застосовують балансування обертових елементів, своєчасну заміну підшипників, віброізоляційні прокладки та опори [20].

Допустимі рівні шумового навантаження для робочих місць сушильного обладнання наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Допустимі рівні шуму для робочих місць сушильного обладнання

Категорія робіт	Еквівалентний рівень шуму, дБА	Максимальний рівень, дБА
Оператори сушарок, пульти керування	80	85
Технічне обслуговування, вентиляційні зони	85	90
Адміністративно-диспетчерські пункти	70	75

6.3 Засоби індивідуального захисту персоналу

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) призначені для зменшення впливу залишкових ризиків, які неможливо повністю усунути конструктивними заходами [30]. Вони мають відповідати вимогам ДСТУ EN 420 щодо ергономіки, безпечності матеріалів та маркування [30]. Для персоналу зерносушильного відділення передбачають такі основні ЗІЗ:

Захисний спецодяг – костюми з бавовняних або змішаних тканин з вогнезахисним просоченням згідно з ДСТУ EN ISO 11612; для робіт поблизу теплогенератора можливе застосування костюмів з відбивним алюмінізованим шаром [30].

Спеціальне взуття – черевики з протиковзкою та термостійкою підошвою, посиленням носком і антипрокольною устілкою, не нижче класу S3 за ДСТУ EN ISO 20345 [30].

Захисні рукавиці – термостійкі комбіновані рукавиці для робіт у зоні високих температур і механічних впливів [30].

Засоби захисту органів дихання – фільтрувальні напівмаски типу FFP2 або FFP3 для роботи в запиленому середовищі відповідно до ДСТУ EN 149 [19].

Захист слуху – протишумові навушники або вкладиші згідно з ДСТУ EN 352-2 [19].

Захист очей і обличчя – захисні окуляри або щитки з ударостійкого полікарбонату за ДСТУ EN 166, обов'язкові під час огляду пальників, очищення теплогенератора та при виконанні шліфувальних і зварювальних робіт [24].

Електрозахисні засоби – діелектричні рукавички, килимки та калоші для електротехнічного персоналу відповідно до вимог ПУЕ та НПАОП 40.1-1.21-98 [21].

Видача й облік ЗІЗ здійснюються в спеціальному журналі, а їх технічний стан підлягає регулярному контролю та своєчасній заміні [30].

6.4 Розробка заходів із пожежної та електробезпеки

Безпечна експлуатація зерносушильних установок значною мірою залежить від рівня пожежної та електробезпеки, оскільки поєднання високих температур, органічного пилу й паливно-повітряних сумішей створює передумови для виникнення пожеж і вибухів [40]. Тому технічне рішення комплексу повинно спиратися на принципи запобігання займанням, обмеження розповсюдження пожежі та забезпечення безпечної евакуації персоналу.

6.4.1 Пожежна безпека

Відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.32-01 та ДБН В.1.1-7:2016 приміщення зерносушильного відділення належить до категорії В1г за вибухопожежною небезпекою, оскільки в ньому можливе утворення пилоповітряних сумішей [22]. Зерновий пил при концентрації близько 50–100

г/м³ здатний утворювати вибухонебезпечну атмосферу, а температура його займання становить близько 400–450 °С [26].

Основними причинами пожеж у зерносушарках є перегрівання агента сушіння, відкладення пилу в шахтах та теплообмінниках, іскроутворення на металевих транспортерах, витоки газу чи палива, а також короткі замикання [24].

Для запобігання займанню застосовують такі технічні заходи:

- автоматичний контроль температури в зонах нагріву та охолодження з можливістю блокування подачі палива і запуском аварійної вентиляції;
- регулярне очищення сушарки від пилу та проведення профілактичного прибирання внутрішніх поверхонь;
- встановлення іскрогасників на вихлопних каналах теплогенератора;
- використання негорючих теплоізоляційних матеріалів;
- дотримання протипожежних розривів між зерносушаркою, теплогенератором і складом палива;
- оснащення об'єкта системами пожежного оповіщення та зв'язку [25].

На території сушильного відділення необхідно розміщувати вогнегасники відповідно до типових норм [29]. Вуглекислотні призначені для електроустановок, порошкові – для зерна та палива, пінні – для горючих рідин [29].

Кількість вогнегасників визначають із розрахунку один вогнегасник на 50 м², а місця їх встановлення позначають відповідними знаками [29]. Додатково в сушильних приміщеннях передбачають пожежні крани, а зовнішня система пожежогасіння повинна забезпечувати необхідну витрату води для ліквідації пожежі [24].

6.4.2 Електробезпека

Електрообладнання зерносушильного комплексу функціонує у складних умовах - підвищеної температури, вологості, запиленості та вібрації [21]. Це створює потенційні ризики ураження електричним струмом і загоряння ізоляції [23]. Електробезпека забезпечується конструктивними, технічними й організаційними заходами відповідно до ПУЕ (7-е видання) і НПАОП 40.1-1.21-98 “Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів” [21].

Основні заходи електробезпеки включають:

Захисне заземлення усіх металевих неструмоведучих частин обладнання, які можуть опинитися під напругою при пошкодженні ізоляції [21]. Опір заземлювального пристрою повинен бути не більшим за 4 Ом для установок напругою до 1 кВ, згідно з п. 1.7.101 ПУЕ [23].

Система вирівнювання потенціалів, що об'єднує корпуси електродвигунів, шафи керування, металеві трубопроводи та каркаси у спільний контур РЕ [23]. Вона зменшує ризик крокової напруги та електричних пробоїв.

Захист від коротких замикань і перевантажень - шляхом використання автоматичних вимикачів з характеристикою типу “С” або “D” згідно з ДСТУ EN 60898-1:2014 [23]. Для кіл керування застосовуються плавкі запобіжники типу gG [21].

Використання кабелів у термостійкій ізоляції (NYM, ВВГнг-LS), прокладених у металевих коробах або ПВХ-каналах із негорючого матеріалу [23].

Система аварійного відключення живлення (АВР) - у випадку пожежі або короткого замикання контролер автоматично знеструмлює всю установку, залишаючи живлення лише на системах аварійного освітлення й сигналізації [21].

Захисне відключення (ПЗВ) у колах до 1 кВ із номінальним струмом спрацювання не більше 30 мА, що гарантує миттєве відключення у разі витоку струму [23].

Шафи автоматизації та силові щити виконуються за ступенем захисту не нижче IP54, а для зовнішніх установок - IP65 відповідно до ДСТУ EN 60529:2019 [23].

Згідно з ПУЕ, розділ 1.9, персонал, який обслуговує електрообладнання, повинен мати групу з електробезпеки не нижче III для електромонтерів та II - для операторів сушарки [21]. Всі роботи з ремонту електроустановок дозволяється проводити лише при знятому напрузі й за нарядом-допуском [21].

6.5 Висновок

У розділі «Охорона праці» встановлено, що експлуатація зерносушильного комплексу належить до робіт з підвищеною небезпекою через поєднання дії високих температур, запиленості, шуму, вібрацій, рухомих механізмів, газопальникового та електротехнічного обладнання. Ідентифіковано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори: термічні, механічні, електричні, пожежо- та вибухонебезпечні, хімічні, а також психофізіологічні навантаження операторів. Їхня узагальнена характеристика наведена в таблиці 6.1, що дає змогу цілеспрямовано планувати заходи з мінімізації ризиків.

Показано, що забезпечення безпечних умов праці можливе лише за умови дотримання вимог санітарних норм, ДБН, ПУЕ, ДСТУ та галузевих НПАОП. Для мікроклімату, освітлення, шуму й вібрації визначено нормативні параметри, дотримання яких досягається завдяки раціональній вентиляції, теплоізоляції, правильно спроектованій системі освітлення, застосуванню шумопоглинальних і віброізоляційних рішень. Окремо обґрунтовано необхідність використання засобів індивідуального захисту (спецодяг, взуття, рукавиці, респіратори, засоби захисту слуху, очей та електрозахисні засоби) відповідно до вимог відповідних ДСТУ.

