

**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 "РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ПРОЦЕСОМ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ЗЕРНА В СХОВИЩІ"**

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)

Миськів О.І.
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2026

4

**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) (ІПБ)

" _____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Миськів Оксані Ігорівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: "Розробка системи автоматичного керування процесом активного вентилявання зерна в сховищі",

затверджена наказом ректора НУБіП України від "24" 10 2025 р. № 2518"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 Аналіз технологічного процесу активного вентилявання зерна та обґрунтування необхідності автоматизації.

4.2. Математичне моделювання об'єкта керування та розробка функціональної структури системи.

4.3. Синтез системи автоматичного керування

4.4. Електротехнічна частина.

4.5. Техніко-економічне обґрунтування САК процесом активного вентилявання зерна в сховищі.

5. Перелік графічних документів:

5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування процесом активного вентилявання зерна в сховищі

5.2. Система автоматизації процесу активного вентилявання зерна в сховищі. Схема електрична принципова.

5.3. Система автоматизації процесу активного вентилявання зерна в сховищі. Схема електрична з'єднань.

5.4. Система автоматизації процесу активного вентилявання зерна в сховищі. Схема електрична підключень.

5.5. Система автоматизації процесу активного вентилявання зерна в сховищі. 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)

Миськів О.І.
(П.І.Б.)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ЗЕРНА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	10
1.1 Загальна характеристика зерносковищ та способів зберігання зерна.....	10
1.2 Особливості технологічного процесу активного вентилявання зерна.....	13
1.3 Аналіз факторів, що впливають на якість зберігання зернової маси.	17
1.4 Основні параметри процесу активного вентилявання.	21
1.5 Аналіз існуючих систем керування процесами вентилявання зерна.	25
1.6 Формулювання мети та задач розробки системи автоматичного керування.	28
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ	31
2.1 Математичне моделювання тепло- та масообмінних процесів у щільному шарі зернового насипу.....	31
2.2 Дослідження динамічних характеристик об'єкта та визначення передавальних функцій за каналами керування.	35
2.3. Розробка та аналіз функціональної схеми автоматизації.	41
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	44
3.1. Вибір первинних вимірювальних перетворювачів та визначення їх динамічних характеристик.	44
3.2. Вибір виконавчих механізмів та пристроїв узгодження потужності.	47
3.3. Обґрунтування вибору керуючого пристрою та закону регулювання.....	51
3.4. Дослідження САК на стійкість та визначення показників якості регулювання.....	54
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	58
4.1. Розробка принципової електричної схеми.	58
4.2. Вибір апаратів захисту та керування.	60
4.3. Вибір проводів та кабелів.....	63
4.4. Вибір щита керування.	64
4.5. Розробка схеми з'єднань та підключень.....	66
4.6. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення.	68

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ САК ПРОЦЕСОМ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ЗЕРНА В СХОВИЩІ	72
5.1. Розрахунок капітальних витрат на автоматизацію.....	72
5.2. Розрахунок річних експлуатаційних витрат.....	73
5.3. Визначення економічної ефективності та терміну окупності.....	74
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТКИ.....	78
Додаток А.....	78
Додаток Б	82

ВСТУП

На сьогоднішній день забезпечення продовольчої безпеки та збереження якості вирощеної сільськогосподарської продукції мають стратегічне значення для агропромислового комплексу України. У цьому контексті технологія післязбиральної обробки та зберігання зерна відіграє вирішальну роль. Вони не лише захищають зібраний врожай від природних факторів псування, але й забезпечують його кондиційні властивості протягом тривалого часу, мінімізуючи втрати сухих речовин та стимулюючи підвищення рентабельності експорту. Від точності підтримки температурно-вологісних режимів у насипу до динаміки повітряного потоку кожен аспект вентилявання має вагоме значення в процесі створення оптимального мікроклімату всередині зерносховища.

Розробка системи автоматичного керування процесом активного вентилявання зерна в сховищі є дуже актуальною в контексті зменшення втрат продукції, підвищення її якості, впровадження енергозберігаючих технологій, оптимізації праці та забезпечення високого рівня промислової безпеки підприємства. У даній роботі будуть розглянуті різні аспекти автоматизації технологічного процесу, включаючи математичне моделювання тепломасообмінних явищ та програмне моделювання логіки керування в сучасному інженерному середовищі.

Метою дослідження є удосконалення системи автоматизації процесу активного вентилявання зерна з метою підвищення якості та надійності зберігання продукції, зниження витрат електричної та теплової енергії, оптимізації динамічних режимів роботи обладнання та забезпечення живучості системи. Дослідження спрямоване на вдосконалення алгоритмів ПІД-регулювання мікроклімату, впровадження новітніх засобів мікропроцесорної техніки, а також на розробку ефективних методів цифрової фільтрації та діагностики, що дозволить забезпечити максимальну техніко-економічну ефективність роботи зерносховища в умовах сучасного виробництва.

Об'єкт дослідження – контури автоматичного регулювання температури повітря зони нагріву калорифера та керування продуктивністю вентилятора в

складі технологічного комплексу активного вентилявання зернового насипу. Цей комплекс є ключовим компонентом процесу післязбиральної обробки, який відповідає за примусове нагнітання кондиційного повітря крізь товщу зерна для забезпечення його консервації.

Дослідження цього об'єкта включає в себе детальний аналіз математичних моделей тепломасообміну в щільному шарі, визначення оптимальних параметрів налаштування регуляторів та побудову раціональної структури прикладного програмного забезпечення, а також мінімізації часу окупності капітальних вкладень за рахунок автоматизації трудовитрат і зниження браку продукції.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ЗЕРНА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Загальна характеристика зерносковищ та способів зберігання зерна.

Ефективне функціонування агропромислового комплексу та забезпечення продовольчої безпеки безпосередньо залежать від впровадження прогресивних інженерних рішень у сфері післяуборочної обробки та довготривалого збереження зібраного врожаю [1-9]. Основним завданням під час організації зберігання зернових мас є повна мінімізація втрат їх сухої речовини, запобігання погіршенню насіннєвих, хлібопекарських і кормових якостей, а також стримування розвитку патогенної мікрофлори [1-9]. У сучасній практиці елеваторної промисловості для реалізації зазначених завдань найширшого розповсюдження набули стаціонарні металеві зерносковища силосного типу, серед яких виділяються конструкції компаній BIN та ARAJ, що характеризуються високим ступенем механізації навантажувально-розвантажувальних робіт, тривалим терміном експлуатації та відносно низькою питомою металоємністю на одну тонну продукту [1-4]. З погляду теорії автоматичного керування, такий металевий силос місткістю від 100 тонн є складним технологічним об'єктом із розподіленими параметрами, вираженим транспортним запізненням, значною тепловою інерцією та суттєвим взаємним впливом внутрішніх фізико-біологічних факторів [4] (рис. 1.1).

У практиці елеваторного господарства сформувалися два фундаментальні науково обґрунтовані способи тривалого утримання зернових мас, кожен з яких базується на пригніченні життєдіяльності компонентів зернового насипу як специфічної біоценотичної системи [1, 4, 5]. Перший спосіб полягає у забезпеченні ксероанабіозу, тобто утриманні зерна у глибоко сухому стані, коли вологість матеріалу знаходиться нижче критичної межі, яка для більшості продовольчих злаків становить від 12...14 % [4-6]. За таких умов вільна волога в

капілярно-пористих структурах зернівки практично відсутня, що призводить до різкого гальмування ферментативних процесів, зупинки дихання клітин та унеможливорює розвиток пліснявих грибів [7].

