

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему "Розроблення системи автоматизованого керування процесом
сушіння зерна у вертикальній зерносушарці з використанням технічних
засобів Schneider"**

Спеціальність: 174 - "Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка"

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент. _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Грищенко В.О.
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Великий І.І.
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

автоматики та робототехнічних систем

ім. акад. І.І. Мартиненка

(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Великому Івану Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 174 - "Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: "Розроблення системи автоматизованого керування процесом сушіння зерна у вертикальній зерносушарці з використанням технічних засобів Schneider",

затверджена наказом ректора НУБіП України від "24" 10 2025 р. № 2515"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "31" травня 2026 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Технологія і промислове обладнання для виробництва вермикуліту

4.2. Розробка та дослідження математичної моделі процесу сушіння вермикуліту.

4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.

4.4. Розробка цифрової системи керування.

4.5. Схеми системи автоматизації.

4.6. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування вологістю в сушарці для сушіння вермикуліту.

5.2. Система автоматизації процесу сушіння вермикуліту в сушарці. Схема електрична принципова.

5.3. Система автоматизації процесу сушіння вермикуліту в сушарці. Схема електрична з'єднань.

5.4. Система автоматизації процесу сушіння вермикуліту в сушарці. Схема електрична підключень.

5.5. Система автоматизації процесу сушіння вермикуліту в сушарці. Зовнішній вид щита керування.

Дата видачі завдання "25" жовтня 2025 року

**Керівник
бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Грищенко В.О.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Великий І.І.
(П.І.Б.)

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУШІННЯ ЗЕРНА У ВЕРТИКАЛЬНІЙ ЗЕРНОСУШАРЦІ	9
1.1 Технічний опис вертикальної зерносушарки	9
1.2 Технологічний процес вертикальної зерносушарки	11
1.3 Інформаційний аналіз технологічного об'єкта керування	14
1.4 Опис існуючих систем керування зерносушарки	17
1.5 Розробка функціональної схеми зерносушарки	19
РОЗДІЛ 2 ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ ЯК ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ	21
2.1 Побудова математичної моделі	21
РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ЗЕРНОСУШАРКОЮ	25
3.1 Обґрунтування та вибір алгоритму керування зерносушаркою	25
3.2 Розробка структурно-функціональної схеми системи автоматизованого регулювання	28
3.3 Вибір первинного вимірювального перетворювача температури	29
3.4 Вибір первинного вимірювального перетворювача вологості	31
3.5 Вибір виконавчого пристрою	33
3.6 Синтез автоматизованого регулювання	35
3.7 Вибір програмованого логічного контролера Schneider Electric	38
РОЗДІЛ 4 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	42
4.1 Вибір пускозахисної апаратури, проводів та кабелів	42
4.1.1 Вибір автоматичних вимикачів	42
4.1.2 Вибір електромагнітних пускачів	45
4.1.3 Вибір кабелю живлення для шафи керування	47
4.1.4 Вибір проводів для живлення виконавчого механізму	48
4.1.5 Вибір кабелю для живлення кола керування	48
4.2 Розробка електричної принципової схеми	49
4.3 Розробка схеми електричних з'єднань	51
4.4 Розробка схеми підключень	52
4.5 Розробка загального вигляду щита керування	53
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	55
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	63

ВСТУП

Зерносушіння є одним із найважливіших технологічних процесів у зерновиробництві, що безпосередньо визначає якість та збереженість зернової маси. Відповідно до агротехнічних вимог, зерно пшениці, ячменю та кукурудзи перед закладкою на зберігання повинне мати вологість не вище 14 %, насіннєвий матеріал не вище 13 %. Досягнення цих показників можливе лише при строгому дотриманні температурних режимів сушіння, що вимагає застосування сучасних засобів автоматизації.

Вертикальні зерносушарки є одним із найбільш перспективних типів сушильного обладнання: порівняно із шахтними аналогами вони мають меншу металоємність, рівномірніший розподіл теплоносія по перерізу колони, вищу питому продуктивність та нижчі питомі витрати теплоти на випаровування одиниці вологи. Проте реалізація потенціалу вертикальних зерносушарок можлива лише за умови якісного автоматизованого керування технологічним процесом.

Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розроблення системи автоматизованого керування процесом сушіння зерна у вертикальній зерносушарці на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M241 та суміжного периферійного обладнання виробника Schneider Electric. Обраний апаратний комплекс забезпечує реалізацію цифрового ПІД-алгоритму регулювання температури теплоносія, безперервний контроль вологості зерна на виході, а також функції аварійного захисту та дистанційного моніторингу через інтерфейс Ethernet (Modbus TCP/IP).

Актуальність роботи визначається зростанням вимог до якості зерна при одночасному здорожінні паливно-енергетичних ресурсів. Автоматизована система керування дозволяє знизити питомі витрати палива на 12-18 % порівняно з ручним режимом за рахунок оптимізації температурного графіку сушіння та зменшення перерегулювань.

У роботі вирішені такі завдання: аналіз конструктивних особливостей та режимів роботи вертикальної зерносушарки; побудова математичної моделі об'єкта регулювання методом ідентифікації; синтез та дослідження цифрового ПІД-регулятора у середовищі MATLAB/Simulink; вибір і обґрунтування засобів автоматизації Schneider Electric; розробка повного комплексу електричної документації; техніко-економічне обґрунтування впровадження системи.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУШІННЯ ЗЕРНА У ВЕРТИКАЛЬНІЙ ЗЕРНОСУШАРЦІ

1.1. Технічний опис вертикальної зерносушарки

Вертикальна зерносушарка є агрегатом безперервної дії, призначеним для теплового сушіння зернових (пшениця, кукурудза, ячмінь, жито), зернобобових (горох, соя) та олійних (соняшник, ріпак) культур. Принципова відмінність від шахтної (горизонтальної) конструкції полягає у вертикальному переміщенні зерна під дією сили тяжіння без примусових транспортних механізмів у зоні сушіння, що суттєво підвищує рівномірність обробки та знижує механічне пошкодження зерна.



Рис. 1.1 Загальний вигляд вертикальної зерносушарки

- приймальний бункер з рівномірним розподілом зернового матеріалу по перерізу колони;
- вертикальна циліндрична сушильна колона висотою 8-15 м, діаметром 1,5-3,0 м;
- топковий агрегат (теплогенератор) на рідкому або газовому паливі;
- система відцентрових вентиляторів для подачі теплоносія;
- зона охолодження у нижній частині колони;
- вивантажувальний шнек або роторний дозатор з регульованою продуктивністю;
- пульт керування та шафа автоматики.

Зерно завантажується до приймального бункера зерносушарки за допомогою норії або пневматичного транспортера, після чого надходить у сушильну шахту. Під дією сили тяжіння зернова маса рівномірно переміщується вниз суцільним потоком через сушильну камеру.

Нагрітий теплоносій, що утворюється в теплогенераторі, подається через систему розподільчих радіальних каналів і проходить крізь шар зерна в поперечному напрямку. У процесі тепло та масообміну відбувається інтенсивне випаровування вологи із зерна та її перенесення потоком теплоносія. У міру переміщення зерна вниз процес сушіння багаторазово повторюється в окремих зонах сушильної шахти до досягнення необхідної кінцевої вологості.

Після завершення процесу висушене зерно проходить зону охолодження та вивантажується через розвантажувальний механізм для подальшого транспортування або зберігання.

Таблиця 1.1. Технічні характеристики вертикальної зерносушарки

Параметр	Значення
Продуктивність ($W_{п} = 20 \%$, $W_{к} = 14 \%$)	15 - 25 т/год
Інтенсивність випаровування вологи	300 - 500 кг/год
Максимальна витрата дизельного палива	120 - 180 кг/год
Вид пального	Дизельне або природний газ
Споживана електрична потужність	75 - 110 кВт
Максимальна температура теплоносія	до 120 °C
Температура зерна на виході	не вище 50 °C (продовольче)

1.2. Технологічний процес вертикальної зерносушарки

Технологічний процес вертикальної зерносушарки є безперервним і складається з чотирьох послідовних стадій: підготовки, підігріву, інтенсивного сушіння та охолодження. Кожна стадія характеризується власним тепловим режимом, що визначається конструктивними параметрами колони та налаштуваннями системи керування.