Розроблені технічні заходи з пожежної та електробезпеки передбачають застосування вибухопожежобезпечних рішень, систем контролю температури, пиловидалення, іскрогасіння, протипожежного оповіщення, а також захисного заземлення, вирівнювання потенціалів, автоматичного відключення живлення та використання апаратури належного ступеня захисту. У поєднанні з організаційними заходами – навчанням, інструктажами, контролем дотримання вимог безпеки – це формує комплексну систему охорони праці, яка забезпечує зниження виробничих ризиків, підвищення надійності технологічного процесу сушіння зерна та відповідність чинним нормативним документам.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Система автоматизованого керування технологічним процесом сушки зерна елеваторного комплексу» були отримані такі результати:

1. Проведено комплексний аналіз технологічного процесу сушіння зерна, сучасних промислових сушарок та тенденцій розвитку автоматизованих систем керування. Встановлено, що ефективність сушіння визначає якість, збереженість та економічні показники роботи елеваторного підприємства. Підтримання стабільних теплотехнічних параметрів, рівномірності видалення вологи та інтенсивності тепломасообміну є критичними для запобігання термічним ушкодженням зерна й оптимізації енергоспоживання.

2. Узагальнено конструктивні особливості основних типів промислових сушарок - шахтних, барабанних, рециркуляційних, баштових, стрічкових та пневматичних. Показано, що перспективними напрямками їх модернізації є поліпшення теплоізоляції, рекуперація тепла, удосконалення конфігурації повітряних каналів та впровадження високоточних вимірювальних систем. Це забезпечує підвищення продуктивності, збільшення рівномірності сушіння та зниження тепловтрат.

3. Встановлено недоліки традиційних систем керування, серед яких низька точність вимірювань, залежність від людського фактора, обмеженість функцій регулювання та відсутність механізмів автоматичної корекції параметрів. Такі обмеження спричиняють нестабільність режимів сушіння, перевитрати теплової енергії та погіршення якості продукції. Визначено, що застосування сучасних мікрохвильових, цифрових та ємнісних датчиків створює основу для реалізації інтелектуальних алгоритмів керування.

4. Проведений огляд тенденцій розвитку АСУТП засвідчив активне впровадження SCADA-рішень, адаптивних та інтелектуальних алгоритмів, дистанційного моніторингу та сучасних засобів промислової комунікації.

Встановлено, що автоматизація сушіння дозволяє зменшити енергоспоживання на 15–25% та скоротити втрати, пов'язані з нестабільними режимами, до 30%.

5. Обґрунтовано вибір ключових апаратних компонентів системи керування, включно з мікрохвильовим датчиком вологості Hydronix HPXT02, контролерами Siemens S7-1200 та Schneider Modicon M241, а також комунікаційними протоколами Modbus RTU/TCP. Переваги обраного датчика підтверджено його діелектричним принципом роботи, що забезпечує високу точність незалежно від температури, щільності та швидкості руху зернової маси.

6. Розроблено схему підключення датчика Hydronix HPXT02 та методику його інтеграції у ПЛК, що дозволило забезпечити високоточне вимірювання вологості в реальному часі та створити передумови для побудови адаптивної системи регулювання режимів сушіння. Зіставлення з альтернативними датчиками (зокрема Primex 80) підтверджує ефективність мікрохвильової технології для потокових сушильних процесів.

7. Сформовано структуру автоматизованої системи керування сушильним комплексом, що включає багаторівневий моніторинг, регулювання температури, вологості, витрати повітря та параметрів руху зернової маси. Удосконалені методичні підходи враховують інерційність об'єкта, стохастичний характер тепломасообміну та змінність технологічних параметрів, що підвищує точність керування й стабільність технологічного процесу.

8. Розроблено структурно-функціональну модель АСУТП сушильного комплексу, яка реалізує адаптивне керування в реальному часі та забезпечує підвищену ефективність роботи сушарки. Модель передбачає інтеграцію з SCADA-системою та можливість масштабування під різні типи сушильних агрегатів.

9. У роботі створено програмну реалізацію системи керування згідно з ІЕС 61131-3, включно зі структурами глобальних змінних, функціональними

блоками, моделями даних та механізмами взаємодії між модулями. Наведені фрагменти коду та графічні блоки єтверджують працездатність алгоритмів, відповідність вимогам надійності, безпеки та модульності.

10. Узагальнюючи результати роботи, встановлено, що розроблена автоматизована система керування забезпечує підвищення точності вимірювання вологості, стабільність параметрів сушіння, зменшення енерговитрат і можливість модернізації існуючих сушарок без значних конструктивних змін. Отримані результати мають практичну цінність для промислових елеваторних комплексів та створюють базу для подальшої розробки інтелектуальних алгоритмів керування.

11. Виконано техніко-економічний аналіз впровадження запропонованої автоматизованої системи керування процесом сушіння зерна. Розрахунки показали, що використання розробленого алгоритму та структури керування дозволяє зменшити річні експлуатаційні витрати за рахунок оптимізації тепломасообмінних процесів, зниження питомої енергоємності сушіння та підвищення точності доведення вологості. Отримані результати підтверджують економічну доцільність модернізації зерносушильних установок за запропонованою методикою.

12. Сформовано основні положення щодо забезпечення безпечної експлуатації автоматизованого електротехнічного комплексу сушіння зерна в умовах дії шкідливих чинників виробничого середовища. Розроблені рекомендації враховують вплив високотемпературного повітря, пилової концентрації, вібрацій та можливих відхилень у роботі електроприводів і датчиків, що підвищує надійність, довговічність та безаварійність функціонування системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. З.О. Тимків, О.А. Паянок Принципи побудови програмних середовищ автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна. Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2025), С 2738-2742, 24-27 червня 2025 року URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/904/1576/2888-1>.

2. З.О. Тимків, О.А. Паянок Застосування програмних середовищ для підвищення ефективності автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна. Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ- 2025). Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, С 137-139, 22-23 жовтня 2025 року URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/924/1612/2930-2>.

2.Сушіння зерна [Електроннийресурс] URL: <https://buklib.net/books/22982/>

3. Галюлько В.В Автоматизація процесу нагріву зерна у зерносушарці: Бакалаврська кваліфікаційна робота – Дніпро, НТУ«ДП», 2022 – 77с.

3. УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР [Електроннийресурс]URL:http://vtei.com.ua/doc/21_04_2021/126.pdf с. 74

4. Сенсор (сигналізатор) граничного рівня сипучих матеріалів ротаційного рівня : ДР-15 [Електроннийресурс] URL: https://temix.com.ua/uk/product/rotacionnyj_datchik_signalizator_predelnogo_urovnja_sypuchih_materialov_dr15/?gclid=EAIaIQobChMIq6ONn46vggMVtVCRBR0Gsg3aEAAAYASAAEgKs5fD_BwE

5. . Давачі: Навч. посіб. / М. В. Бурштинський ; М.В. Хай, Харчишин Б.М. – 2-ге вид. доповн - Нац. ун-т «Львівська політехніка». - Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2014. - 201 с.

6. Технічна документація cMT-FHDX [Електроннийресурс] URL: https://dl.weintek.com/public/Document/UM0/UM021004E_cMTFHDX_UserManual_eng.pdf

7. Міжнародний стандарт IEC 61131-3 [Електронний ресурс] URL: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php?file=/676150/mod_resource/content/1/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86_1_1.pdf.

8. Програмування ПЛК у Softlogic-системі kw multiprog : Навч. посіб. Ніколаєнко А. М. —Запоріжжя ЗДІА , 2008. - 202 с.

9. Мова релейно-контактної логіки або Ladder diagram [Електроннийресурс] URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ladder_diagram

10. Функціональні блокові діаграми або FBD [Електроннийресурс] URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/FBD>

11 . Послідовні функціональні схєми (діагра́ми) або Sequential function chart (SFC) [Електроннийресурс]URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Sequential_function_chart

12. Industrial Automation from Scratch OLUSHOLA AKANDE Birmingham May 2023, pp. 249 – 353.

13 Hydro-Probe XT [Електроннийресурс] URL: https://hydronix.com.ua/wp-content/uploads/2018/09/s10030_1_3_0.pdf

14 Датчик вологості Primex 80 [Електроннийресурс]

URL: <https://primex.org.ua/uk/products/moisture-sensors>

15 ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ України № 248 від 08.04.2014.