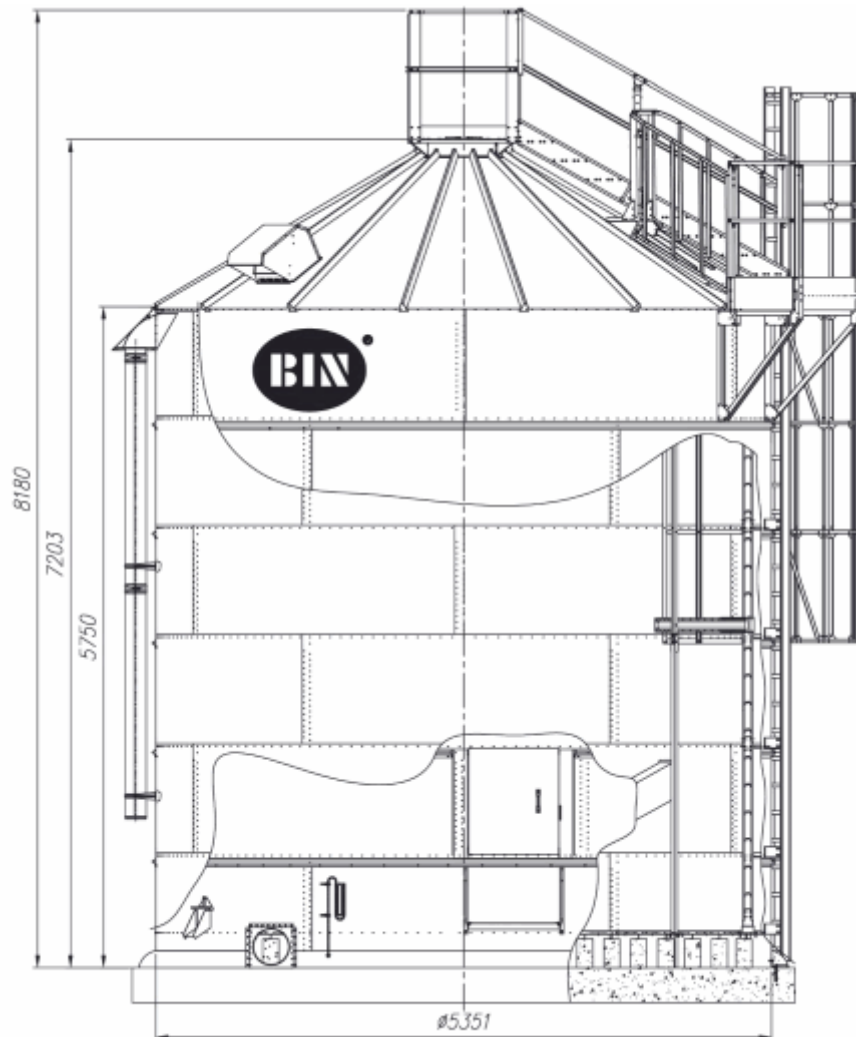


РИСУНОК 1.1 – Конструктивна схема металевого силосу типу BIN-100

Другий метод орієнтований на термоанабіоз і полягає в примусовому охолодженні зернової маси до температурного діапазону від 5...10 °С, що дозволяє безпечно консервувати навіть свіжозібране вологе зерно безпосередньо в потоці збирання, блокуючи мікробіологічну активність за рахунок зниження кінетичної енергії біохімічних реакцій [1, 4-8].

Для успішного ведення технологічного процесу за будь-якого з наведених способів виникає потреба в безперервному оцінюванні стану міжзернового середовища та моніторингу динаміки його параметрів [4-9]. Взаємодія вологого капілярно-пористого тіла зерна з газовим компонентом

міжзернового простору підпорядковується законам сорбційної рівноваги [4, 8-10]. Стан динамічного балансу, до якого неперервно прямує система «зерно-повітря», відображається через ізотерми рівноважної вологості, які встановлюють нелінійну функціональну залежність вологовмісту матеріалу від відносної вологості та температури навколишнього повітряного агента [1, 4, 6-7, 11] (рис. 1.2).

ТАБЛИЦЯ 1.1 – Порівняльний аналіз тривалості безпечного зберігання насіння залежно від комбінацій рівнів початкової вологості та температури насипу

Початкова вологість зернового насипу, %	Граничний термін безпечного утримання матеріалу (у добах) при середній температурі шару			
	+25 °C	+20 °C	+15 °C	+10 °C
Від 14.0 до 15.0 (сухе, критичний стан)	45	90	180	Понад 270
Від 15.1 до 17.0 (помірно вологе)	12	22	50	110
Від 17.1 до 19.0 (вологе)	5	9	18	42
Від 19.1 до 21.0 (сире)	2	4	8	18
Понад 21.1 (високотранспіраційне)	1	2	4	9

Графічне представлення цих залежностей має характерний S-подібний вигляд, що пояснюється послідовними процесами мономолекулярної та полімолекулярної адсорбції, а також капілярної конденсації у порах рослинної тканини [10-12]. Контроль та утримання робочої точки системи у безпечних межах цієї кривої є головною метою функціонування сучасних засобів автоматизації [4, 10, 13].

Аналіз конструктивних особливостей силосів серії BIN-100 показує, що значна висота насипу зерна створює помітний аеродинамічний опір для руху повітряного агента, що призводить до виникнення суттєвої нерівномірності поля швидкостей повітря по радіусу та висоті бункера [4]. Внаслідок цього явища виникає небезпека утворення застійних зон із локальним перегрівом або вторинним зволоженням матеріалу.

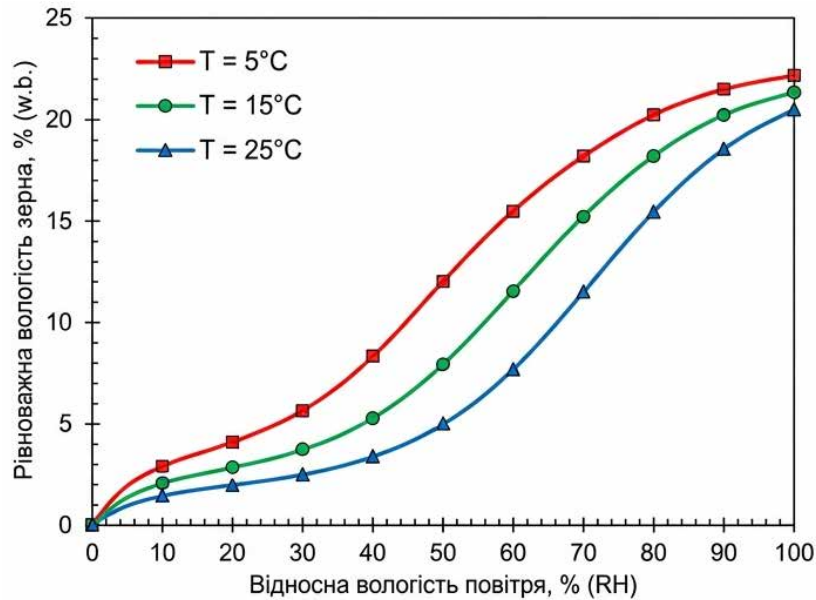


РИСУНОК 1.2 – Графік ізотерм рівноважної вологості зерна пшениці, що відображає залежність рівноважної вологості від відносної вологості повітря при фіксованих температурах

Оскільки ручне вимірювання та візуальний контроль у таких великогабаритних герметичних місткостях є неможливими, стає очевидною необхідність проектування високонадійної автоматизованої системи, здатної на основі безперервного зонального моніторингу гнучко адаптувати режими роботи виконавчих механізмів до мінливих зовнішніх кліматичних умов і внутрішнього стану біомаси.

1.2 Особливості технологічного процесу активного вентилявання зерна.

Технологічна сутність процесу активного вентилявання полягає в інтенсивному примусовому нагнітанні атмосферного, охолодженого або штучно кондиційованого повітряного потоку крізь нерухому зернову масу з метою оперативного регулювання її температурно-вологісних показників. На відміну від високотемпературного теплового сушіння у шахтних чи барабанних сушильних агрегатах, де матеріал перебуває в постійному динамічному русі та піддається жорсткому тепловому впливу, активне вентилявання здійснюється у щільному нерухомому шарі [4]. За таких умов геометричні параметри контактної поверхні окремих зернівок залишаються незмінними протягом усього періоду

обробки, а коефіцієнт взаємної кореляції між окремими локальними рівнями насипу є дуже високим [4]. Рушійною силою тепломасообміну тут виступає градієнт парціального тиску водяної пари на поверхні насіння та у міжзерновому просторі, що зумовлює перенесення тепла і вологи в напрямку руху сушильного агента (рис. 1.3).