Стадія підготовки. Зерно перед подачею у сушарку обов'язково очищають від сторонніх домішок. Засміченість не повинна перевищувати 3 %, а вміст соломистих домішок довжиною понад 50 мм - не більше 0,2 %. Підвищений вміст домішок знижує рівномірність сушіння та може призвести до засмічення повітряних каналів колони.

Стадія підігріву. Зерно, надходячи у верхню зону колони з початковою температурою навколишнього середовища (5-20 °C), поступово нагрівається теплоносієм до робочої температури. Теплообмінник топки нагріває атмосферне повітря до температури 80-120 °C, після чого теплоносій подається у сушильну камеру. Тепловіддача від повітря до зерна здійснюється конвективним методом.

Стадія інтенсивного сушіння. Займає основну (центральну) частину колони. Тут відбувається найінтенсивніше випаровування вологи: зерно перебуває під дією теплоносія з максимальною температурою. Контроль температури в цій зоні є критично важливим, оскільки перегрівання може призвести до денатурації білків клейковини та погіршення посівних якостей зерна.

Стадія охолодження. У нижній зоні колони гаряче зерно продувається атмосферним повітрям без підігріву. Охолодження є обов'язковою операцією: подача на зберігання зерна з температурою вище температури навколишнього середовища на 8-10 °C недопустима через ризик samozagorannya та активізації шкідників. Час охолодження становить 20-30 хв.

Таблиця 1.2. Режими сушіння продовольчого зерна пшениці у вертикальній зерносушарці

Якість клейковини (ІДК)	Вологість, %	Пропуск	Макс. темп. нагрівання зерна, °C	Макс. темп. теплоносія, °C
Добра (45-75)	≤20	-	50	140
Добра (45-75)	>20	Перший	45	110
Міцна (до 40)	≤20	-	45	120
Міцна (до 40)	>20	Перший	40	90
Слабка (>80)	≤20	-	60	150
Сильна, тверда, цінних сортів	≤20	-	50	100

Таблиця 1.3. Граничні значення вологості зерна

Культура	Суха, %	Середня вологість, %	Волога, %	Сира, %
Пшениця, жито, ячмінь, овес	14	14-15,5	15,5-17	>17
Кукурудза (у зерні)	14	14-15,5	15,5-17	>17
Горох, кормові боби	14	14-16	16-18	>18
Соняшник	7	7-8	8-10	>10
Соя	12	12-14	14-16	>16
Ріпак	9	9-11	11-13	>13

1.3. Інформаційний аналіз технологічного об'єкта керування

З позицій теорії автоматичного керування вертикальна зерносушарка є розподіленим об'єктом з розосередженими параметрами. Проте для синтезу практичної системи керування використовується зосереджена модель каналу “витрата палива - температура теплоносія”, яка адекватно описує домінуючу динаміку процесу.

Основні вхідні змінні (керуючі та збурюючі впливи):

u_1 - відносне відкриття регулюючого клапана витрати палива (0-100 %), основний керуючий вплив;

u_2 - частота обертання вентилятора теплоносія (0-50 Гц), корекційний вплив;

u_3 - частота обертання вивантажувального механізму (0-50 Гц), керує продуктивністю i , відповідно, часом перебування зерна;
 f_1 - початкова вологість зерна W_p (збурення);
 f_2 - температура атмосферного повітря T_n (збурення);
 f_3 - теплотворна здатність палива Q_n (збурення).

Основні вихідні змінні (контрольовані параметри):

y_1 - температура теплоносія T_t у камері нагріву, °С (основна регульована змінна);
 y_2 - температура зерна T_z на виході із зони сушіння, °С;
 y_3 - відносна вологість зерна W_k на виході із сушарки, %;
 y_4 - рівень зерна у надсушильному бункері, % (дискретний контроль).

Вимоги до системи керування. Температура теплоносія повинна підтримуватися з точністю ± 2 °С у встановленому режимі та забезпечувати час регулювання при стрибку завдання на 10 °С не більше 600 с. Перерегулювання допускається не більше 5 %. Система повинна забезпечувати аварійне відключення теплогенератора при перевищенні температури теплоносія понад 150 °С та при зниженні рівня зерна нижче мінімального.

1.4 Опис існуючих систем керування зерносушарки

У практиці зерносушіння застосовуються три класи систем керування, що відповідають різним рівням автоматизації.

Клас 1: Релейно-контакторні системи (застарілі). Реалізують двопозиційне регулювання температури теплоносія: при досягненні верхньої уставки теплогенератор вимикається, при падінні до нижньої - вмикається. Зона нечутливості зазвичай складає $\pm 5-10$ °С, що є неприйнятним для сучасних вимог. Часті вмикання-вимикання пальника скорочують його ресурс і призводять до нестабільного горіння.

Клас 2: Аналогові ПІД-регулятори. Забезпечують безперервне регулювання через управління клапаном витрати палива за ПІД-законом. Прилади типу РС29, МЕТАКОН забезпечують точність підтримання температури $\pm 1-2$ °С. Основні недоліки: відсутність програмних функцій, ускладнений доступ до параметрів налаштування, неможливість реалізації каскадного регулювання та зв'язку з АСУ ТП.

Клас 3: Системи на базі ПЛК (сучасний підхід). Забезпечують реалізацію складних алгоритмів, включаючи: каскадне (двоконтурне) регулювання

температури; адаптивне налаштування ПІД за поточними характеристиками об'єкта; автоматичний вибір температурного режиму залежно від культури та початкової вологості; зберігання трендів технологічних параметрів; дистанційний моніторинг через SCADA-систему або HMI-панель. У даній роботі обрано саме цей клас на базі контролера Schneider Electric Modicon M241.

1.5. Розробка функціональної схеми зерносушарки

Функціональна схема автоматизації (ФСА) є основним проектним документом, що визначає структуру системи, перелік засобів автоматизації, а також зв'язки між технологічним обладнанням і приладами. ФСА розроблена відповідно до ГОСТ 21.404-85, де контури регулювання позначені за прийнятими умовними позначеннями.

На ФСА (рис. 1.2) відображені такі контури автоматизації:

- Контур 1: регулювання температури теплоносія
- Тт -датчик температури ПЛК (ПІД-алгоритм) регулюючий клапан витрати палива;
- Контур 2: контроль температури зерна Тз -датчик температури ПЛК (відображення, верхня аварійна уставка);
- Контур 3: контроль вологості зерна Wк -датчик вологості ПЛК корекція швидкості вивантажувального механізму;
- Контур 4: контроль рівня зерна у бункері -рівнемір ПЛК (дискретний сигнал, блокування пуску).

(ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ)

Рис. 1.2. Функціональна схема автоматизації вертикальної зерносушарки

РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ ЯК ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ

2.1. Побудова математичної моделі

Математична модель об'єкта регулювання необхідна для обґрунтованого вибору структури регулятора та розрахунку його параметрів настройки. Для каналу «положення регулюючого клапана витрати палива - температура теплоносія» складаємо рівняння теплового балансу сушильної камери.