16 ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

17 ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – К. : Мінрегіонбуд України, 2013. – 149 с.

18 ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.
URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

19 ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

20 ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.
URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>

21 НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98). Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644

22 НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01). Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [Чинний від 01.01.2002].
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01>

23 ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 01.04.2017]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 109 с.

24 НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. – К. : МВС України, 2014. – 47 с.

25 ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення.
URL: <https://dwg.ua/dnl/15125>

26 ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація.
URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>

27 ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.
URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

28 ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги.

URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf

29 Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників».

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>

30 Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки щодо опрацювання розділу «Охорона праці» в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей. – Вінниця : ВНТУ, 2003. – 46 с.

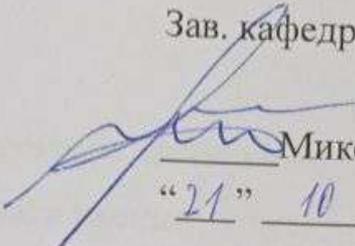
Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

«21» 10 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

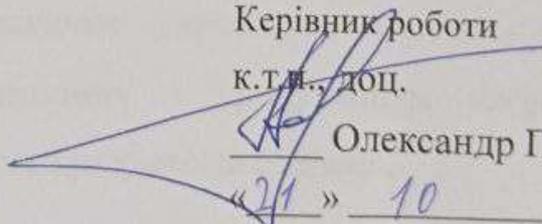
на магістерську кваліфікаційну роботу

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ
ПРОЦЕСОМ СУШКИ ЗЕРНА ЕЛЕВАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ**

08-24.МКР.013.00.000 ТЗ

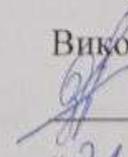
Керівник роботи

к.т.н., доц.

 Олександр ПАЯНОК

«21» 10 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-24м

 Зоряна ТИМКІВ

«21» 10 2025 р.

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Система автоматизованого керування технологічним процесом сушки зерна елеваторного комплексу».

Скорочене найменування розробки – «АСКТП сушіння зерна елеваторного комплексу».

Замовник – Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Система автоматизованого керування повинна забезпечувати повний контроль параметрів сушильного процесу, у тому числі багатозонний моніторинг температури, вхідної та вихідної вологості зерна, швидкості руху матеріального потоку та параметрів агента сушки. Однією з ключових вимог є розроблення алгоритмів, здатних підтримувати технологічний режим у межах, визначених виробником сушарки та технологічними нормами. Система має забезпечувати автоматичне управління електроприводами вентиляторів, норій, шнеків та заслінок з урахуванням енергетичної ефективності, режимів навантаження та пріоритетів безпеки.

4 Вимоги до розробки

Система повинна забезпечувати точний контроль технологічних параметрів, автоматичне регулювання режимів сушіння та захист обладнання від аварійних ситуацій. До вимог належать підтримання оптимальних температурних режимів, управління електроприводами вентиляторів і

транспортного обладнання, робота у запилених умовах та можливість інтеграції у загальну АСУТП елеватора.

5 Комплектація розробки

Комплекс системи включає ПЛК із необхідними входами та виходами, датчики контролю технологічних параметрів, частотні перетворювачі, шафу керування, панель оператора або SCADA-систему та програмне забезпечення, що реалізує алгоритми керування сушаркою.

6 Джерела розробки

1. "Automation of Agricultural Processes". Автор: G. O. Adeoye. Видавництво: Springer International Publishing. Рік: 2020

2. "Modern control systems for grain drying". Автори: A. G. Panov, N. V. Rodionova. Журнал: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Рік: 2021.

3. Industrial Automation from Scratch OLUSHOLA AKANDE Birmingham May 2023, pp. 249 – 353.

7 Технічні характеристики

Розроблена система забезпечує автоматизований контроль параметрів сушильної установки та регулювання процесу на основі вимірюваних значень температури, вологості та технологічних навантажень. Передбачено інтеграцію частотно-регульованих електроприводів вентиляторів та транспортного обладнання, що дозволяє оптимізувати витрати електроенергії. Алгоритм керування задіює автоматичні та аварійні режими, включаючи зупинку обладнання при виході параметрів за межі допустимих значень. Система відображає інформацію в реальному часі, забезпечує формування історичних даних та ведення архіву параметрів процесу.

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9 Елементна база

Програмований логічний контролер із модулями вводу-виводу, датчики температури технологічних зон, мікрохвильові датчики вологості Hydronix, датчики вологості вихідного зерна, датчики рівня та тиску, панель оператора або SCADA-система, шафа автоматизації з комутаційною та захисною апаратурою, автоматичні вимикачі та реле контролю, силові, сигнальні й мережеві кабелі, блоки живлення та джерело безперебійного

10 Конструктивне виконання

Складові установки виготовляються окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки.

11 Показники технологічності

Система має модульну структуру, що спрощує її монтаж, обслуговування та модернізацію. Використання стандартних промислових компонентів забезпечує високу надійність і ремонтпридатність.

12 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється персоналом елеватора, включаючи регулярний огляд датчиків, електроприводів і систем захисту. Програмне забезпечення може бути оновлене відповідно до змін технологічних вимог.

13 Умови експлуатації

Система автоматизації має забезпечувати ефективну роботу при широкому діапазоні температур та вологості, надійність, енергоефективність,

безпека під час сушіння зерна, можливість дистанційного керування і моніторингу процесу.

14 Порядок контролю та прийняття

Контроль виконання роботи здійснюється керівником відповідно до календарного плану. Прийняття магістерської роботи проводиться комісією, затвердженою кафедрою, згідно з графіком захистів.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ СУШКИ ЗЕРНА
ЕЛЕВАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ**

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження

2

Актуальність теми дослідження. Сушіння зерна є ключовим етапом післязбиральної обробки, що визначає збереженість та якість продукції. Порушення режимів сушіння спричиняє втрати маси, погіршення фізико-хімічних властивостей, розвиток мікрофлори та перевитрати енергоресурсів. У сучасних умовах зростає потреба в автоматизованих системах керування сушильними агрегатами, оскільки традиційні рішення часто не забезпечують достатню точність регулювання та стабільність технологічних параметрів. Використання сучасних датчиків температури й вологості, інтелектуальних контролерів та адаптивних алгоритмів дає можливість забезпечити енергоефективне та безпечне сушіння зерна, що визначає наукову й практичну актуальність дослідження.

Об'єктом є технологічний процес сушіння зерна в елеваторному комплексі.

Предметом є методи, засоби та алгоритми побудови автоматизованої системи керування сушінням у шахтній сушарці безперервної дії.

Метою роботи є розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом сушіння зерна з підвищеною точністю, енергоефективністю та надійністю функціонування.

До **задач** магістерської кваліфікаційної роботи можна віднести:

- Провести аналіз сучасних технологічних процесів сушіння зерна та існуючих систем керування сушильними агрегатами, визначити їхні недоліки, інерційні властивості об'єкта та чинники, що впливають на точність підтримання температурно-вологісних режимів;
- Дослідити вимірювальні засоби контролю вологості та температури, зокрема мікрохвильові датчики Hydronix, та обґрунтувати доцільність їх застосування у системах автоматизованого керування сушильними комплексами різних типів;
- Розробити структурну, функціональну та принципову електричну схему АСУТП сушильного комплексу, що забезпечує можливість інтеграції у існуючі елеваторні технологічні лінії без суттєвої реконструкції;
- Провести техніко-економічне обґрунтування впровадження розробленої системи, визначити капітальні та експлуатаційні витрати, оцінити економічний ефект від підвищення точності регулювання, зменшення технологічних втрат та покращення якості продукції;
- Сформулювати вимоги та рекомендації щодо безпечної експлуатації системи автоматизації та сушильного обладнання з урахуванням чинників пожежної небезпеки, високих температур, запиленості та інших шкідливих виробничих факторів

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШКИ ЗЕРНА ЕЛЕВАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ

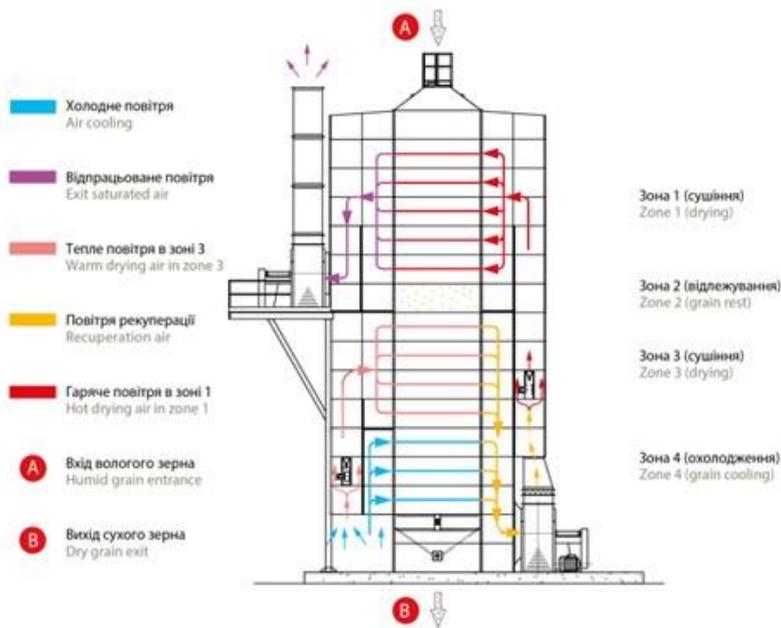


Рисунок 1.1. – Теплова схема потокової шахтної зерносушарки без системи рекуперації тепла.

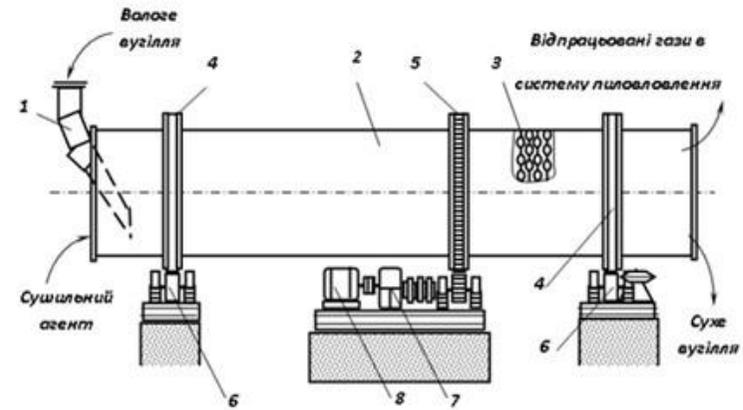


Рисунок 1.2. – Схема барабанної сушарки

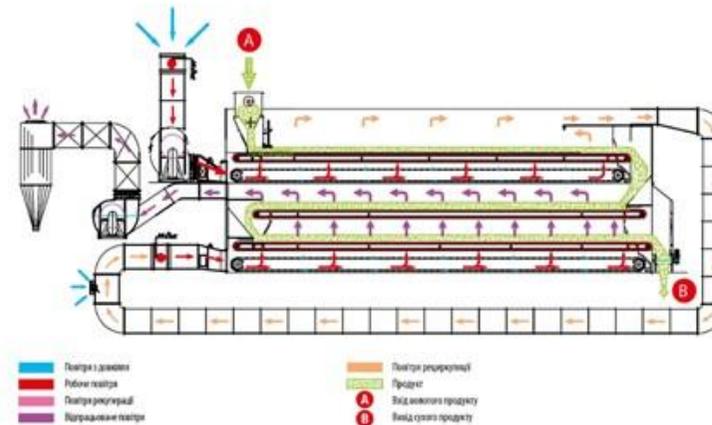


Рисунок 1.3. – Тепло схема рециркуляційної сушарки

ОБҐРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ АСУТП ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ СУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

4



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд мікрохвильового датчика вологості Hydro-Probe XT (Hydronix Ltd)

Таблиця 2.1 – Основні характеристики мікрохвильового датчика Hydro-Mix XT

Параметр	Значення
Тип сенсора	Мікрохвильовий сенсор вологості в реальному часі
Призначення	Вимірювання вологості у змішувальних процесах (бетон, зерно, комбікорм, сипучі матеріали)
Діапазон вимірювання вологості	0...100% (залежить від матеріалу)
Точність	До $\pm 0,2\%$ (після калібрування під конкретний матеріал)
Метод вимірювання	Патентований метод мікрохвильового аналізу об'ємної вологості
Матеріал робочої поверхні	Надміцний зносостійкий карбід вольфраму
Живлення	15...30 VDC
Споживаний струм	< 200 mA
Інтерфейси зв'язку	RS485 (Modbus), 4–20 mA, 0–10 V
Температурний діапазон роботи	-20...+70 °C
Температура поверхні матеріалу (максимум)	До 80–90 °C
Герметичність / Захист	IP68
Монтаж	Фланцеве кріплення в стінку змішувача/каналу
Робочий тиск	До 5 бар
Частота оновлення даних	До 25 вимірювань/сек

Typical Installation

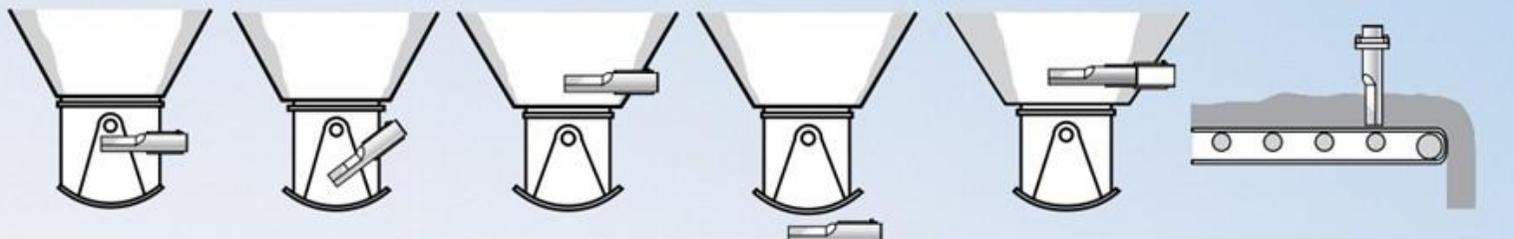


Рисунок 2.3 – Встановлення датчика Hydro-Mix XT у технологічній лінії

Angle of Sensor

Ensures continuous flow over the sensor

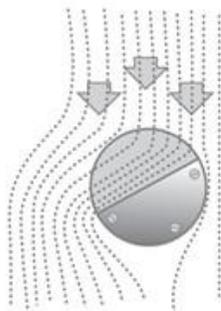


Рисунок 2.4 – Кут установки сенсора для забезпечення безперервного потоку матеріалу над поверхню вимірювання (Hydronix Ltd)

Frequency / Amplitude

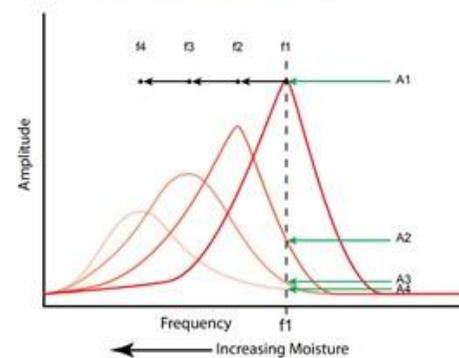


Рисунок 2.5 – Залежність частоти та амплітуди мікрохвильового сигналу від вологості матеріалу (Hydronix Ltd)