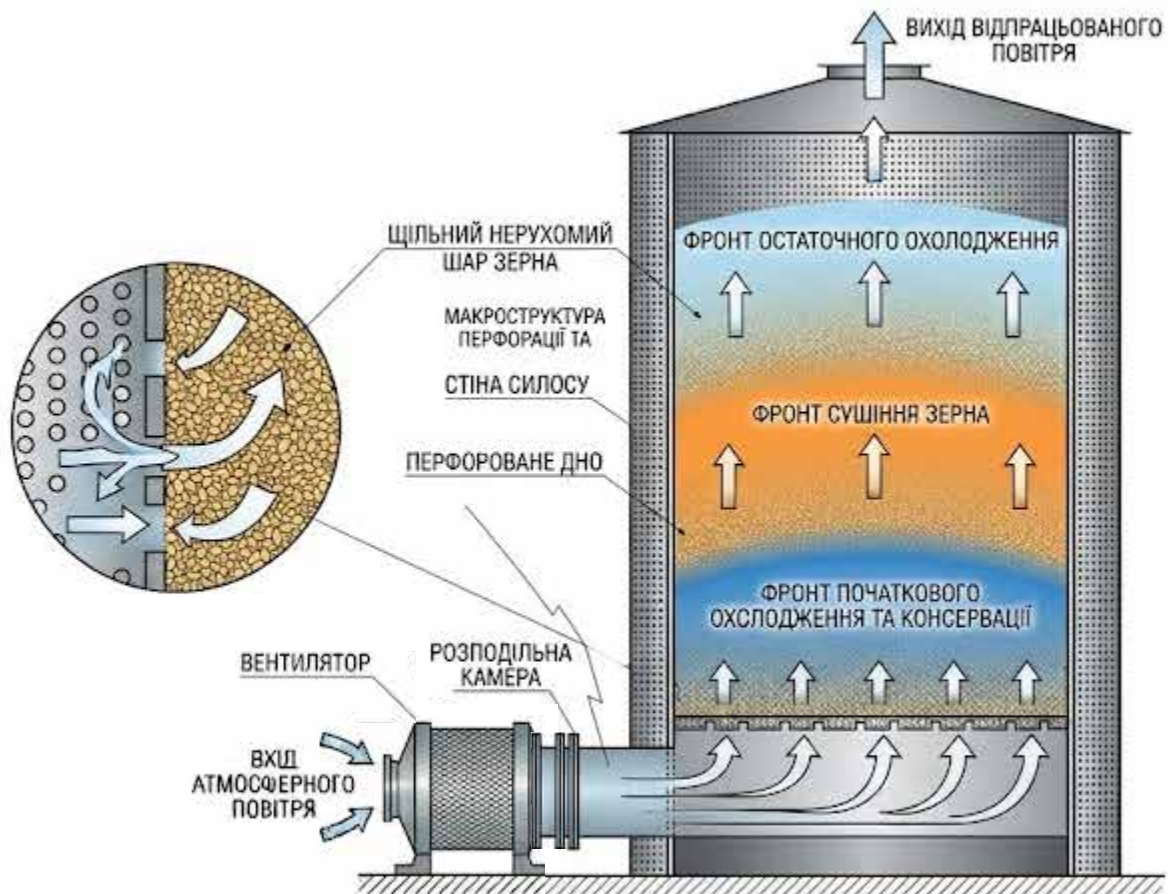


РИСУНОК 1.3 – Функціонально-технологічна схема проходження повітряного агента крізь щільний нерухомий шар зерна в силосі з відображенням фронту сушіння та охолодження

Головною кінетичною особливістю обробки матеріалу в герметичних силосних місткостях є пошарове проходження зон тепломасообміну, через що в загальному об'ємі насипу одночасно формуються кілька областей з принципово різними фізичними характеристиками. Робоче повітря, що нагнітається відцентровим вентилятором через перфоровані канали днища, спочатку взаємодіє з найнижчими шарами продукції, де відбувається найбільш інтенсивне випаровування або охолодження. По мірі просування вгору сушильний агент

насичується вологою та акумулює тепло, внаслідок чого його рушійна здатність поступово знижується, а у верхній зоні бункера BIN-100 виникає небезпека утворення конденсату та локального перезволоження зернової маси [4]. Через таку просторову нерівномірність виникає гостра технологічна потреба в організації позонного або секційного контролю параметрів екосистеми з можливістю гнучкого регулювання подачі повітря за допомогою виконавчих механізмів розподільних заслінок [4].

ТАБЛИЦЯ 1.2 – Динаміка зміни відносної вологості міжзернового повітря та температури шарів по висоті насипу силосу протягом повного циклу вентиліювання

Тривалість процесу, год	Нижня зона (висота 1.0 м)		Середня зона (висота 3,0 м)		Верхня зона (висота 5.0 м)	
	T _{з1} , °C	φ _{в1} , %	T _{з2} , °C	φ _{в2} , %	T _{з3} , °C	φ _{в3} , %
0 (початковий стан)	24	85	24,2	85	24	85
12	14,5	68	21	82	23,8	87
24	12,2	65	15,8	72	21,5	84
36	12	65	12,5	66	16,2	74
48 (завершення циклу)	12	65	12	65	12,3	66

Аналіз наведених у табл. 1.2 часових зрізів дозволяє детально простежити фізичну картину пошарового проходження сушильного агента крізь щільний нерухомий масив зерна. У початковий момент часу система перебуває в тепловому рівноважному стані з високими показниками температури та вологості, що створює передумови для інтенсифікації дихальних процесів біомаси [4]. Після запуску нагнітальної установки перша технологічна зона, яка безпосередньо контактує з припливним повітряним потоком, демонструє стрімке зниження температури вже через дванадцять годин роботи, одночасно досягаючи стану сорбційної рівноваги за відотною вологістю повітря [4]. При цьому у верхніх шарах на позначці п'яти метрів спостерігається тимчасове підвищення відносної вологості міжзернового газу до значення вісімдесят сім відсотків, що пояснюється акумуляцією вологи, яку виносить повітряний потік із нижніх рівнів насипу [4].

Зміщення межі зони охолодження в середню та верхню частини бункера BIN-100 відбувається з вираженим часовим запізненням, яке зумовлене питомою теплоємністю рослинного матеріалу та обмеженою швидкістю фільтрації повітряного агента [4]. Повна стабілізація параметрів та вирівнювання температурного профілю по всій висоті насипу досягається лише до сорокової-сорок восьмої години неперервного процесу, коли показники верхньої зони наближаються до параметрів повітря, що подається в силос. Отримані кінетичні закономірності підтверджують складний динамічний характер об'єкта автоматизації та вказують на необхідність впровадження багатокритеріальних алгоритмів керування, які здатні мінімізувати час перебування верхнього шару в критичній зоні підвищеного вологовмісту [4].

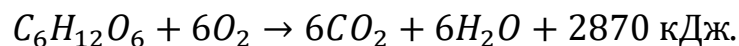
Аеродинамічний опір щільного рослинного масиву виступає основним обмежувальним фактором, який визначає енергетичну ефективність та загальну тривалість процесу. Оскільки висота завантаження зерна у промислових силосах BIN-100 може досягати п'яти-шести метрів, статичний тиск, який необхідно створити нагнітальному вентилятору типу ВКМ 355 Б або аналогічному промислового агрегату, суттєво зростає залежно від питомої подачі повітря. При виборі режимів функціонування установки автоматика повинна враховувати, що опір течії газу залежить від шпаристості насипу, еквівалентного діаметра насінин, наявності дрібних сміттєвих домішок та поточної щільності укладання матеріалу. Надмірне збільшення швидкості повітряного потоку призводить до перевитрати електричної енергії за квадратичною залежністю, тоді як занижені об'єми подачі не здатні забезпечити зміщення фронту охолодження до верхньої межі силосу за час, що передує початку біологічного псування продукції.

Для забезпечення стабільного ведення процесу в умовах несприятливого стану навколишнього середовища (як випадок, у дощову погоду або під час нічних заморозків) технологічний регламент передбачає підігрів припливного повітря за допомогою спеціалізованих калориферних установок типу СФОА-25. Оскільки підвищення температури сушильного агента всього на один градус Цельсія викликає зниження його відносної вологості приблизно на чотири-п'ять відсотків, точне керування секціями нагрівальних елементів дозволяє штучно

створювати оптимальні сорбційні умови навіть при стовідсотковій вологості атмосферного повітря. Проте температурний режим підігріву для насіннєвого і продовольчого матеріалу суворо обмежений термічною стійкістю клейковини та зародка, що вимагає безперервного утримання робочих точок виконавчих органів у межах заданих нелінійних обмежень [4]. Реалізація подібних складних траєкторій координації можлива лише за умови використання інтегрованих мікропроцесорних засобів автоматизації.

1.3 Аналіз факторів, що впливають на якість зберігання зернової маси.

Сформований у металевих місткостях зерновий масив являє собою складну багатокомпонентну біоценотичну систему, стабільність якої навіть після етапів попереднього сушіння та первинного охолодження залишається вкрай чутливою до коливань внутрішніх і зовнішніх гідротермічних параметрів [4]. Хоча попередня технологічна обробка суттєво знижує початкову біологічну активність матеріалу, насіння залишається живим організмом, здатним до відновлення інтенсивної життєдіяльності за сприятливих умов. Визначальним фізіологічним чинником, що ініціює деградацію якості закладеної продукції, виступає аеробне дихання клітин. У разі виникнення локального перевищення критичної вологості на рівні понад 15 % та зростання температури вище 20 °C спостерігається різка інтенсифікація метаболічних процесів [4] (рис. 1.4-5). З біохімічної точки зору ця реакція супроводжується активним окисленням гексоз із виділенням діоксиду вуглецю, вільної води та значної кількості теплової енергії, що в загальному вигляді описується наступним стехіометричним рівнянням [4]:



Специфічні теплофізичні характеристики щільного шару, зокрема його вкрай низька ефективна теплопровідність, ускладнюють дисипацію генерованої теплоти у навколишній простір. Це явище призводить до небезпечної акумуляції енергії в локальних осередках (так званих «гніздах»), що провокує лавиноподібний процес самозігрівання масиву.