Теплові потоки у зерносушарці (рис. 2.1):

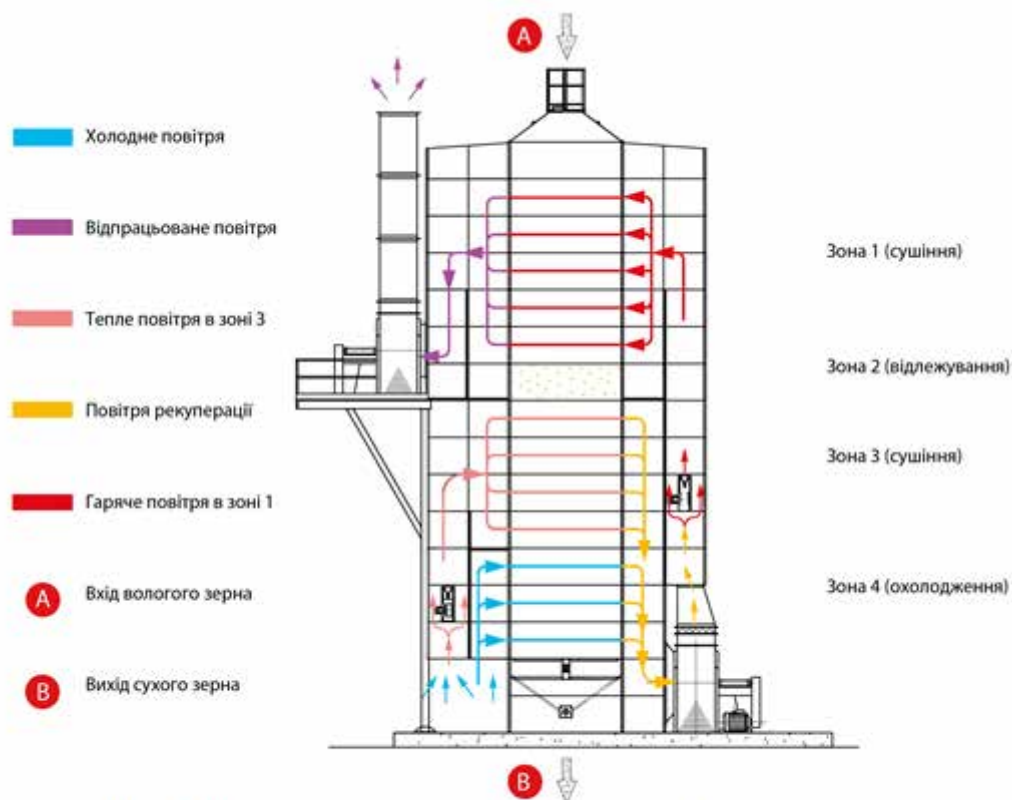


Рис. 2.1. Теплові потоки у вертикальній зерносушарці

Рівняння теплового балансу для об'єму сушильної камери:

$$C_{\text{ш}} \cdot dT_{\text{т}}/dt = Q_{\text{ш}} - Q_{\text{вз}} - Q_{\text{втр}}, \quad (2.1)$$

де $C_{\text{ш}}$ - теплоємність теплоносія в камері, Дж/К; $T_{\text{т}}$ - температура теплоносія, °С; $Q_{\text{ш}}$ - теплова потужність теплогенератора, Вт; $Q_{\text{вз}}$ - потужність, що передається зерновому шару, Вт; $Q_{\text{втр}}$ - теплові втрати через стінки колони, Вт.

Теплова потужність теплогенератора:

$$Q_{ш} = G_{п} \cdot Q_{н} \cdot \eta_{т},$$

(2.2)

де $G_{п}$ - масова витрата палива (пропорційна керуючому сигналу u), кг/с; $Q_{н} = 42\,500$ кДж/кг - нижча теплота згоряння дизельного палива; $\eta_{т} = 0,85$ - ККД теплогенератора.

Тепловіддача від теплоносія до зернового шару за законом Ньютона-Ріхмана:

$$Q_{вз} = \alpha \cdot F \cdot (T_{т} - T_{з}),$$

(2.3)

де α - коефіцієнт конвективної тепловіддачі, Вт/(м²·К); F - сумарна поверхня теплообміну (поверхня зерна у колоні), м².

Лінеаризуючи рівняння (2.1) відносно робочої точки і виконуючи перетворення Лапласа, отримаємо передавальну функцію каналу «витрата палива - температура теплоносія» у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з транспортним запізненням:

$$W(s) = K \cdot e^{(-\tau s)} / (T_1 \cdot s + 1),$$

(2.4)

де K - коефіцієнт передачі об'єкта, °С/%; T_1 - стала часу, с; τ - час транспортного запізнення (час поширення збурення від клапана до датчика), с.

Значення параметрів передавальної функції визначаються методом кривої розгону: на об'єкт у сталому режимі подається ступінчасте збурення по витраті палива $\Delta u = +10\%$, реєструється перехідна характеристика температури теплоносія. З S-подібної кривої визначаються:

$$K = \Delta y / \Delta u = 14\text{ °С} / 10\% = 1,4\text{ °С/\%},$$

(2.5)

$$T_1 = 120\text{ с (час досягнення 63,2 \% від } \Delta y),$$

(2.6)

$$\tau = 15\text{ с (час до початку помітної реакції).}$$

(2.7)

Таким чином, передавальна функція об'єкта:

$$W(s) = 1,4 \cdot e^{(-15s)} / (120s + 1).$$

(2.8)

Відношення $\tau/T_1 = 15/120 = 0,125 < 0,5$, що свідчить про добру керованість об'єкта і можливість застосування ПІД-регулятора без додаткових заходів.

Ідентифікація об'єкту керування Mathcad:

1.1 Вихідні дані

$\Delta u := 10$ (величина ступінчастого збурення по керуючому впливу)

$\Delta y := 14$ (приріст температури у сталому режимі)

$T_1 := 120$ (стала часу (час досягнення $0.632 \cdot \Delta y$))

$\tau := 15$ (час транспортного запізнення (час до початку реакції))

$T_{set} := 90$ (задане значення температури теплоносія)

$T_{min} := 60$ (мінімально допустима температура теплоносія)

$T_{max} := 120$ (максимально допустима температура теплоносія)

1.2 Розрахунок параметрів передавальної функції

$$W(s) = K * \exp(-\tau * s) / (T_1 * s + 1)$$

$$K := \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$K = 1.4$ (K показує, на скільки градусів змінюється температура при зміні відкриття клапана на 1%)

1.3 Оцінка керованості об'єкту

$$R := \frac{\tau}{T_1}$$

$R = 0.125$ (об'єкт добре керований, ПІД-регулятор є оптимальним вибором)

1.4 Час чистого запізнення у долях сталої часу

$$\theta := \frac{\tau}{T_1}$$

$\theta = 0.125$

РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ЗЕРНОСУШАРКОЮ

3.1. Обґрунтування та вибір алгоритму керування зерносушаркою

Аналіз об'єкта показав, що канал «витрата палива - температура теплоносія» є аперіодичною ланкою першого порядку з транспортним запізненням (2.8). Для такого класу об'єктів оптимальним є ПІД-закон регулювання, який забезпечує: нульову статичну похибку (завдяки інтегральній складовій); швидку реакцію на збурення (завдяки диференційній складовій); компроміс між швидкодією і коливальністю (завдяки пропорційній складовій).

Цифровий ПІД-регулятор реалізований на ПЛК Modicon M241 у рекурентній формі алгоритму:

$$e(k) = y^*(k) - y(k), \quad (3.1)$$

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T_c \cdot \sum e(i) + K_d \cdot (e(k) - e(k-1)) / T_c, \quad (3.2)$$

де $e(k)$ - похибка регулювання у k -му такті; $y^*(k)$ - задане значення температури, °C; $y(k)$ - поточне значення температури, °C; K_p , K_i , K_d - коефіцієнти пропорційного, інтегрального та диференційного каналів відповідно; T_c - період дискретизації, с.

Для запобігання насиченню інтегральної складової (anti-windup) в алгоритмі реалізовано обмеження суми відхилень: якщо вихід регулятора $u(k)$ виходить за межі $[u_{\min}, u_{\max}] = [4-20 \text{ мА}]$, накопичення інтегральної складової припиняється.

Розрахунок параметрів налаштування ПІД-регулятора методом Циглера-Ніколса (за передавальною функцією об'єкта):

$$K_p = 1,2 \cdot T_1 / (K \cdot \tau) = 1,2 \cdot 120 / (1,4 \cdot 15) = 6,86, \quad (3.3)$$

$$T_i = 2 \cdot \tau = 2 \cdot 15 = 30 \text{ с} \quad K_i = K_p / T_i = 6,86 / 30 = 0,229 \text{ с}^{-1}, \quad (3.4)$$

$$T_d = 0,5 \cdot \tau = 0,5 \cdot 15 = 7,5 \text{ с} \quad K_d = K_p \cdot T_d = 6,86 \cdot 7,5 = 51,4 \text{ с}. \quad (3.5)$$

Оптимальний період дискретизації вибирається з умови: $T_c \leq \tau/5 \div \tau/10$. Враховуючи $\tau = 15 \text{ с}$, прийнято:

$$T_c = 2 \text{ с}. \quad (3.6)$$

Перевірка у MATLAB/Simulink підтвердила якість перехідного процесу (рис. 3.1 та рис. 3.2):

(РОЗРАХУНОК ДОДАМ)

Рис. 3.1. Розрахунок коефіцієнтів ПІД-регулятора у MATLAB

(Створю модель)

Рис. 3.2. Simulink-модель системи автоматизованого керування з цифровим ПІД-регулятором

(Зроблюю перехідну характеристику)

Рис. 3.3. Перехідна характеристика скоректованої системи при стрибку завдання 10 °С

Показники якості перехідного процесу (визначені за рис. 3.3):

- статична похибка: $\delta = 0 \%$ (наявність інтегральної складової);
- час регулювання: $t_p = 360$ с (критерій: $|e| \leq 2 \%$);
- перерегулювання: $\sigma = 4 \%$ (в межах допуску $\leq 5 \%$);
- коливальність: $n = 1$ (одне перерегулювання).