Інтеграція вимірювальних засобів у систему керування

6

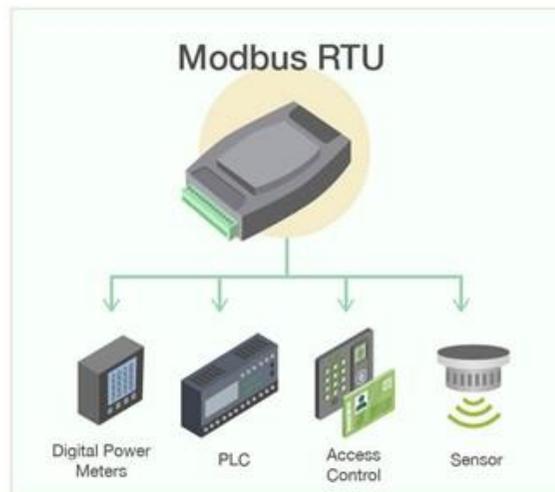
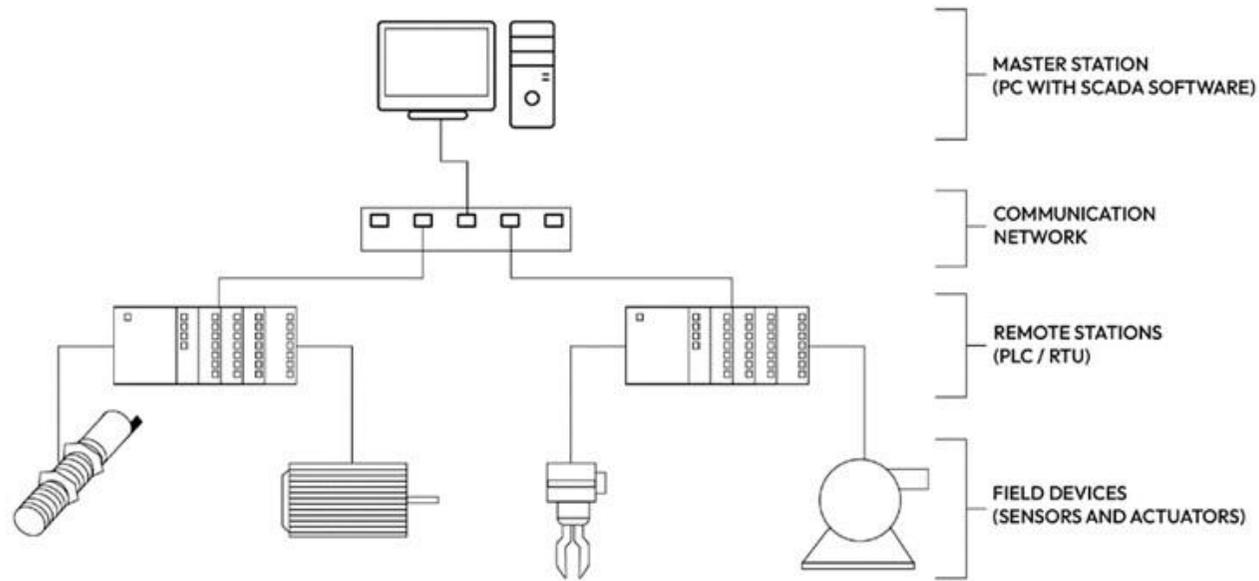


Рисунок 2.8 – Спрощена архітектура SCADA-системи для керування процесом сушіння зерна

Рисунок 2.7 – Взаємодія сенсорів і контролера через інтерфейс Modbus RTU

Концептуальна архітектура автоматизованої системи керування сушильним комплексом

7

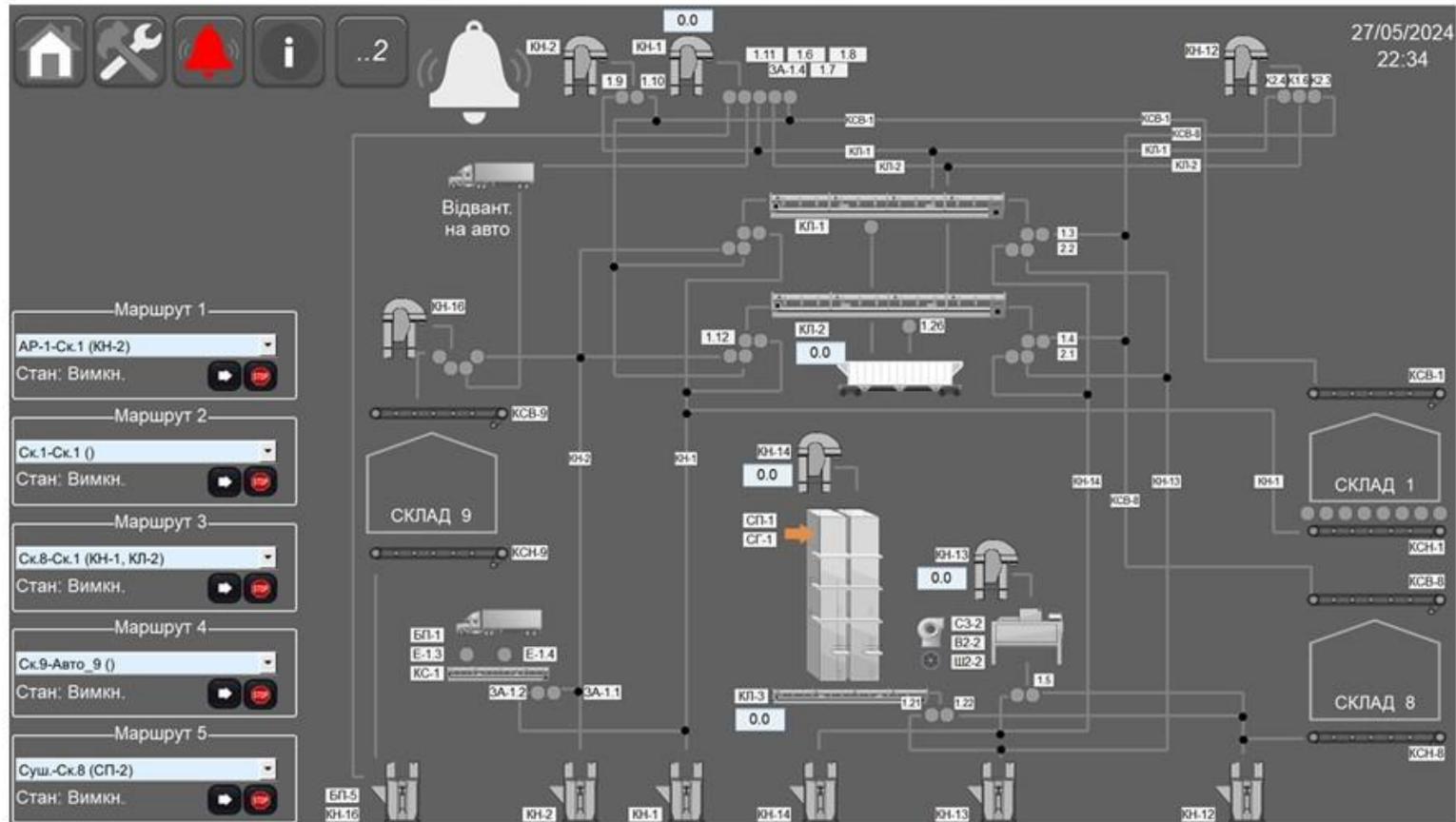


Рисунок 2.11 – Мнемосхема автоматизованої системи керування процесом сушіння зерна

Розробка структурної, функціональної та електричної схеми АСУТІ сушильного комплексу