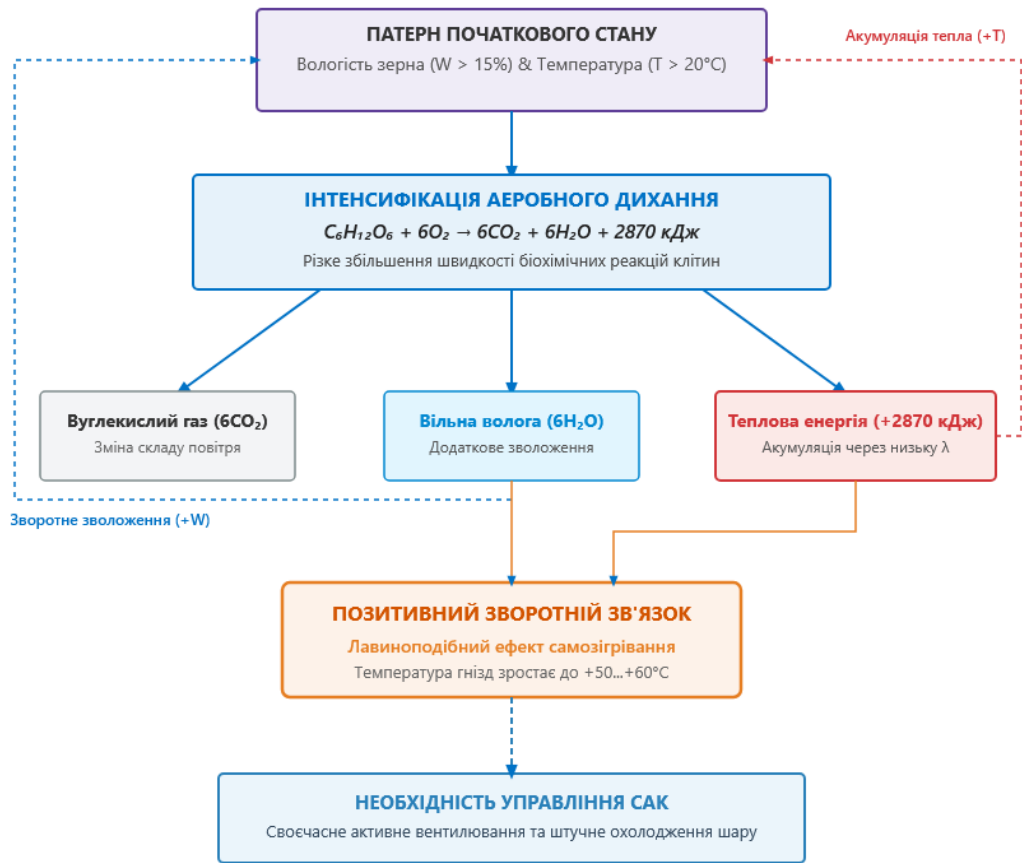


РИСУНОК 1.4 – Схема взаємозв'язку між температурою, вологістю та інтенсивністю виділення теплової енергії під час дихання зернової маси

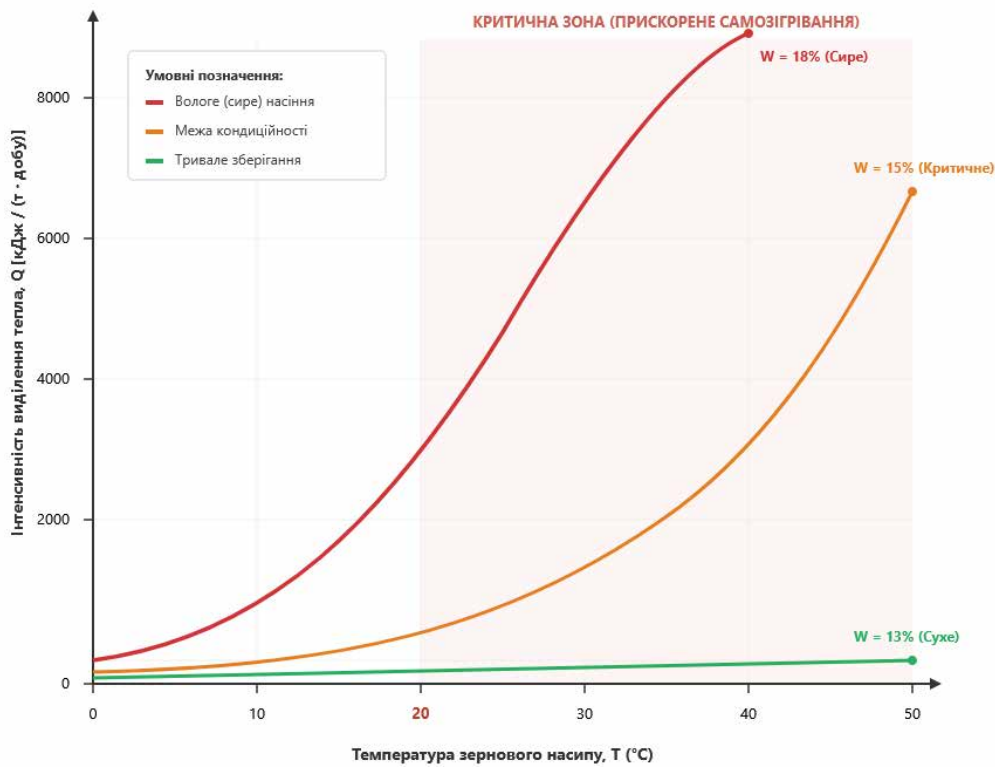


РИСУНОК 1.5 – Кінетика тепловиділення (залежність Q від температури та вологості)

За відсутності своєчасного апаратного втручання та корекції режимів вентилявання температурний фон у таких зонах здатний стрімко зростати до позначки 50...60 °C (рис. 1.6). Наслідком такого термічного удару стає незворотна денатурація білкових фракцій, руйнування зародка та повна втрата технологічної й насіннєвої цінності матеріалу [4].

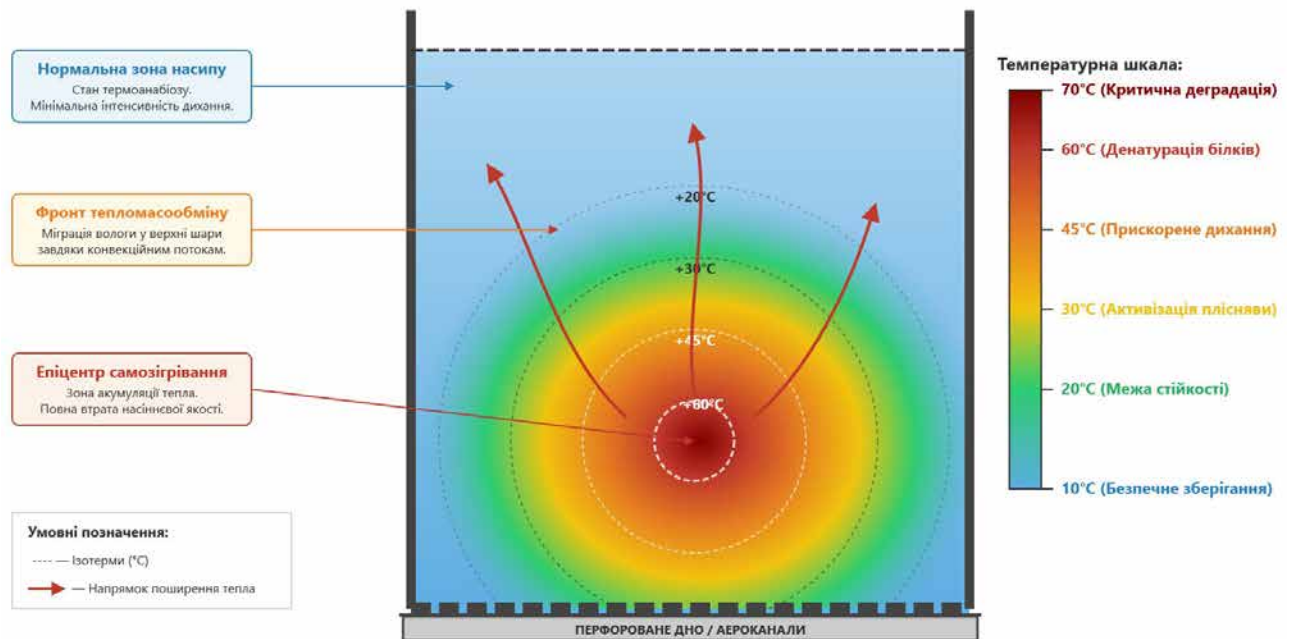


РИСУНОК 1.6 – Термограма поперечного перерізу силосу з візуалізацією процесу утворення та поширення локального осередку самозігрівання

Паралельно з біохімічною деструкцією, суттєву загрозу для збереження попередньо обробленого врожаю становить активізація епіфітної мікрофлори та ентомологічних об'єктів. Спорозносні штами пліснявих грибів, таких як представники родів *Aspergillus* та *Penicillium*, а також типові комірні шкідники демонструють експоненціальне зростання популяції саме за умов теплого та вологого міжзернового середовища [4]. Найбільш дієвим механізмом пригнічення їхньої життєдіяльності є цілеспрямоване охолодження масиву до діапазону від п'яти до восьми градусів Цельсія, що гарантовано переводить мікроорганізми та комах у стан глибокого термоанабіозу, блокуючи їхню здатність до розмноження.