3.2. Розробка структурно-функціональної схеми системи автоматизованого регулювання

Структурно-функціональна схема (рис. 3.4) відображає ієрархію і зв'язки між блоками системи. Система має одноконтурну структуру з зворотнім зв'язком по температурі теплоносія та додатковим контуром корекції за вологістю зерна.

(Додам структурно функціональну схему)

Рис. 3.4. Структурно-функціональна схема системи автоматизованого регулювання

Зовнішній контур: задавач температури (НМІ) ПЛК Modicon M241 (ПІД-алгоритм) виконавчий механізм SY41 клапан витрати палива теплогенератор датчик температури Pt100 вхід ПЛК.

Корекція за вологістю: датчик вологості зерна ПЛК коригування завдання по температурі (якщо $W_k > 15 \%$, завдання підвищується на $5 \text{ }^\circ\text{C}$; якщо $W_k < 13,5 \%$, знижується на $3 \text{ }^\circ\text{C}$).

Дискретні блокування: рівнемір бункера ПЛК заборона пуску теплогенератора при рівні $< 20 \%$; термостат (аварійний) ПЛК аварійне відключення при $T_t > 155 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3. Вибір первинного вимірювального перетворювача температури

Для вимірювання температури теплоносія у сушильній камері висунуті такі технічні вимоги: діапазон вимірювань 0-200 °С; основна похибка вимірювань не більше $\pm 0,5$ °С; вихідний сигнал 4-20 мА (сумісність з аналоговим входом ПЛК); захист від пилу та вологи не нижче IP65; матеріал захисної арматури - нержавіюча сталь для роботи в агресивному середовищі запилення.

Обрано датчик температури Schneider Electric XMLA600D2S11 - термоперетворювач опору Pt100 із вбудованим нормувальним перетворювачем опір-струм 4-20 мА (рис. 3.5). Порівняно з альтернативами (термопарами ХА, ХК), Pt100 забезпечує вищу лінійність характеристики у діапазоні 0-200 °С та більш просте підключення до аналогових входів ПЛК.



Рис. 3.5. Зовнішній вигляд датчика температури Schneider Electric (Pt100)

Таблиця 3.1. Технічні характеристики датчика температури Schneider Electric pt100

Параметр	Значення
Тип чутливого елемента	Pt100 (клас В за МЭК 60751)
Діапазон вимірювань	-50...+200 °C
Основна похибка	±0,3 °C при 25 °C
Вихідний сигнал	4-20 мА (2-провідна схема)
Напруга живлення	15-30 В DC
Ступінь захисту	IP67 (корпус), IP65 (роз'єм)
Матеріал гільзи	Нержавіюча сталь 316L
Довжина занурення	100 / 150 / 200 мм (за замовленням)
Час відгуку $t_{0,63}$	≤ 10 с у рухомому повітрі

3.4. Вибір первинного вимірювального перетворювача вологості

Для безперервного контролю кінцевої вологості зерна на виході із зерносушарки обрано датчик вологості Schneider Electric XMLGM01D2P25 - ємнісний перетворювач вологості зернового матеріалу потокового типу (рис. 3.6). Прилад встановлюється безпосередньо у вивантажувальний шнек і проводить вимірювання у потоці зерна без зупинки процесу.

Фізичний принцип роботи: метод ємнісної діелектрометрії. Діелектрична проникність зернової маси є функцією її вологості. При проходженні зерна між вимірювальними електродами зміна ємності датчика перетворюється у сигнал 4-20 мА або Modbus RTU.



Рис. 3.6. Зовнішній вигляд датчика вологості Schneider Electric XMLGM01D2P25

Таблиця 3.2. Технічні характеристики датчика вологості Schneider Electric TM1SHTCC4

Параметр	Значення
Принцип вимірювання	Ємнісна діелектрометрія
Діапазон вимірювань вологості	8-40 % RH
Основна похибка вимірювань	±0,5 % RH
Температурна компенсація	Є (-10...+60 °C)
Вихідний сигнал	4-20 мА / RS-485 Modbus RTU
Напруга живлення	12-30 В DC
Ступінь захисту	IP65
Час відгуку (90 %)	≤ 5 с при швидкості потоку зерна > 0,5 м/с

3.5. Вибір виконавчого пристрою

Виконавчий механізм у контурі регулювання температури теплоносія здійснює зміну витрати палива через поворот регулюючого клапана паливної магістралі. До нього висувуються вимоги: безперервне позиціонування за аналоговим сигналом 4-20 мА; лінійна статична характеристика (залежність кута повороту від вхідного сигналу); час повного ходу не більше 60 с; клас захисту IP54 для умов виробничого приміщення.

Обрано електромеханічний лінійний привід регулюючого клапана Schneider Electric SY41 із вбудованим позиціонером (рис. 3.7). Позиціонер забезпечує зворотний зв'язок за положенням штока: сигнал зворотного зв'язку 4-20 мА передається на аналоговий вхід ПЛК для формування каскадного контуру стабілізації положення клапана.



Рис. 3.7. Зовнішній вигляд виконавчого механізму Schneider Electric

Таблиця 3.3. Технічні характеристики виконавчого механізму *Schneider Electric SY41*

Параметр	Значення
Тип привода	Електромеханічний лінійний
Вхідний керуючий сигнал	4-20 мА (стандарт)
Сигнал зворотного зв'язку	4-20 мА (за положенням)
Напруга живлення	220 В АС / 50 Гц
Час повного ходу (0-100 %)	30 с (стандарт)
Статична точність позиціонування	± 1 % від ходу
Зусилля на штоку	до 1 500 Н
Хід штока	20 / 40 мм (за замовленням)
Ступінь захисту	IP54 (без фланця)

3.6. Синтез автоматизованого регулювання

Програмна реалізація алгоритму керування виконана у середовищі *EcoStruxure Machine Expert* (версія 2.1) для ПЛК *Modicon M241*. Мова програмування - *FBD* (*Function Block Diagram*) відповідно до *МЕК 61131-3*, що дозволяє наочно відобразити потоки сигналів між функціональними блоками.

Основні функціональні блоки програми (рис. 3.8):

- *FB_AIN_SCALE* - масштабування аналогового входу: перетворення сирого значення АЦП (0-30000 одиниць) у фізичну температуру (0,0-200,0 °С);
- *FB_PID* - стандартний ПІД-регулятор з бібліотеки *PLCopen*; параметри: $K_p = 6,86$; $T_i = 30$ с; $T_d = 7,5$ с; $T_c = 2$ с; *anti-windup* активний;
- *FB_AOUT_SCALE* - зворотне масштабування: перетворення виходу ПІД (0,0-100,0 %) у сигнал ЦАП (4000-20000 одиниць 4-20 мА);
- *FB_ALARM* - блок аварійних уставок: верхня $T_t > 155$ °С (аварійне відключення), нижня рівень < 20 % (блокування пуску).

(Програма у середовищі *EcoStruxure Machine Expert*)

Рис. 3.8. Програмна реалізація ПІД-регулятора у середовищі *EcoStruxure Machine Expert*

Для відображення і архівування технологічних параметрів використовується панельний комп'ютер Schneider Electric HMIG3U (сенсорний екран 10,4", роздільна здатність 800×600). Панель підключається до ПЛК через Ethernet (Modbus TCP/IP, порт 502). Час оновлення відображення: 500 мс. Архів зберігається на SD-карті об'ємом 4 ГБ, що відповідає зберіганню трендів з інтервалом 10 с протягом 5 років безперервної роботи.