8

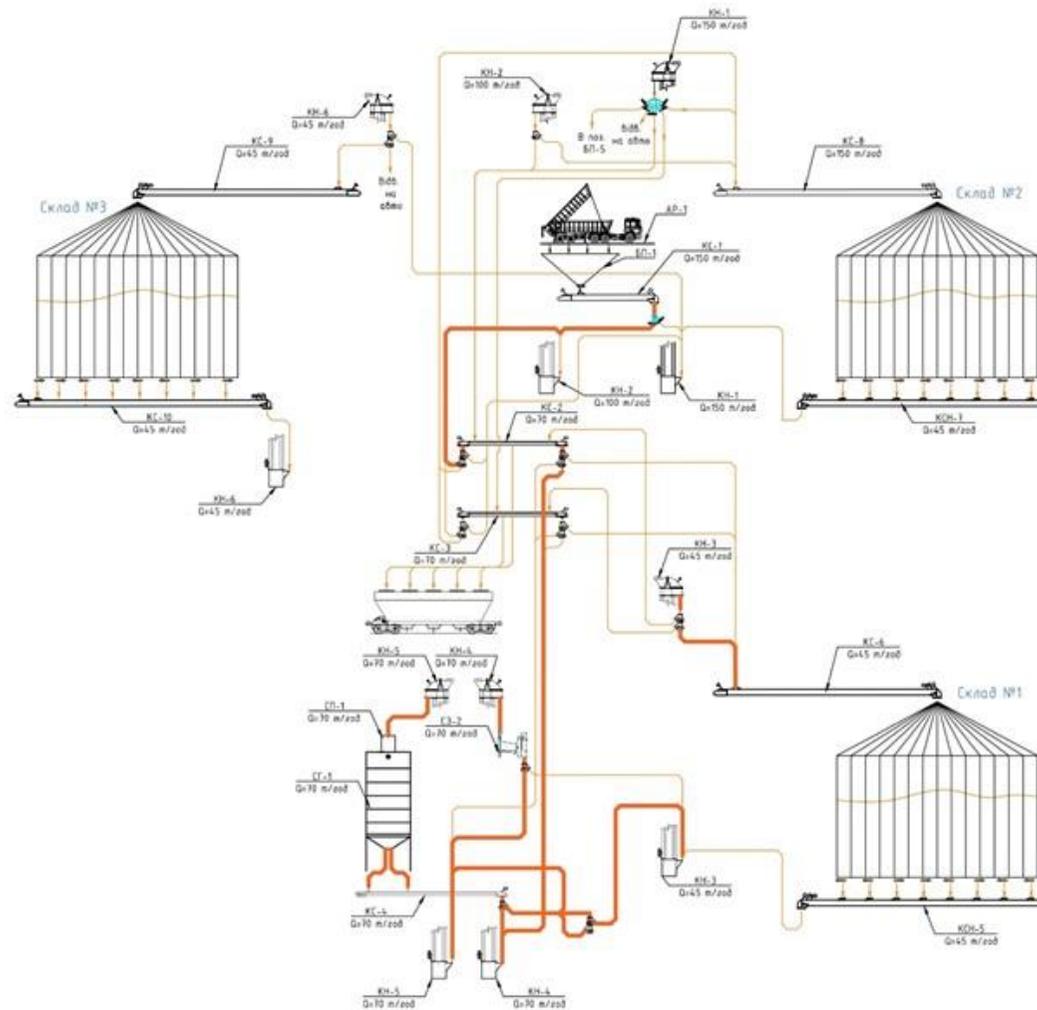


Рисунок 3.1 – Структурна схема технологічного процесу

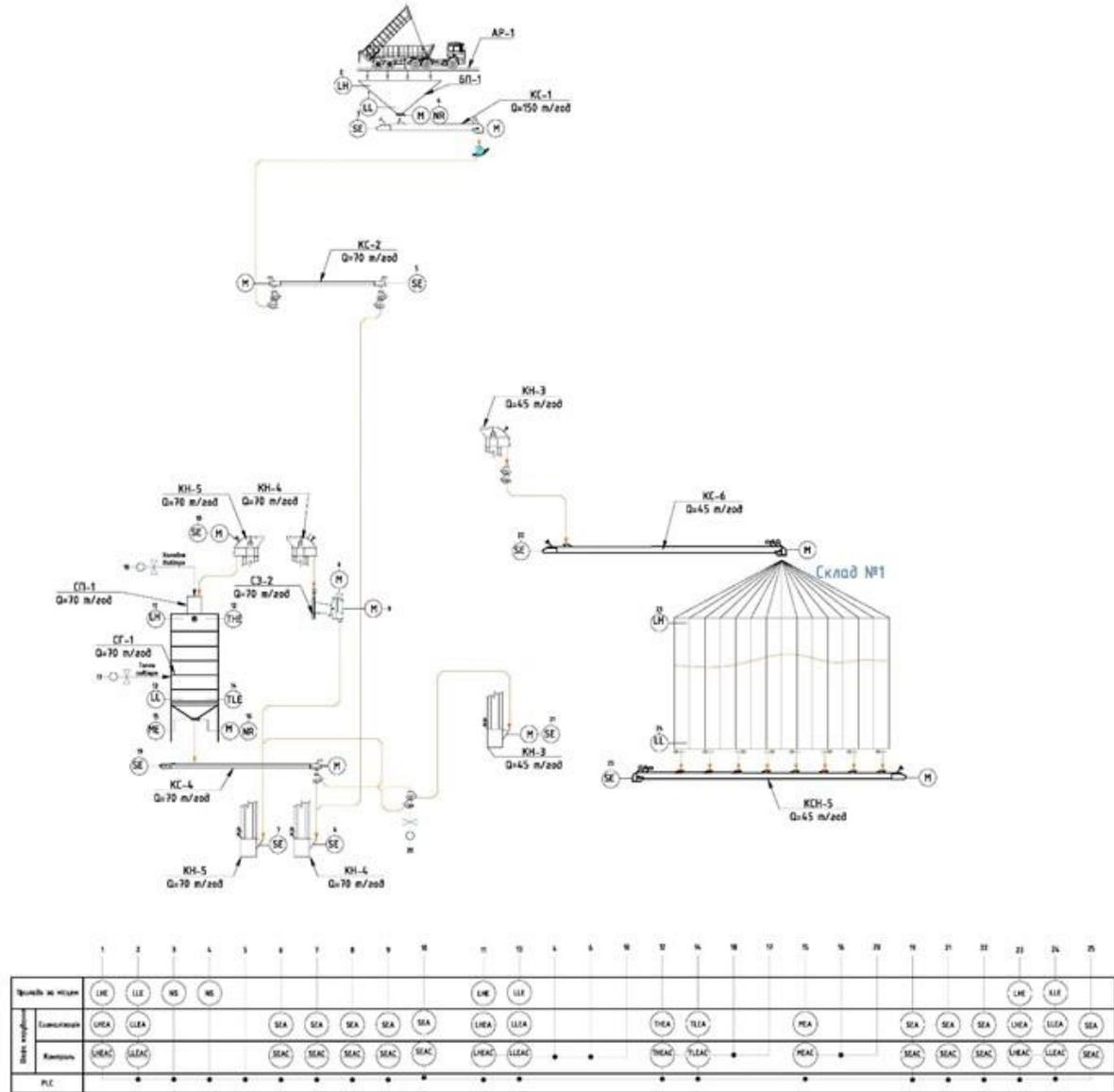


Рисунок 3.2 – Функціональна схема АСУТП сушильного комплексу

Принципова електрична схема живлення та керування

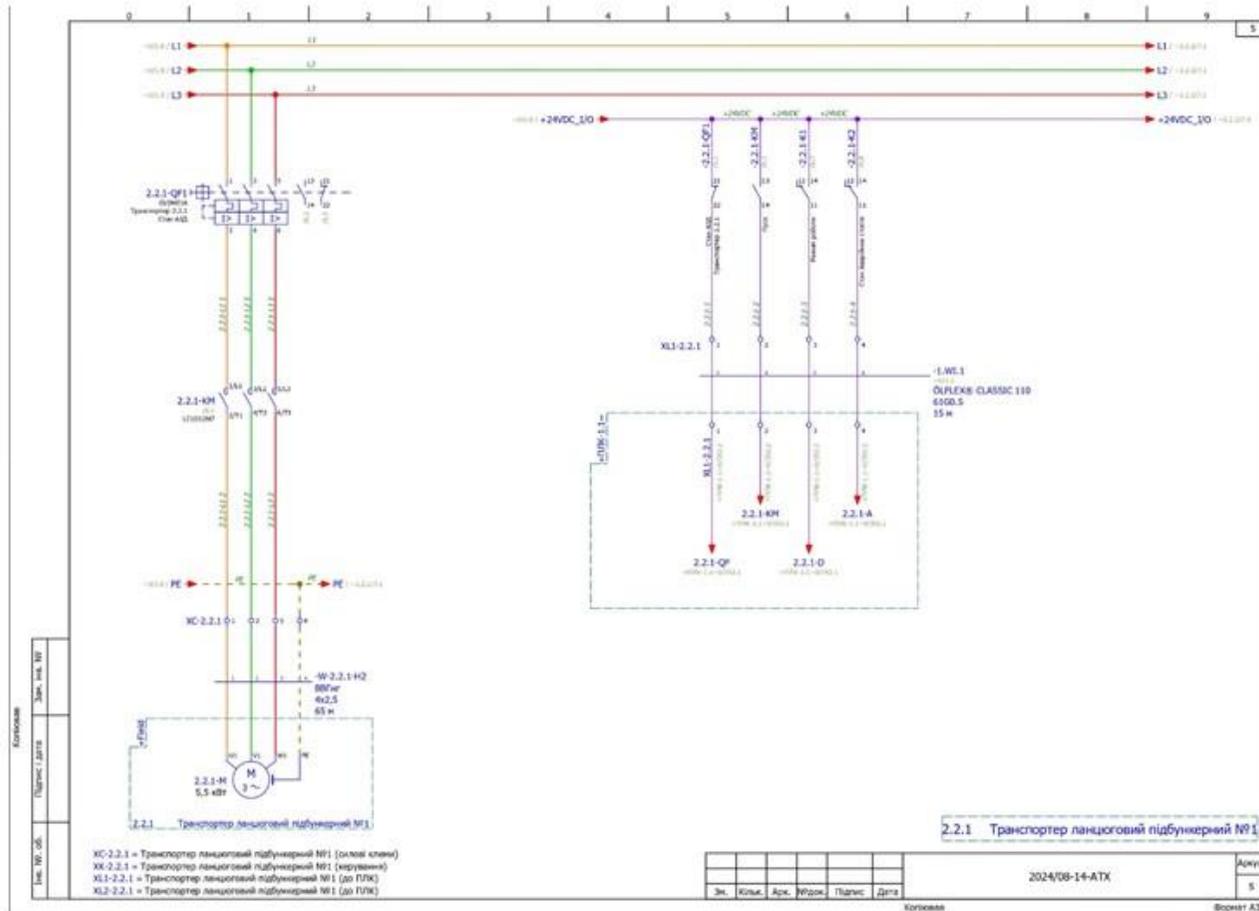


Рисунок 3.3– Принципова електрична схема живлення транспортера ланцюгового №1 (силова частина)

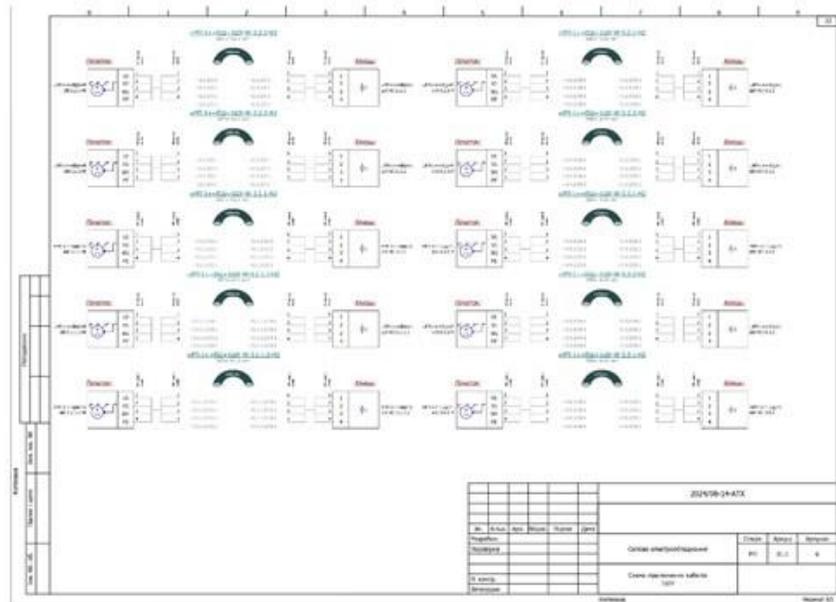


Рисунок 3.5 – Кабельний журнал та схема підключення клем 1ШУ