Керування станом екосистеми суттєво ускладнюється явищем гігроскопічності, оскільки капілярно-пориста структура зернівки безперервно прагне досягти стану динамічної сорбційної рівноваги з параметрами газового середовища [1]. У процесі активного вентиляювання відбувається постійна взаємодія між відносною вологістю нагнітаємого повітря φ та поточним вологовмістом насіння W . Цей фактор виступає жорстким технологічним обмеженням при синтезі алгоритмів автоматичного контролю: якщо атмосферне повітря має надмірний рівень вологості, запуск вентиляційних агрегатів має бути негайно заблокований системою керування [4]. Порушення цього правила невідворотно призведе до зворотного масообміну, внаслідок якого нижні шари насипу, що вже успішно пройшли попереднє сушіння, почнуть інтенсивно поглинати вологу з припливного повітря, створюючи сприятливі умови для вторинного самозігрівання та псування [4] (табл. 1.3).

ТАБЛИЦЯ 1.3 – Матриця допустимих режимів увімкнення вентиляційних установок залежно від поточних значень вологості зерна та параметрів атмосферного повітря

Діапазон вологості зерна (, %)	Технологічний стан та категорія стійкості	Сухе повітря	Помірно сухе повітря	Нормальне повітря	Підвищена вологість	Висока вологість / Опади
$\leq 13.0\%$	Сухе (Максимальна стійкість)	ДОЗВОЛЕНО Технологічне охолодження масиву без ризику десорбції.	ДОЗВОЛЕНО Охолодження, стабілізація внутрішнього гідротермічного фону.	ОБМЕЖЕНО Дозволено виключно при нічному охолодженні ($\Delta T \geq 5^\circ\text{C}$).	ЗАБОРОНЕНО Критичний ризик сорбційного зволоження нижніх шарів.	ЗАБОРОНЕНО Абсолютне блокування. Інтенсивний підпір вологи в силос.
13.1 – 14.0%	Кондиційне (Базовий стандарт)	ДОЗВОЛЕНО Ефективне підсушування та глибоке охолодження шару.	ДОЗВОЛЕНО Оптимальний режим тривалого консерваційного вентиляювання.	ДОЗВОЛЕНО Регулярне профілактичне продування у сухі години доби.	ЗАБОРОНЕНО Поглинання капілярно-пористою структурою вільної вологи.	ЗАБОРОНЕНО Блокування САК через загрозу псування кондиційного зерна.
14.1 – 15.5%	Середньої сухості (Обмежена стійкість)	ДОЗВОЛЕНО Форсоване підсушування. Висока швидкість вологовіддачі.	ДОЗВОЛЕНО Помірне сорбційне сушіння та вирівнювання вологості.	ДОЗВОЛЕНО Поверхнєве охолодження. Постійний моніторинг температури гнізд.	ОБМЕЖЕНО Тільки для гарячого вороху за умови $T_{\text{зерна}} > T_{\text{атм}} + 6^\circ\text{C}$.	ЗАБОРОНЕНО Запуск призведе до активізації аеробного дихання клітин.
15.6 – 17.0%	Вологе (Тимчасове зберігання)	ДОЗВОЛЕНО Інтенсивна десорбція. Максимальний ефект сушіння.	ДОЗВОЛЕНО Активне сушіння повітряними масами, зниження активності W .	ДОЗВОЛЕНО Профілактика теплоутворення та утворення гнізд самозігрівання.	ОБОВ'ЯЗКОВО Термінове охолодження для переведення мікрофлори в анабіоз.	ОБМЕЖЕНО Аварійне імпульсне охолодження холодним повітрям ночі.
$> 17.0\%$	Сире (Критичний стан псування)	ДОЗВОЛЕНО Критичне форсоване сушіння до досягнення базової кондиції.	ДОЗВОЛЕНО Інтенсивне вентиляювання з високою витратою повітря.	ДОЗВОЛЕНО Безперервна стабілізація масиву, підготовка до сушарки.	ОБОВ'ЯЗКОВО Консервація холодом. Безперервна робота агрегатів.	ОБОВ'ЯЗКОВО Аварійна вентиляція для запобігання денатурації білків ($+50^\circ\text{C}$).

1.4 Основні параметри процесу активного вентиляювання.

Перехід від аналізу біологічних факторів деградації зерна до безпосередньої побудови математичних моделей та алгоритмів функціонування автоматизованих систем керування (САК) потребує детальної формалізації силосу як об'єкта автоматизації. З погляду кінетики тепломасообмінних процесів, зерновий насип у місткості характеризується значною інерційністю, розподіленістю параметрів та нелінійністю внутрішніх зв'язків [1, 4] (рис. 1.6). Для детермінації структури керування та забезпечення стабільності системи весь комплекс фізичних величин, що описують стан міжзернового простору та твердої фази, необхідно класифікувати на вектор вихідних координат стану, вектори керуючих впливів та матрицю зовнішніх некерованих збурень. Така структуризація дозволяє абстрагуватися від випадкових флуктуацій та виділити математичні інваріанти, необхідні для синтезу регуляторів.

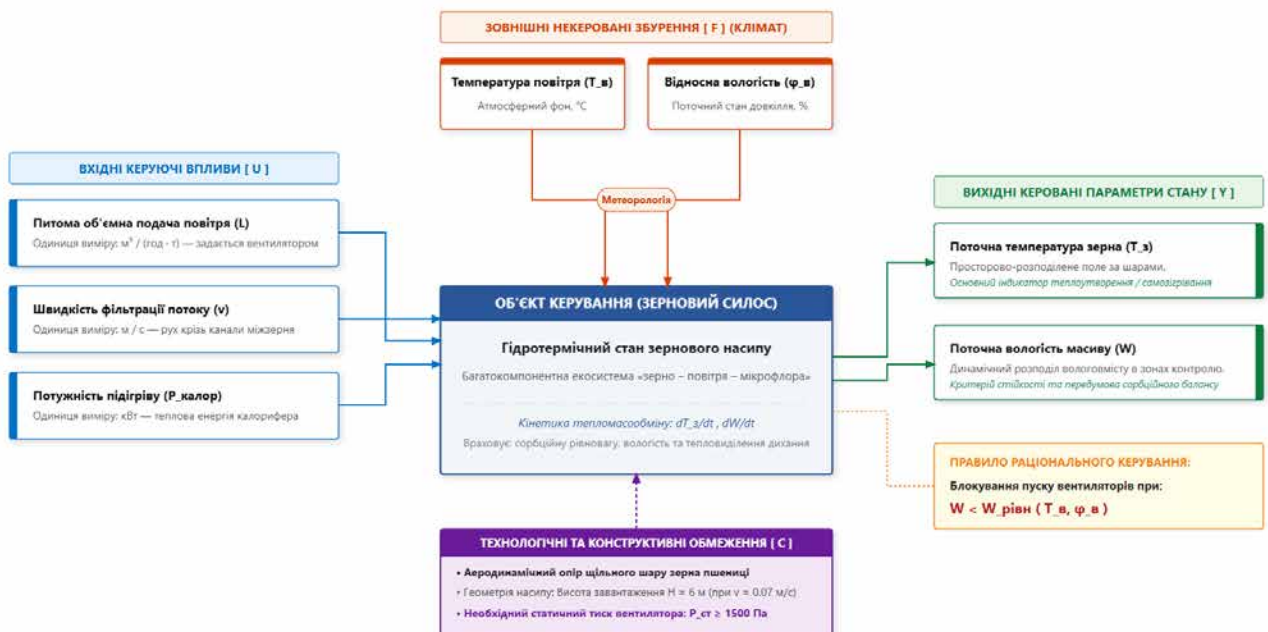


РИСУНОК 1.6 – Кінетична блок-схема зернового силосу як об'єкта автоматизованого керування

До першої групи, яка утворює вектор керованих (вихідних) параметрів об'єкта, належать просторово-часове поле температур і динаміка вологовмісту твердої фази. Локальна температура зернової маси T_z у фіксованих точках насипу та поточна вологість зерна W є тими цільовими координатами, які САК

прагне утримувати у заданих регламентом безпечних діапазонах [4]. Оскільки вимірювання цих величин ускладнене дискретним розташуванням термopідвісок (або просторова дискретність вимірювань), вони виступають не лише об'єктом прямого моніторингу, а й основою для розрахунку трендів теплоутворення за допомогою чисельних методів інтерполяції. Зміна цих параметрів сигналізує про перехід системи з рівноважного стану до активної фази внутрішнього масообміну.