3.7. Вибір програмованого логічного контролера Schneider Electric

Технічні вимоги до ПЛК системи керування вертикальною зерносушаркою: кількість аналогових входів (4-20 мА) - не менше 6; кількість дискретних входів (24 В DC) - не менше 10; кількість дискретних виходів (реле, 220 В AC) - не менше 6; аналогові виходи (4-20 мА) - не менше 2; вбудований Ethernet (Modbus TCP/IP); порт RS-485 (Modbus RTU) для роботи з датчиком вологості; середовище програмування з підтримкою МЕК 61131-3.

Обрано контролер Schneider Electric Modicon M241 (TM241CE24R) - рис. 3.9. Контролер серії M241 є флагманською платформою Schneider Electric для задач машинної автоматизації середньої складності, широко застосовується в АПК, харчовій промисловості та водопостачанні.



Рис. 3.9. Зовнішній вигляд контролера Schneider Electric Modicon M241 (TM241CE24R)

Таблиця 3.4. Технічні характеристики Schneider Electric Modicon M241 (TM241CE24R)

Параметр	Значення
Напруга живлення	100-240 В АС, 50/60 Гц
Споживана потужність	≤ 12 Вт
Кількість вбудованих дискретних входів	14 (24 В DC, PNP/NPN)
Кількість дискретних виходів (реле)	10 (реле, 2 А / 250 В АС)
Вбудовані аналогові входи	4 (0-10 В або 0-20 мА, 12 біт)
Аналогові виходи	2 (0-20 мА, 12 біт)
Порт Ethernet	1 $\times$ RJ45, 100 Мбіт/с; Modbus TCP, EtherNet/IP
Порт RS-485	1 $\times$ (Modbus RTU/АСПІ, до 115 200 Бод)
Об'єм пам'яті програми	8 МБ (флеш)
Ступінь захисту	IP20
Робоча температура	-25...+70 °С (без вентиляції)
Напрацювання на відмову (MTBF)	$\geq 300\,000$ год
Стандарти	МЕК 61131-2, МЕК 61131-3, UL, CE

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

4.1. Вибір пускозахисної апаратури, кабелів та проводів

Правильний підбір пускозахисної апаратури є одним із ключових завдань проектування систем автоматизації, оскільки вона безпосередньо забезпечує захист обладнання від аварійних режимів і безпеку обслуговуючого персоналу. При виборі апаратів виконувались умови за номінальними струмами, напругами, класами захисту та кліматичним виконанням відповідно до ПУЕ-2017 та стандарту МЕК 60947.

4.1.1. Вибір автоматичних вимикачів

Автоматичний вимикач QF1 призначений для захисту силового ланцюга (живлення вентиляторів та вивантажувального механізму). Умови вибору:

$$U_{AB} \geq U_{мережі}: U_{AB} = 440 \text{ В} \geq 380 \text{ В};$$

(4.1)

$$I_{ном.ав} \geq 1,25 * I_{ном.уст} = 1,25 * 12,5 = 15,6 \text{ А} \quad \text{вибрано } 16 \text{ А}; \quad (4.2)$$

Обрано: Schneider Electric Acti9 iC60N, 3P, 16A, крива C (A9F79316), рис. 4.1.



Рис. 4.1. Автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N 3P 16A C (A9F79316)

Таблиця 4.1. Технічні характеристики автоматичного вимикача Acti9 iC60N 3P 16A C

Параметр	Значення
Номінальна напруга (Ue)	440 В АС
Кількість полюсів	3
Номінальний струм (In)	16 А
Крива розчеплення	C (3-5 In миттєвий)
Номінальна гранична комутаційна здатність (Icu)	10 кА при 400 В
Стандарт	МЕК/EN 60947-2
Ступінь захисту IP	IP20 / IP40 (з кришкою клем)

Автоматичний вимикач SF1 призначений для захисту однофазного ланцюга живлення 220 В АС (ПЛК, блок живлення, НМІ). Умови вибору:

$$I_{\text{ном.ав}} \geq 1,25 * I_{\text{ном.уст}} = 1,25 * 3,2 = 4,0 \text{ А} \quad \text{вибрано } 6 \text{ А.} \quad (4.3)$$

Обрано: Schneider Electric Acti9 iC60N, 1P, 6А, крива C (A9F79106), рис. 4.2.



Рис. 4.2. Автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N 1P 6A C (A9F79106)

Таблиця 4.2. Технічні характеристики Schneider Electric Acti9 iC60N 1P 6A C

Параметр	Значення
Номінальна напруга (Ue)	415 В АС
Кількість полюсів	1
Номінальний струм (In)	6 А
Крива розчеплення	C
Icu при 230 В	10 кА
Стандарт	МЕК/EN 60947-2
Ступінь захисту IP	IP20

4.1.2. Вибір електромагнітних пускачів

Для керування асинхронними електродвигунами вентиляторів ($P_n = 5,5$ кВт, $I_n = 12,0$ А) та вивантажувального шнека ($P_n = 2,2$ кВт, $I_n = 5,2$ А) обираємо магнітні пускачі. Умови вибору:

$$U_{н.мп} \geq U_m = 380 \text{ В}; \quad I_{н.мп} \geq I_{н.уст} = 12,0 \text{ А}; \quad U_{к.мп} = 220 \text{ В АС. (4.4)}$$

Умови вибору контактора за ГОСТ МЕК 60947-4-1:

Вибір КМ1 для двигуна М1 (5.5 кВт)

$$U_{n_KM} \geq U_m = 380 \text{ В} \quad (4.1)$$

$$I_{n_KM} \geq I_{n_M1} = 10.77 \text{ А} \quad (4.2)$$

$$U_{coil} = U_{ctrl} = 220 \text{ В АС} \quad (4.3)$$

$I_{n_M1} = 10.77 \text{ [А]}$ - номінальний струм двигуна М1

$I_{n_KM1_cat} = 18 \text{ [А]}$ - номінальний струм вибраного пускача (кат. АС-3, 400В)

$$I_{n_KM1_cat} = 18 \text{ } \{LC1D18M7, AC-3 \text{ при } 400V\}$$

(4.4)

Умова виконана: $18 \geq 10.77$ умова за номінальним струмом виконана

$690 \text{ V} \geq 380 \text{ V}$ умова за напругою виконана

Результат: KM1 = Schneider Electric TeSys D LC1D18M7 (18A AC-3, котушка 220V)

Виконуємо аналогічний розрахунок для KM2 та KM3

KM2 для двигуна M2 (4.0 кВт)

$$I_{n_M2} = 7.83 \text{ [A]} - \text{номінальний струм двигуна M2}$$

$$I_{n_KM2_cat} = 9 \text{ [A]} - \text{номінальний струм вибраного пускача (кат. AC-3, 400V)}$$

$$I_{n_KM2_cat} = 9 \text{ } \{LC1D09M7, AC-3 \text{ при } 400V\}$$

(4.5)

Умова виконана: $9 \geq 7.83$ умова за номінальним струмом виконана

Результат: KM2 = Schneider Electric TeSys D LC1D09M7 (9A AC-3, котушка 220V)

KM3 для двигуна M3 (2.2 кВт)

$$I_{n_M3} = 4.31 \text{ [A]} - \text{номінальний струм двигуна M3}$$

$$I_{n_KM3_cat} = 9 \text{ } \{LC1D09M7 - \text{той самий типорозмір}\}$$

(4.6)

Умова виконана: $9 \geq 4.31$ умова виконана (уніфікація з KM2)

Результат: KM3 = Schneider Electric TeSys D LC1D09M7 (9A AC-3, котушка 220V)

Обрано: Schneider Electric TeSys D LC1D18M7 - контактор 3Р, 18А (АС-3 при 400 В), котушка 220 В АС (рис. 4.3). Контактор TeSys D є однією з найпоширеніших серій Schneider Electric у промисловій автоматизації.