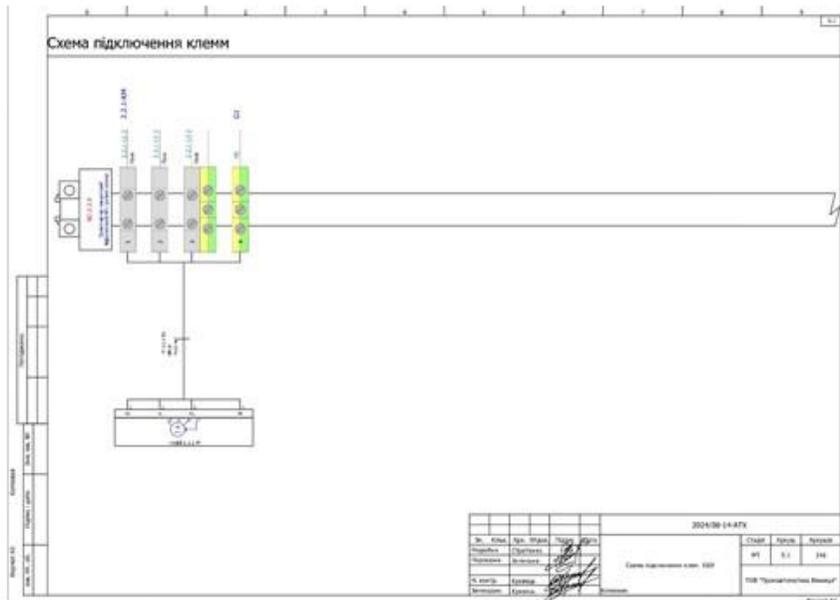


Рисунок 3.6 – Схема підключення клем шафи керування 1ШУ

Конструктивне виконання шафи керування 1ШУ

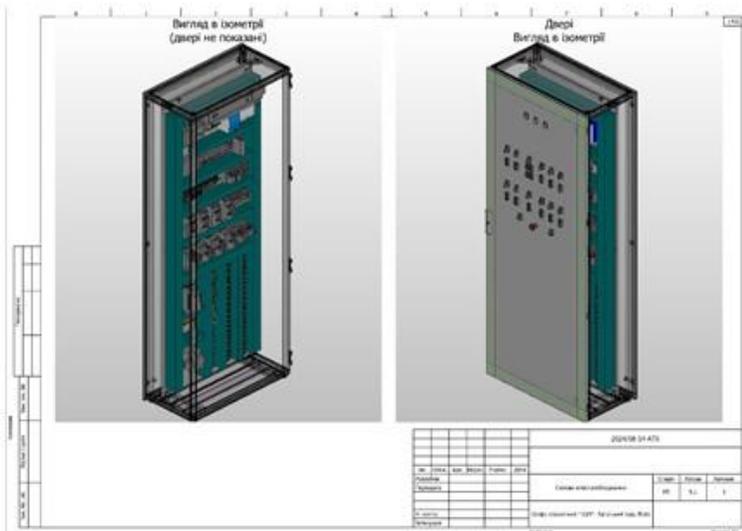


Рисунок 3.7 – Шафа керування 1ШУ: вигляд в ізометрії

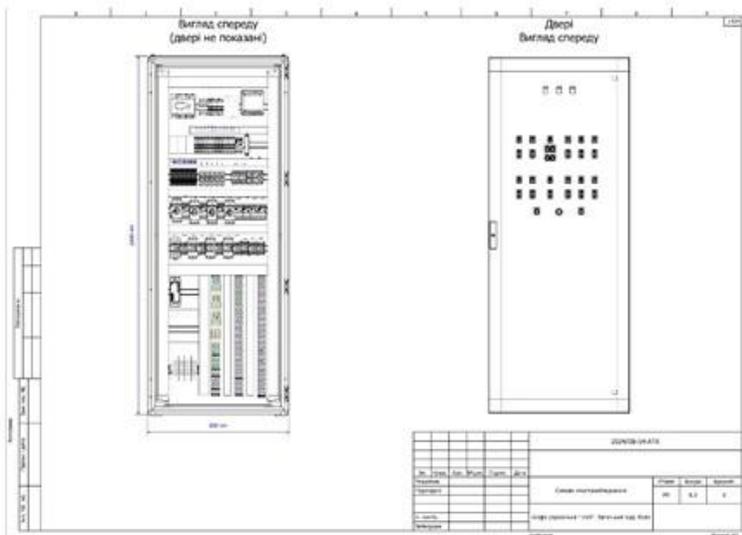


Рисунок 3.8 – Шафа керування 1ШУ: вигляд спереду та компоновка елементів

Інтеграція мікрохвильового датчика вологості Hydronix HPXT02 у систему автоматизованого керування сушильним комплексом