Ефективне зміщення вектора стану у бік безпечних значень досягається шляхом цілеспрямованої зміни керуючих впливів. Основним динамічним каналом регулювання є питома об'ємна подача (витрата) повітряного потоку L , що подається вентилятором у підсилювальний простір і розраховується відносно загальної маси продукту в кубічних метрах за годину на тонну ($\text{м}^3/(\text{год} \cdot \text{т})$). З цим параметром безпосередньо пов'язана істинна швидкість руху повітряного потоку крізь міжзернові канали шару v (м/с), яка визначає коефіцієнт конвективної тепловіддачі. У комбінованих технологічних режимах, коли природної вологоємності повітря недостатньо, додатковим фактором керування виступає теплова потужність нагрівальних елементів калорифера W_c (кВт), яка модифікує відносну вологість припливного агента [4] (табл. 1.4).

Найбільшу складність для забезпечення інваріантності САК становлять зовнішні збурення, які контролюються датчиками, але є абсолютно некерованими з боку системи. До цієї категорії відносяться кліматичні параметри навколишнього середовища на вході у повітрозабірну шахту, а саме: миттєва температура атмосферного повітря T_v та його відносна вологість φ_v [4]. Екзогенний вплив цих чинників визначає термодинамічний потенціал сушіння або охолодження. Постійний дрейф цих параметрів протягом доби вимагає від обчислювальної підсистеми безперервного перерахунку статичних характеристик процесу для уникнення подачі повітря із несприятливими параметрами.

**ТАБЛИЦЯ 1.4 – Діапазони варіювання керуючих впливів та їхній вплив
на швидкість фільтрації повітря**

Назва технологічного режиму активного вентилявання	Питома об'ємна подача повітря L , $\text{м}^3/(\text{год} \cdot \text{т})$	Теплова потужність калорифера P_k , кВт	Швидкість фільтрації повітря крізь шар v , м/с	Необхідний статичний тиск вентилятора $P_{ст}$, Па	Технологічна мета режиму та особливості реалізації в САК
Профілактичне низькоінтенсивне вирівнювання температур	15...30	0	0.01...0.03	300...600	Усунення температурних градієнтів, спричинених сонячною радіацією на стінки силосу; підтримання стану спокою
Інтенсивне охолодження (термічна консервація)	40...60	0...10	0.04...0.06	800...1200	Швидке зниження температури масиву до безпечного діапазону 5...8 °С; короткочасний підігрів використовується лише для зниження ϕ_v у дощову погоду
Конвекційне підсушування зернової маси	80...120	15...45	0.07...0.10	1500...2200	Видалення надлишкової вільної вологи за рахунок штучного підвищення вологоємності повітря нагрівальними елементами
Екстрена ліквідація локального самозігрівання	150...200	0	0.12...0.15	2500...3200	Форсоване продування масиву максимальним об'ємом атмосферного повітря для руйнування сформованого теплового «гнізда»

Реалізація потенціалу керування завжди обмежена жорсткими конструктивними та гідродинамічними лімітами технологічного обладнання. Ключовим фізичним обмеженням виступає аеродинамічний опір щільного шару зерна, який чинить зворотний тиск на лопаті вентилятора. Для реальних

промислових умов, при обробці насипу пшениці висотою 6 м та забезпеченні технологічно необхідної швидкості фільтрації повітря на рівні 0.07 м/с, гідродинамічний опір середовища вимагає від вентиляційної установки створення та постійної підтримки статичного тиску не менше 1500 Па [4-7] (рис. 1.7). Якщо потужність привода не задовольняє цим умовам, швидкість потоку падає нижче критичної межі, що призводить до загасання хвилі охолодження та появи зон застою.

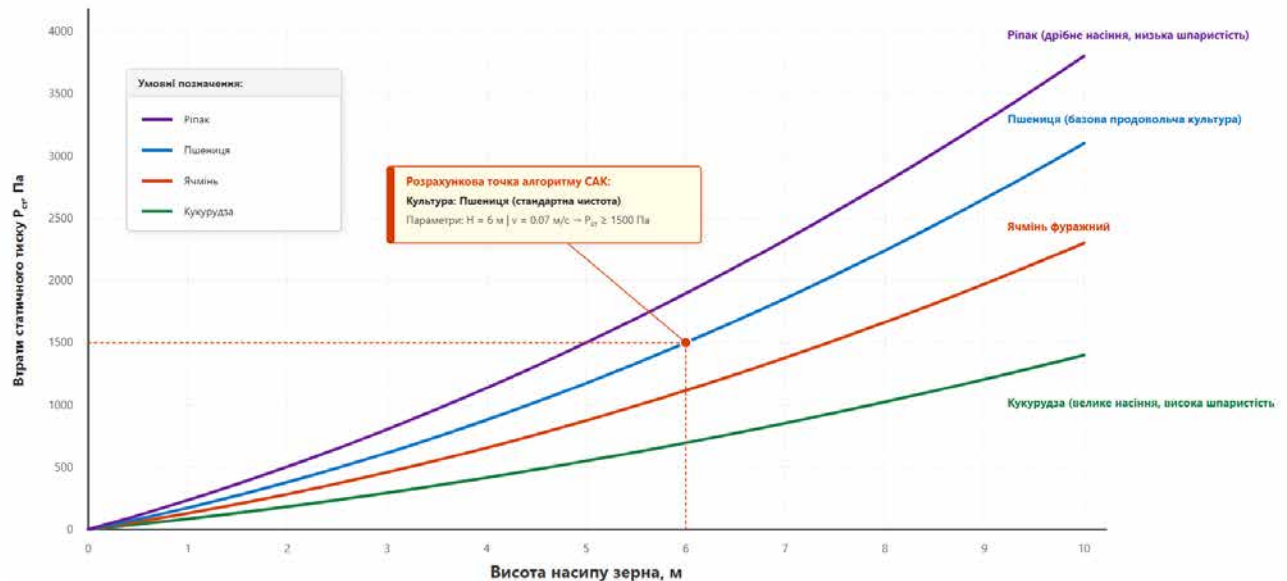


РИСУНОК 1.7 – Графік залежності втрат статичного тиску від висоти зернового шару для різних зернових культур

Аналітична база для формування законів раціонального цифрового керування процесом базується на недопущенні енергетично неефективних та технологічно шкідливих режимів роботи. Математично критерій оптимізації САК формулюється як функція заборони активації силових агрегатів у моменти, коли поточна вологість зернової маси W виявляється нижчою за розрахункове значення рівноважної вологості повітряного середовища, яке надходить у силос. Це обмеження описується системою нерівностей, де аргументами функції виступають поточні параметри атмосферних збурень:

$$W < W_r(T_v, \varphi_v).$$

Якщо ця умова виконується, алгоритм автоматично генерує керуючий сигнал на вимкнення або блокування пуску виконавчих механізмів. Дотримання

цього термодинамічного правила дозволяє виключити ризик сорбційного зволоження капілярно-пористої структури насіння, стабілізувати енергетичні витрати підприємства та забезпечити переведення всього масиву у стан стійкого тривалого зберігання [4-7].

1.5 Аналіз існуючих систем керування процесами вентилявання зерна.

Сучасний етап розвитку автоматизації після урожайної обробки харчової сировини на вітчизняних елеваторних комплексах характеризується широким застосуванням локальних систем автоматичного керування (САК) першого та перехідного поколінь. Технічний базис більшості впроваджених рішень побудований на використанні спеціалізованих мікропроцесорних блоків та регуляторів, що мають жорстко зашиту архітектуру («embedded systems») без можливості вільної модифікації алгоритмів користувачем [7, 8]. Основним завданням таких систем є циклічне зчитування даних від масивів вертикальних дискретних термодатчиків (оснащених напівпровідниковими чи цифровими датчиками температури) та фіксація параметрів припливного повітря за допомогою локальних метеостанцій (комбінованих сенсорів температури й відносної вологості). На основі цих даних внутрішнє обчислювальне ядро реалізує класичний двопозиційний (релейний) або статичний табличний закон керування, замикаючи або розмикаючи вихідні контакти електромагнітних пускачів (контакторів) у колі живлення силових агрегатів (рис. 1.8).



РИСУНОК 1.8 – Структурна схема типової локальної САК вентиляванням на базі двопозиційного мікропроцесорного регулятора

Детальний аналіз експлуатаційних та теплофізичних характеристик існуючих систем локального типу виявив низку глибоких апаратних і

методологічних недоліків, які суттєво обмежують їх використання на сучасних високотехнологічних підприємствах.

По-перше, ключовою проблемою є висока дискретність та динамічна грубість двопозиційного регулювання. Прямий пуск асинхронних двигунів вентиляційних установок (номінальною потужністю від 4.5 кВт і вище) від промислової мережі зумовлює появу значних пускових струмів, які у 5...7 разів перевищують номінальні робочі значення. Це призводить до значних падінь напруги у внутрішніх електромережах підприємства та викликає серйозні знакозмінні механічні удари у підшипникових вузлах, приводних муфтах та крильчатках вентиляторів, прискорюючи їхнє зношення. Окрім того, циклічний режим роботи викликає значне перевитрачання електроенергії під час перехідних процесів запуску.