Рис. 4.3. Магнітний пускач Schneider Electric TeSys D LC1D18M7

Таблиця 4.3. Технічні характеристики магнітного пускача Schneider Electric TeSys D LC1D18M7

Параметр	Значення
Номінальна напруга (Ue)	690 В АС
Номінальний струм (АС-3, 400 В)	18 А
Максимальна потужність двигуна (400 В, АС-3)	7,5 кВт
Напруга котушки управління	220 В АС, 50/60 Гц
Тепловий струм у повітрі (Ith)	32 А
Механічна зносостійкість	10 × 10 ⁶ циклів
Стандарт	МЕК/EN 60947-4-1

4.1.3. Вибір кабелю живлення для шафи керування

Сумарний тривало допустимий струм силового кола та кола керування шафи:
 $I_{\text{ш}} = 230 \text{ А}$. Для введення живлення до шафи обирається кабель з умовою:

$$I_{\text{доп.кабелю}} \geq I_{\text{ш}} = 230 \text{ А}. \quad (4.5)$$

Обрано кабель СІП-5 4×70 AsXSn (ГОСТ 7399-97): алюмінієві жили, ізоляція із силанольно-зшитого поліетилену, $I_{\text{доп}} = 270 \text{ А}$ (при прокладці у повітрі).

4.1.4. Вибір проводів для живлення виконавчого механізму

Номинальний струм виконавчого механізму SY41 не перевищує 2 А. Для живлення 220 В АС обирається кабель ВВГнг(А)-LS 2×1,5 (ГОСТ 31996-2012): мідні жили, $I_{\text{доп}} = 19 \text{ А}$ при прокладці у повітрі. Марка ВВГнг(А)-LS забезпечує знижене димовиділення при пожежі.

Силовий кабель від мережі до QF1

$I_{\text{total}} = 22.91 \text{ [А]}$ - сумарний струм усіх споживачів

$I_{\text{пуск_max}} = 75.4 \text{ [А]}$ - максимальний пусковий струм M1

$k_{\text{prokl}} = 1.0 \text{ [б/р]}$ - поправочний коефіцієнт (прокладка у повітрі)

$I_{\text{дор_min}} = 22.91 \text{ [А]}$ - мінімально допустимий тривалий струм кабелю

$$I_{\text{дор}} \geq I_{\text{total}} / k_{\text{prokl}} \quad (5.1)$$

$$I_{\text{дор_min}} = 22.91 / 1.0 = 22.91 \text{ [А]}$$

За таблицями ПУЕ-2017 (таблиця 1.3.4) вибираємо кабель ВВГнг(А)-LS 4×6 мм²:

$S_{\text{kab_syl}} = 6 \text{ [мм}^2\text{]}$ - переріз силового кабелю

$I_{\text{дор_6}} = 46 \text{ [А]}$ - тривало допустимий струм ВВГнг 4×6 при прокладці в пов.

Умова виконана: $46 \geq 22.91$ умова виконана з запасом ($K_{\text{зар}} = 2.0$)

Результат: Силовий кабель = ВВГнг(А)-LS 4×6 мм², $I_{\text{доп}} = 46 \text{ А}$

Кабелі до двигунів (гілки від QF2, QF3, QF4)

Кабель до M1 ($I_n = 10.77$ A)

$$I_{\text{доп}} \geq 1.25 * I_n_{\text{M1}} \quad (5.2)$$

$$1.25 * I_n_{\text{M1}} = 1.25 * 10.77 = 13.46 \text{ [A]}$$

Вибрано: ВВГнг(А)-LS 3×2.5 мм², $I_{\text{доп}} = 25$ А при прокладці у повітрі

Умова виконана: $25 \geq 13.46$ умова виконана

Результат: Кабель M1 = ВВГнг(А)-LS 3×2.5 мм²

Кабель до M2 ($I_n = 7.83$ A)

$$1.25 * I_n_{\text{M2}} = 1.25 * 7.83 = 9.79 \text{ [A]}$$

Вибрано: ВВГнг(А)-LS 3×1.5 мм², $I_{\text{доп}} = 19$ А

Умова виконана: $19 \geq 9.79$ умова виконана

Результат: Кабель M2 = ВВГнг(А)-LS 3×1.5 мм²

Кабель до M3 ($I_n = 4.31$ A)

$$1.25 * I_n_{\text{M3}} = 1.25 * 4.31 = 5.39 \text{ [A]}$$

Вибрано: ВВГнг(А)-LS 3×1.5 мм², $I_{\text{доп}} = 19$ А (той самий типорозмір)

Умова виконана: $19 \geq 5.39$ умова виконана

Кабель M3 = ВВГнг(А)-LS 3×1.5 мм²

4.1.5. Вибір кабелю для живлення кола керування

Для сигнальних кіл датчиків (4-20 мА, 24 В DC) та дискретних входів/виходів ПЛК, де максимальний струм не перевищує 0,5 А на канал, обирається екранований контрольний кабель КВВГЕнг(А) 4×1 мм² (ГОСТ 1508-78): мідні жили, ПВХ

ізоляція, екран з алюмінієвої фольги (загальний). Заземлення екрана з одного боку (з боку ПЛК) для захисту від індуктивних і ємнісних завад.

$I_{\text{signal}} = 0.020 \text{ [A]}$ - максимальний струм у сигнальному колі (20 мА)

$L_{\text{sensor}} = 15 \text{ [м]}$ - довжина лінії від датчика до шафи

$\rho_{\text{cu}} = 0.0175 \text{ [Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м]}$ - питомий опір міді

$U_{\text{drop_max}} = 2.0 \text{ [В]}$ - максимально допустиме падіння напруги у лінії

$$R_{\text{line}} = \rho_{\text{cu}} * L_{\text{sensor}} / S_{\text{sig}} \quad (5.3)$$

$$U_{\text{drop}} = 2 * R_{\text{line}} * I_{\text{signal}} \leq U_{\text{drop_max}} \quad (5.4)$$

Мінімальний переріз сигнального кабелю:

$$S_{\text{sig_min}} = 2 * \rho_{\text{cu}} * L_{\text{sensor}} * I_{\text{signal}} / U_{\text{drop_max}} \quad (5.5)$$

$$S_{\text{sig_min}} = 2 * 0.0175 * 15 * 0.020 / 2.0 = 0.00525 \text{ [мм}^2\text{]}$$

Мінімальний стандартний переріз: 0.5 мм². Вибрано: КВВГЕнг(А) 4×1.0 мм² (з екраном).

Результат: Сигнальний кабель = КВВГЕнг(А) 4×1.0 мм², $L \leq 15 \text{ м}$

4.2. Розробка електричної принципової схеми

Електрична принципова схема розроблена відповідно до ДСТУ ГОСТ 2.702:2013 та ГОСТ 2.709-89. Схема включає два незалежних ланцюги живлення: силовий (~380 В, 3-фазний) та ланцюг керування (~220 В, однофазний).

Силовий ланцюг. Введення ~380 В через рубильник QS1 і вимикач QF1 (Acti9 iC60N 3P 16A). Від QF1 живляться три гілки через автоматичні вимикачі QF2, QF3,

QF4 (по 10А кожен): гілка KM1 - вентилятор зони сушіння (M1, 5,5 кВт); гілка KM2 - вентилятор зони охолодження (M2, 4,0 кВт); гілка KM3 - вивантажувальний шнек (M3, 2,2 кВт). У кожній гілці послідовно включене теплове реле KK1-KK3 для захисту від перевантаження.

Ланцюг керування. Однофазне живлення 220 В через SF1 (iC60N 1P 6A) блок живлення ABL7RE2402 (220 В AC 24 В DC, 2 А) ПЛК Modicon M241. Виходи реле ПЛК (дискретні виходи DO1-DO3) управляють котушками контакторів KM1-KM3. Кнопки SB1 «Пуск» і SB2 «Стоп» підключені до дискретних входів DI1, DI2. Аварійна кнопка SB3 (нормально закрита) включена у ланцюг живлення котушок усіх контакторів.

Аналоговий ланцюг. Датчики температури Pt100 (4-20 мА) підключені до аналогових входів AI1-AI3 ПЛК (живлення 24 В DC від ПЛК). Датчик вологості - до AI4 (або через RS-485, порт SL1). Вихід на виконавчий механізм SY41 - з аналогового виходу AQ1 (4-20 мА).