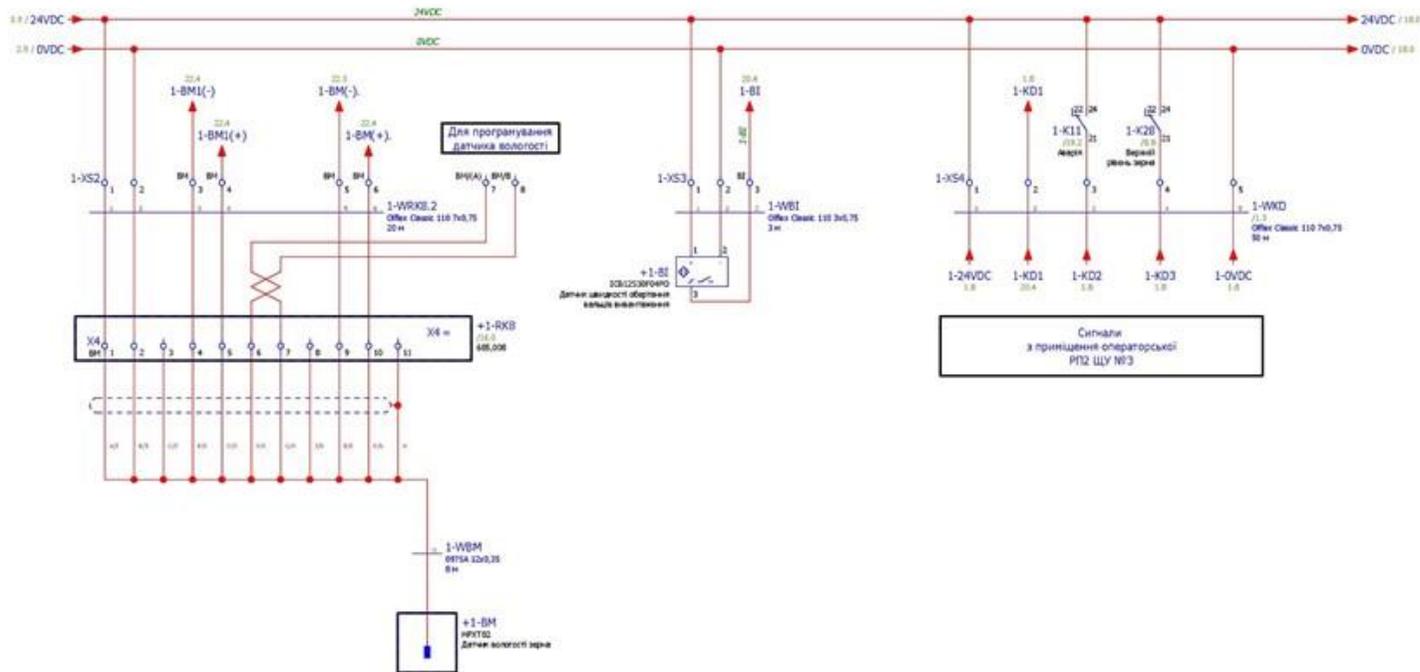


Рисунок 3.9 – Принципова електрична схема підключення мікрохвильового датчика вологості Hydronix HPXT02

Основні принципи побудови програми:

- модульність — окремий FB для кожного механізму;
- уніфікована логіка обробки всіх механізмів;
- масштабованість — легке додавання нових приводів та датчиків;
- ієрархічна структура змінних та блоків;
- реалізація сценаріїв безпеки, блокувань, діагностики.

Глобальні змінні забезпечують:

- централізоване зберігання станів та команд;
- обмін даними між функціональними блоками;
- інтеграцію з SCADA/HMI;
- швидке налагодження та діагностику.

Типовий функціональний блок механізму (FB):

- обробка команд Start/Stop;
- перевірка дозволів, аварій, станів датчиків;
- керування приводом (пускач/ЧП);
- формування діагностики та захистів.

ВИСНОВКИ

- Виконано аналіз технології сушіння зерна та сучасних сушарок; визначено ключові параметри, що впливають на якість та енергоефективність.
- Виявлено недоліки традиційних систем керування та обґрунтовано необхідність використання сучасних датчиків і адаптивних алгоритмів.
- Проведено огляд тенденцій АСУТП: SCADA, дистанційний моніторинг, інтелектуальні алгоритми.
- Обґрунтовано вибір обладнання: датчик вологості Hydronix HPXT02, контролери Siemens S7-1200 і Schneider M241, протоколи Modbus.
- Розроблено схему підключення та методику інтеграції HPXT02 в ПЛК, підтверджено переваги мікрохвильового вимірювання.
- Створено структуру АСУТП сушильного комплексу з багаторівневим контролем температури, вологості та повітряного потоку.
- Побудовано структурно-функціональну модель системи з адаптивним керуванням та інтеграцією у SCADA.
- Реалізовано програмну частину за ІЕС 61131-3: глобальні змінні, функціональні блоки, модульна логіка.
- Доведено, що система зменшує енерговитрати, підвищує точність сушіння та може бути впроваджена без значних конструктивних змін.
- Проведено техніко-економічний аналіз, який підтвердив економічну доцільність модернізації сушарки.
- Розроблено рекомендації щодо безпечної експлуатації комплексу в умовах підвищених температур, пилу та вібрацій.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше обґрунтовано застосування мікрохвильового датчика вологості Hydronix HPXT02 у системах автоматизованого керування сушінням зерна, визначено його переваги, зумовлені діелектричним принципом вимірювання (висока точність незалежно від температури, щільності та швидкості руху зернової маси). Розроблено схему його підключення за протоколом Modbus RTU, методику інтеграції у промисловий контролер та удосконалено науково-технічні засади побудови систем керування сушінням, які враховують інерційність зернової маси, змінність температурно-вологісних параметрів і стохастичний характер тепломасообміну у шахтних сушарках безперервної дії.

2. Розроблено структурно-функціональну модель автоматизованої системи керування технологічним процесом сушіння зерна, у якій реалізовано багаторівневу систему моніторингу та регулювання, що забезпечує адаптивне керування в режимі реального часу з підвищеною ефективністю та надійністю.

Практичне значення одержаних у роботі результатів полягає в наступному:

1. Розроблена система автоматизованого керування процесом сушіння зерна придатна до впровадження на елеваторних підприємствах для модернізації існуючих сушарок різних типів (шахтних, рециркуляційних тощо). Її інтеграція не потребує суттєвої реконструкції технологічної лінії, що забезпечує можливість поетапного та економічно обґрунтованого впровадження.

2. Запропонований алгоритм керування забезпечує високоточне підтримання технологічних параметрів процесу сушіння - температури, витрати повітря, вологості зерна - з оперативним реагуванням на зміни зовнішніх і внутрішніх умов. Це сприяє підвищенню стабільності технологічного процесу, поліпшенню якості готової продукції та зниженню технологічних втрат.

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 2 тези доповідей матеріалів конференцій:

- З.О. Тимків, О.А. Паянок Застосування програмних середовищ для підвищення ефективності автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна. Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025). Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, С 137-139, 22-23 жовтня 2025 року URI: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/924/1612/2930-2>.

- З.О. Тимків, О.А. Паянок Принципи побудови програмних середовищ автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна. Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2025), С 2738-2742, 24-27 червня 2025 року URI: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/904/1576/2888-1>.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Система автоматизованого керування технологічним процесом сушки зерна елеваторного комплексу
Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-24м

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,61 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.
(прізвище, ініціали, посада)

доцент кафедри КЕМСК Проценко Д.П.
(прізвище, ініціали, посада)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Тимків З.О.

(прізвище, ініціали)

08-24.МКР.013.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Система автоматизованого керування технологічним процесом сушки зерна елеваторного комплексу	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Тимків З.О.		21.11				
Перевірив		Паянок О.А.		21.11				
Т. контр.								
Огляд.		Войтків Ю.		19.12				
Норм. кон.		Палко С.		21.11				
Затверд.		Мошнорів М.М.		25.11				

ВНТУ, гр. ЕПА-24м