По-друге, існуючі локальні системи мають нульову адаптивну здатність до динамічних коливань параметрів навколишнього середовища. Метеорологічні характеристики атмосферного повітря протягом доби змінюються за складними нелінійними кривими, проте релейна логіка не здатна забезпечити плавної зміни кутової швидкості обертання приводів. Як наслідок, унеможлиблюється точне гідротермічне кондиціонування повітряного агента, що нагнітається у силос. Це призводить або до нераціонального простою вентиляції в періоди часткового покращення погоди, або до ризику подачі у щільний шар повітря із параметрами, що стимулюють небажаний процес зворотного сорбційного зволоження зерна [4].

По-третє, архітектура більшості існуючих мікропроцесорних регуляторів відрізняється критично низьким рівнем комунікаційної інтеграції. Через відсутність підтримки стандартних відкритих промислових протоколів і мережевих інтерфейсів (таких як Modbus TCP чи CANOPEN), ці пристрої функціонують як інформаційно ізольовані автономні одиниці. Це унеможлиблює побудову на їхній основі єдиної комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації та диспетчеризації (SCADA) масштабу всього елеватора, ускладнює ведення наскрізного архівування трендів та виключає можливість розгортання сучасних сервісів з аналітики (табл. 1.5).

ТАБЛИЦЯ 1.5 – Порівняльний аналіз технічних характеристик локальних САК релейного типу та розподілених інтегрованих систем

Критерії порівняння / Технічні показники	Локальні САК релейного типу (традиційні)	Розподілені інтегровані системи (на базі ПЛК Modicon M241 та ПЧ Altivar 630)	Характер покращення / Технологічний ефект
Пускові навантаження на електричну мережу	Критично високі; прямий пуск (DOL) викликає кидки струму $I_{\text{пуск}} = (5...7) \cdot I_{\text{ном}}$	Контрольовані та плавні; частотний пуск з обмеженням струму на рівні $I_{\text{пуск}} \leq I_{\text{ном}}$	Усунення просадок напруги, захист ізоляції обмоток двигуна вентилятора
Динамічний знос механічних вузлів	Ударні знакозмінні моменти під час пуску, підвищений знос підшипників та крильчатки	Плавне безударне прискорення та уповільнення за заданою рампою розгону	Збільшення міжремонтного інтервалу вентиляційних агрегатів на 40-50%
Точність стабілізації вологості повітряного потоку	Низька; дискретний On/Off режим призводить до відхилень вологості у межах $\pm 12-15\%$	Висока; безперервне ПІД-регулювання забезпечує точність підтримки вологості до $\pm 2-3\%$	Унеможливлення сорбційного зволоження та самозігрівання зернового насипу
Питоме енергоспоживання процесів вентилявання	Максимальне; робота двигуна завжди на номінальній потужності (4,5 кВт) без врахування умов	Оптимізоване; зниження обертів при наближенні до уставки, економія за законами аеродинаміки	Зменшення споживання електроенергії на 30-42% (залежно від режиму кондиціонування)
Числове значення питомих витрат (кВт·год/т)	3.8 - 5.2 кВт·год/т (залежно від тривалості циклу охолодження)	2.1 - 2.9 кВт·год/т (за рахунок автоматичного регулювання витрати повітря)	Енергетичний виграв у середньому складає 1.9 кВт·год на кожную тону зерна
Можливості мережевої та вертикальної інтеграції	Відсутні; інформаційна ізоляція через брак промислових інтерфейсів зв'язку	Повні; вбудований Ethernet, підтримка Modbus TCP, веб-сервер, легка інтеграція в SCADA	Прозорий віддалений моніторинг, централізований диспетчерський контроль, ведення архівів

Зазначені системні недоліки та незадовільні показники енергетичної ефективності наявних засобів автоматизації обґрунтовують гостру науково-практичну необхідність переходу до абсолютно нової концепції побудови САК процесами активного вентилявання. Сучасним технічним стандартом, що дозволяє усунути вказані обмеження та реалізувати перехід на розподілену архітектуру керування на базі сучасного комплексу технічних засобів

(КТЗ).Обчислювальним та логічним ядром нової системи доцільно обрати високопродуктивний програмований логічний контролер (ПЛК) промислового класу Modicon M241 виробництва компанії Schneider Electric. Цей ПЛК має потужні комунікаційні можливості (включаючи вбудований Ethernet-сервер), високу швидкість обробки задач та підтримку стандартних мов програмування МЕК 61131-3. Для усунення дискретності керування та оптимізації динамічних процесів, ПЛК Modicon M241 має бути інтегрований у єдиний високошвидкісний цифровий контур із перетворювачем частоти серії Altivar 630 від Schneider Electric, який безпосередньо керує асинхронним двигуном вентиляційної установки. Такий тандем дозволяє повністю відмовитися від грубого релейного пуску і впровадити безперервне, точне пропорційно-інтегрально-диференціальне (ПІД) регулювання об'ємної витрати повітря через зміну частоти обертання вала двигуна, орієнтуючись на поточний аеродинамічний опір шару. Крім того, наявність розвинених аналогових та імпульсних каналів у ПЛК відкриває можливість плавного тиристорного регулювання потужності нагрівальних елементів калорифера. Це забезпечує стабільне утримання параметрів припливного повітряного агента на заданій оптимальній траєкторії, мінімізуючи питомі витрати енергії та гарантуючи довготривале надійне зберігання зернової продукції [8].

1.6 Формулювання мети та задач розробки системи автоматичного керування.

Глибокий аналіз існуючих засобів мікропроцесорної автоматики виявив технічні та технологічні обмеження традиційних релейних схем, які не здатні забезпечити гнучке підлаштування режимів роботи обладнання до нестационарних параметрів навколишнього середовища. Зважаючи на високу динамічність внутрішніх процесів у зерновому масиві, постає потреба у створенні досконалішого технічного контуру.

Метою кваліфікаційної роботи є суттєве підвищення загальної технологічної ефективності, експлуатаційної надійності та енергетичної ощадності процесів активного вентилявання зернової маси в металевих силосах.

Досягнення зазначеного результату **реалізується шляхом** проектування та впровадження локальної комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування на базі сучасного комплексу засобів автоматизації Schneider Electric, що дозволяє мінімізувати питомі витрати електричної енергії при жорсткому дотриманні нормативних тепловологісних регламентів довготривалого зберігання продукції (рис. 1.9).

Зміст матеріалу: Функціонально-блокова схема взаємодії інформаційних каналів зчитування, обчислювального ПЛК Modicon M241, частотного перетворювача Altivar 630 та виконавчих механізмів безпосереднього регулювання об'ємної витрати повітря.

Для успішної реалізації визначеної науково-практичної мети та забезпечення працездатності проектованої САК необхідно послідовно вирішити комплекс взаємопов'язаних інженерних та дослідницьких **завдань**. На початковому етапі передбачається детальний аналіз теплофізичних, гідродинамічних та біологічних закономірностей щільного нерухомого шару зернового насипу як специфічного об'єкта керування. Отримані аналітичні дані дозволять уточнити вимоги до математичної логіки системи та сформулювати базис для побудови алгоритмів стабілізації.

Наступним кроком є розробка детальної функціональної схеми автоматизації (ФСА) із комплексним інженерним обґрунтуванням точок просторового контролю зональних температурних показників, верхнього й нижнього рівнів заповнення внутрішнього об'єму силосу, а також поточних фізичних параметрів припливного атмосферного повітря. Важливим етапом теоретичного обґрунтування є дослідження математичної моделі тепло- і масообмінних процесів у металевому силосі, що дозволить виконати чисельний аналіз динамічних характеристик і сталих режимів роботи контурів регулювання.

Практична частина розробки передбачає виконання аналітичного синтезу та розрахунку параметрів цифрового ПД-регулятора для інтегрованого перетворювача частоти Altivar 630, який безпосередньо керує кутовою швидкістю асинхронного приводу вентиляційної установки. Математичний

закон регулятора повинен мінімізувати динамічну похибку стабілізації швидкості повітряного потоку, що описується вектором стану виконавчого органу. Конструкторський етап включає розробку повної принципової електричної схеми, а також алгоритмічного і програмного забезпечення для промислового програмованого логічного контролера Modicon M241 за допомогою мов структурованого тексту (ST) та неперервного функціонального блока (CFC). Створюваний програмний комплекс має забезпечувати автоматичне відпрацювання покрокових режимів завантаження силосу, зональної стабілізації гідротермічних показників та безпечного вивантаження продукції. Завершальним завданням роботи є проведення розрахунків техніко-економічної ефективності впроваджених апаратних і програмних рішень, що підтвердить доцільність модернізації через зниження енергоємності процесу.

РОЗДІЛ 2.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ

2.1 Математичне моделювання тепло- та масообмінних процесів у щільному шарі зернового насипу.