(Електрична принципова схема автоматизованого керування верт зерносушаркою)

Рис. 4.5. Електрична принципова схема системи автоматизованого керування вертикальною зерносушаркою

4.3. Розробка схеми електричних з'єднань

Схема з'єднань розроблена відповідно до ГОСТ 2.702-75 та відображає внутрішні з'єднання елементів у шафі керування. Застосовано адресний метод: замість ліній зв'язку на виводах приладів вказується адреса іншого кінця з'єднання у форматі «позиційне позначення : номер клеми».

Перелік приладів на задній панелі шафи (зліва направо, зверху вниз): ПЛК Modicon M241 (TM241CE24R); блок живлення Schneider Electric ABL7RE2402 (24 В, 2 А); автоматичні вимикачі QF1-QF4, SF1 (на DIN-рейці); магнітні пускачі KM1-KM3 з тепловими реле KK1-KK3; клемна збірка Schneider Electric Linergy TB (35 клем типу 1 мм², 5 клем типу 6 мм²).

На передній панелі: НМІ НМІG3U; кнопки SB1 (зелена, «Пуск»), SB2 (чорна, «Стоп»), SB3 (червона, гриб, «Аварійне відключення»); перемикач SA1 «Авто/Ручний»; сигнальні лампи HL1 (зелена, «Мережа»), HL2 (жовта, «Робота»), HL3 (червона, «Аварія»), HL4 (жовта, «Аварія температури»).

4.4. Розробка схеми підключень

Схема підключень (зовнішніх з'єднань) виконана відповідно до ГОСТ 2.702-75 та ГОСТ 2.710-81 і показує зовнішнє підключення польових пристроїв до шафи керування. Кабельні траси прокладаються у кабельних лотках: силові -окремо від сигнальних (відстань не менше 200 мм або металева перегородка).

Підключення датчиків температури (3 шт.): кабель КВВГЕнг 2×1,0, довжина 15 м, маркування «TS1», «TS2», «TS3»; підключення до клем XS1:1-2, XS1:3-4, XS1:5-6 відповідно. Живлення 24 В DC з ПЛК через клеми XS1:25-26.

Підключення датчика вологості: кабель КВВГЕнг 3×1,0 (А, В, GND) для RS-485, довжина 25 м, маркування «WS1»; підключення до клем XS2:1-3. Живлення 24 В DC - через клеми XS2:4-5.

Підключення виконавчого механізму SY41: кабель ВВГнг(А) 3×1,5 (живлення 220 В + РЕ), кабель КВВГЕнг 2×1,0 (сигнал 4-20 мА), довжина 20 м, маркування «ACV1»; підключення до клем XS3.

4.5. Розробка загального вигляду щита керування

Шафа керування системою автоматизованого керування вертикальною зерносушаркою обрана з урахуванням кількості та габаритів розміщуваного обладнання, вимоги ступеня захисту IP55 (запилені приміщення зерносклади), а також нормативних вимог ГОСТ 36.13-76 та ДСТУ 3288-95.

Обрано шафу Schneider Electric Spacial S3D (600×800×300 мм, IP55, сталь 1,5 мм, RAL 7035) - рис. 4.4. Шафа оснащена системою внутрішнього освітлення, монтажною панеллю з DIN-рейками та кабельним вводом знизу з кабельними прохідниками.



Рис. 4.4. Шафа керування Schneider Electric Spacial S3D 600×800×300 (NSYS3D6830)

Розрахунок теплового балансу шафи: потужність тепла від обладнання всередині шафи - $P_{\text{внутр}} = 25 \text{ Вт}$ (ПЛК + блок живлення). При температурі навколишнього середовища до $+40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і ступені захисту IP55 природна конвекція через стінки шафи (розміри 600×800×300) забезпечує відведення до 30 Вт. Додаткове примусове охолодження не потрібне.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ У ВЕРТИКАЛЬНІЙ ЗЕРНОСУШАРЦІ

Техніко-економічне обґрунтування здійснюється з метою визначення економічної доцільності впровадження системи автоматизованого керування (САК). Порівняння виконується з базовим варіантом - ручним керуванням зерносушаркою з аналоговим регулятором температури.

Джерела економічного ефекту від впровадження САК:

1. Економія витрат праці: вивільнення 1 оператора зерносушарки за рахунок переходу на автоматичний режим (у базовому варіанті потрібен 1 оператор, що веде безперервне спостереження).
2. Зниження питомих витрат палива на 12-15 % за рахунок оптимізації температурного режиму і виключення перерегулювань.
3. Зменшення втрат якості зерна: точний контроль температури нагрівання знижує відсоток перегрітого зерна з 2,5 до 0,5 %, що дає економію при реалізації.
4. Зменшення витрат на поточний ремонт пальника за рахунок виключення частих пуск-зупинок.

Розрахунок капітальних вкладень. Вартість технічних засобів автоматизації КЗ визначається за прайс-листами виробників:

Таблиця 5.1. Вартість технічних засобів автоматизації Schneider Electric

Найменування	Артикул Schneider	Кільк., шт.	Вартість, грн.
ПЛК Modicon M241 (TM241CE24R)	TM241CE24R	1	18 500
HMI-панель HMIG3U	HMIG3U	1	12 800
Датчик температури XMLA600D2S11	XMLA600D2S11	3	12 600
Датчик вологості XMLGM01D2P25	XMLGM01D2P25	1	9 600
Виконавчий механізм SY41	SY41	1	7 400
Авт. вимикач iC60N 3P 16A (A9F79316)	A9F79316	2	3 700
Авт. вимикач iC60N 1P 6A (A9F79106)	A9F79106	3	2 040
Пускач TeSys D LC1D18M7	LC1D18M7	3	8 850
Блок живлення ABL7RE2402	ABL7RE2402	1	3 200
Шафа Spacial S3D NSYS3D6830	NSYS3D6830	1	6 400
Клемна збірка Linergy TB, кабель, інше	-	-	2 500
РАЗОМ (КЗ)			87 590

Розрахунок складових капітальних вкладень (К):

$$K_{\text{тт}} = 0,11 * K_3 = 0,11 * 87\,590 = 9\,634,9 \text{ грн (торгово-транспортні витрати),}$$

(5.1)

$$K_{\text{м}} = 0,17 * K_3 = 0,17 * 87\,590 = 14\,890,3 \text{ грн (монтажні роботи),}$$

(5.2)

$$K_{\text{пр}} = 100 * 27 = 2\,700 \text{ грн (кабель і труби, 100 грн/м · 27 м),}$$

(5.3)

$$K_{\text{і}} = 2\,000 \text{ грн (непередбачені витрати),}$$

(5.4)

$$K = 87\,590 + 9\,634,9 + 14\,890,3 + 2\,700 + 2\,000 = 116\,815,2 \text{ грн}$$

(5.5)

Розрахунок річних експлуатаційних витрат (С):

Відрахування на амортизацію (норма 14,2 % для електронного обладнання):

$$C_{\text{а}} = 0,142 * K = 0,142 * 116\,815,2 = 16\,587,8 \text{ грн.}$$

(5.6)

Витрати на поточний ремонт (18 % від К):

$$C_{\text{пр}} = 0,18 * K = 0,18 * 116\,815,2 = 21\,026,7 \text{ грн.}$$

(5.7)

Витрати на електроенергію (потужність ПЛК і НМІ ≈ 50 Вт, 1 920 год/рік, тариф 1,68 грн/кВт·год):

$$C_{\text{е}} = 0,05 * 1\,920 * 1,68 = 161,3 \text{ грн.}$$

(5.8)

Витрати на заробітну плату персоналу, що обслуговує САК (1 інженер КВПіА, ставка 8 000 грн/міс):

$$C3 = 12 * 8\,000 = 96\,000 \text{ грн.}$$

(5.9)

Річні експлуатаційні витрати:

$$C = C_a + C_{\text{пр}} + C_e + C3 = 16\,587,8 + 21\,026,7 + 161,3 + 96\,000 = 133\,775,8 \text{ грн.}$$

(5.10)

Зведені витрати:

$$B3B = C + E_n \cdot K = 133\,775,8 + 0,15 \cdot 116\,815,2 = 151\,297,9 \text{ грн.} \quad (5.11)$$

Розрахунок чистого річного прибутку:

Економія на заробітній платі оператора (1 особа, ставка 6 700 грн/міс):

$$\Delta C3 = 12 * 6\,700 = 80\,400 \text{ грн.} \quad (5.12)$$

Економія палива 13 % від річних витрат на паливо (витрата 65 л/год, 1 920 год/рік, 40 грн/л):

$$\Delta C_{\text{п}} = 0,13 * 65 * 1\,920 * 40 = 648\,960 * 0,13 = 84\,364,8 \text{ грн.} \quad (5.13)$$

Зниження втрат зерна від перегрівання (зменшення відсотку перегрітого зерна на 2 % від 25 000 т/рік, ціна 8 000 грн/т):

$$\Delta C_z = 0,002 * 0,25 * 25\,000 * 8\,000 = 100\,000 \text{ грн.} \quad (5.14)$$

Загальний чистий річний прибуток:

$$r = \Delta C3 + \Delta C_{\text{п}} + \Delta C_z = 80\,400 + 84\,364,8 + 100\,000 = 264\,764,8 \text{ грн.} \quad (5.15)$$

Термін окупності:

$$T_{\text{ок}} = K / r = 116\,815,2 / 264\,764,8 \approx 0,44 \text{ року } (\approx 5,3 \text{ місяця}). \quad (5.16)$$

Коефіцієнт ефективності капітальних вкладень:

$$E_f = r / K = 264\,764,8 / 116\,815,2 = 2,27 > E_n = 0,15. \quad (5.17)$$

Оскільки $E_f \gg E_n$ і термін окупності менше одного року, впровадження розробленої системи автоматизованого керування вертикальною зерносушаркою на базі технічних засобів Schneider Electric є економічно доцільним та ефективним.

ВИСНОВКИ

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблено систему автоматизованого керування процесом сушіння зерна у вертикальній зерносушарці з використанням технічних засобів Schneider Electric. На підставі проведених досліджень зроблені такі висновки:

Проведено аналіз технологічного процесу і конструктивних особливостей вертикальної зерносушарки. Визначено основний канал управління: «положення регулюючого клапана витрати палива - температура теплоносія». Сформульовані вимоги до системи керування: точність підтримання температури $\pm 2^\circ\text{C}$, перерегулювання $\sigma \leq 5\%$, час регулювання $t_p \leq 600$ с при стрибку завдання $\pm 10^\circ\text{C}$.

Побудована математична модель об'єкта регулювання методом кривої розгону. Отримана передавальна функція $W(s) = 1,4 \cdot e^{(-15s)} / (120s + 1)$, де $K = 1,4^\circ\text{C}/\%$, $T_1 = 120$ с, $\tau = 15$ с. Відношення $\tau/T_1 = 0,125$ підтвердило добру керованість об'єкта.

Синтезовано цифровий ПІД-регулятор методом Циглера-Ніколса. Параметри настройки: $K_p = 6,86$; $K_i = 0,229\text{ с}^{-1}$; $K_d = 51,4$ с; $T_{\text{ц}} = 2$ с. Моделювання у MATLAB/Simulink підтвердило виконання всіх вимог до якості: $\delta = 0\%$, $\sigma = 4\%$, $t_p = 360$ с. Реалізація на ПЛК виконана у середовищі EcoStruxure Machine Expert (FBD, MEK 61131-3).

Обрані та обґрунтовані засоби автоматизації Schneider Electric: ПЛК Modicon M241 (TM241CE24R), датчик температури XMLA600D2S11 (Pt100, 4-20 мА, IP67), датчик вологості зерна XMLGM01D2P25 (4-20 мА / Modbus RTU, IP65), виконавчий механізм SY41 (4-20 мА, зворотний зв'язок 4-20 мА), HMI-панель HMIG3U (Ethernet, Modbus TCP/IP).

Розроблено повний комплект електричної документації: принципова схема, схема з'єднань, схема підключень, загальний вигляд шафи керування. Обрано захисну апаратуру виключно Schneider Electric: автоматичні вимикачі Acti9 iC60N, магнітні пускачі TeSys D LC1D18M7, шафа Spacial S3D IP55.

Техніко-економічне обґрунтування підтвердило високу ефективність впровадження системи: капітальні вкладення $K = 116\,815,2$ грн, річний чистий прибуток $r = 264\,764,8$ грн, термін окупності $\text{Ток} \approx 0,44$ року (5,3 місяця), коефіцієнт ефективності $E_f = 2,27 \gg E_n = 0,15$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація технологічних процесів та виробництв. Використання обладнання ОВЕН : навчальний посібник / М. О. Кіктєв, А. О. Дудник, В. П. Лисенко. - К., 2019. - 77 с.
2. Шуруб Ю. В., Дудник А. О. Методичні вказівки до лабораторних робіт з теорії автоматичного керування. - К.: НУБіП України, 2015. - 92 с.
3. Методи синтезу та аналізу систем автоматичного керування в АПК / В. Лисенко, В. Решетюк, В. Мірошник, Н. Заєць. - К.: КомПрінт, 2017. - 621 с.
4. Цифрові системи керування : навч. посіб. / Б. Л. Головінський, Ю. В. Шуруб, А. О. Дудник, В. П. Лисенко. - К.: НУБіП України, 2016. - 110 с.
5. Ладанюк А. П., Архангельська К. С., Власенко Л. О. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами : навч. посіб. - К.: НУХТ, 2014. - 274 с.
6. Кіктєв М. О., Лукін В. Є., Дудник А. О. Методичні вказівки до лабораторних робіт з автоматизації технологічних процесів і виробництв. - К.: Компрінт, 2017. - 298 с.
7. Електроніка і мікропроцесорна техніка : навч. посіб. / В. І. Сенько, В. П. Лисенко, О. М. Юрченко та ін. - К.: Агросвіт, 2015. - 676 с.
8. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів : навч. посіб. / В. Лисенко, Є. Чернишенко, В. Решетюк та ін. - К.: АграрМедіаГруп, 2016. - 476 с.
9. Автоматизація технологічних процесів та виробництв / В. Є. Лукін, В. О. Мірошник, І. Т. Цигульов. - К.: ЦП «Компрінт», 2016. - 472 с.
10. Лисенко В. П., Решетюк В. М., Цигульов І. Т. Основи автоматики: теорія і практика (ч. 2). - К.: Освіта України, 2015. - 454 с.
11. Котов Б. І. та ін. Моделювання технологічних процесів у типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна. - Київ, Ніжин: Лисенко М. М., 2017. - 310 с.
12. Schneider Electric. Modicon M241 Logic Controller - Hardware Guide. EIO0000001999. - 2022. URL: <https://www.se.com> (дата звернення: 10.03.2023).
13. Schneider Electric. EcoStruxure Machine Expert - Programming Guide. EIO0000003281. - 2022. URL: <https://www.se.com> (дата звернення: 12.03.2023).
14. Schneider Electric. TeSys D Contactors and Overload Relays - Catalogue. MKTED210011EN. - 2021. URL: <https://www.se.com> (дата звернення: 14.03.2023).

15. Schneider Electric. Acti9 iC60 Circuit Breakers - Catalogue. CAHVENGLV2021. - 2022. URL: <https://www.se.com> (дата звернення: 14.03.2023).
16. Schneider Electric. Spacial S3D - Datasheet. NSYS3D6830. - 2021. URL: <https://www.se.com> (дата звернення: 15.03.2023).
17. Schneider Electric. Harmony XM - Temperature Sensors Catalogue. - 2022. URL: <https://www.se.com> (дата звернення: 15.03.2023).
18. Штіфзон О. Й., Новіков П. В., Бунь В. П. Теорія автоматичного управління : навч. посіб. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. - 144 с.
19. ГОСТ 21.404-85. Автоматизація технологічних процесів. Умовні позначення приладів і засобів автоматизації у схемах. - М., 1985.
20. ДСТУ ГОСТ 2.702:2013. Єдина система конструкторської документації. Правила виконання електричних схем. - К., 2014.
21. Важинський С. Е., Щербак Т. І. Методика та організація наукових досліджень : навч. посіб. - Суми: СумДПУ ім. А. С. Макаренка, 2016. - 260 с.