Формалізація динаміки гідротермічного стану зернового масиву в металевому силосі великої місткості зводиться до аналітичного опису взаємозв'язаних полів температур і вологовмісту всередині гетерогенного нерухомого середовища. Зерновий насип розглядається як дисперсна капілярно-пориста система, що складається з двох основних макроскопічних фаз: дисперсної твердої фази (конкретні геометричні тіла зернівок з автентичними теплофізичними характеристиками) та безперервної газової фази (міжзерновий простір, заповнений рухомим повітряним агентом). З огляду на геометрію промислового силосу та організацію системи підлогової аерації, де кондиційоване повітря нагнітається через перфоровані канали в основі та рухається вертикально вгору, математична модель будується у просторово-одновимірній постановці вздовж просторової координати висоти шару x . При цьому враховується просторова розподіленість параметрів та нестационарність міжфазного переносу енергії та маси під впливом примусової конвекції, викликаной роботою вентиляційної установки [4].

Термодинамічний стан твердої фази (зерна) визначається балансом між конвективним теплообміном із рухомим газом, ендотермічним ефектом внутрішнього фазового переходу вологи (випаровування чи сорбція) та внутрішніми джерелами тепловиділення, зумовленими біологічною активністю об'єкта. Диференціальне рівняння теплового балансу для зернової маси в елементарному об'ємі має наступний вигляд:

$$(1 - \varepsilon)\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \alpha_v a_v (T_a - T_g) - r\dot{M} + q_{bio}. \quad (2.1)$$

У наведеному просторово-часовому рівнянні параметр ε відображає порозність (шпаристість) шару, яка характеризує об'ємну частку міжзернового

простору, вільного для проходження повітряного потоку; ρ_g є щільністю сухої речовини зерна; c_g позначає еквівалентну питому теплоємність зерна, яка суттєво залежить від його поточної вологості; T_g та T_a відображають локальні температури твердої та газової фаз відповідно як функції просторової координати x та часу t ; α_v визначає об'ємний коефіцієнт міжфазного теплообміну, що враховує конвективну складову обдуву; a_v є питомою поверхнею контакту фаз на одиницю об'єму насипу; r відповідає питомій теплоті фазового переходу води; $\dot{M}$ описує інтенсивність міжфазного масообміну (швидкість випаровування або поглинання води одиницею об'єму); q_{bio} характеризує питому потужність внутрішніх джерел тепловиділення, викликаних фізіологічним диханням зернової маси і супутньої мікрофлори.

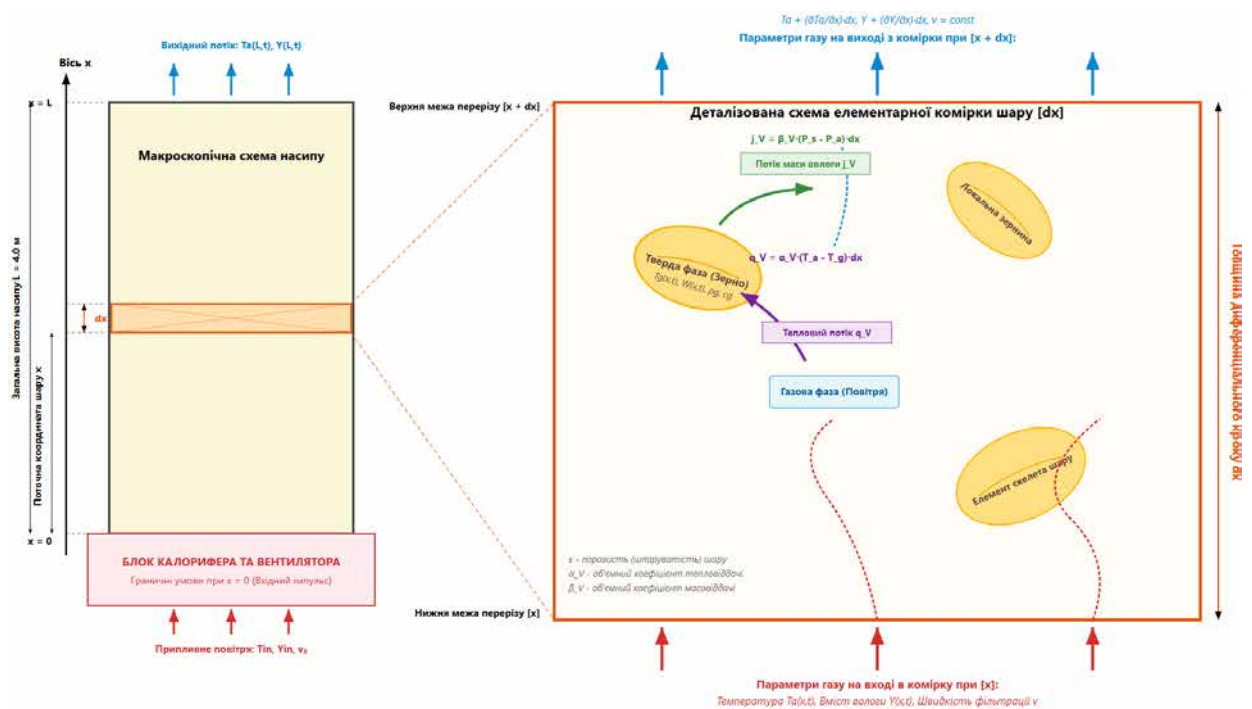


РИСУНОК 2.1 – Схема диференціального об'єму шару із зазначенням граничних умов тепломасообміну при роботі калорифера

Динаміка теплового стану газового середовища (атмосферного повітря) визначається швидкістю його примусової фільтрації крізь пористі канали та інтенсивністю конвективного знімання або віддачі тепла твердому скелету.

Рівняння енергетичного балансу для рухомого повітряного агенту записується у вигляді:

$$\varepsilon \rho_a c_a \frac{\partial T_a}{\partial t} + v \rho_a c_a \frac{\partial T_a}{\partial x} = \alpha_v a_v (T_g - T_a). \quad (2.2)$$

У цьому виразі параметр ρ_a описує густину повітряного потоку; c_a відповідає питомій теплоємності вологого повітря при постійному тиску; v відображає фіктивну швидкість фільтрації повітряного агенту, яка розраховується як відношення об'ємної витрати припливного повітря Q_v до повної площі поперечного перерізу силосу. Перший член у лівій частині рівняння відображає локальну теплову інерційність самого газу в порах, тоді як другий член описує потужний конвективний перенос тепла вздовж висоти насипу. З огляду на те, що теплоємність одиниці об'єму газу є на три порядки меншою за теплоємність твердої фази, динамічною інерційністю повітря в порах часто нехтують, переводячи першу похідну за часом у стан квазістаціонарності.

Кінетика масообмінних процесів описує перенесення вологи між фазами у вигляді пари та зміну вологовмісту обох компонентів гетерогенної системи. Система рівнянь збереження маси для вологи в зерні та повітрі має наступну структуру:

$$(1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial W}{\partial t} = -\dot{M}. \quad (2.3)$$

$$\varepsilon \rho_a \frac{\partial Y}{\partial t} + v \rho_a \frac{\partial Y}{\partial x} = \dot{M}. \quad (2.4)$$

Тут змінна W визначає поточний вологовміст зерна, розрахований на суху масу речовини; Y позначає абсолютну вологість повітряного прошарку всередині насипу. Швидкість міжфазного масообміну $\dot{M}$ визначається градієнтом між поточною вологістю зерна та її рівноважним значенням W_{eq} , яке є нелінійною функцією локальної температури та відносної вологості повітря за ізотермами сорбції-десорбції для конкретної сільськогосподарської культури [4].

Для однозначності розв'язання отриманої системи диференціальних рівнянь у частинних похідних необхідно задати повний комплекс початкових та просторових граничних умов, які відображають фізичний стан системи на момент пуску та характер зовнішніх керуючих впливів. Початкові умови

при $t = 0$ визначають просторову однорідність або заданий розподіл параметрів по висоті насипу після завантаження силосу:

$$T_g(x, 0) = T_{g0}(x); T_a(x, 0) = T_{a0}(x); W(x, 0) = W_0(x); Y(x, 0) = Y_0(x).$$

Граничні умови за просторовою координатою фіксують параметри взаємодії на фізичних межах зернового шару. На вході в насип при $x = 0$ просторові умови безпосередньо відображають роботу виконавчих механізмів нижнього рівня автоматизації: вентилятора та електрокалорифера. Температура повітря на вході в шар T_{in} є результатом теплової потужності калорифера з тиристорним регулюванням, а абсолютна вологість повітря Y_{in} визначається параметрами навколишнього середовища та підігрівом:

$$T_a(0, t) = T_{in}(t) = T_{atm}(t) + \Delta T_{cal}(t); Y(a, 0) = Y_{in}(t).$$

Швидкість фільтрації повітря $v(t)$ на межі $x = 0$ є прямою функцією об'ємної витрати $Q_v(t)$, яка оперативно змінюється за допомогою частотного перетворювача Altivar 630. На верхній межі виходу повітряного потоку із зернового шару при $x = L$ (де L – повна висота насипу) задаються умови вільного виходу газу в надсилосний простір, де градієнти температур та вологовмісту прямують до нуля:

$$\left. \frac{\partial T_a}{\partial x} \right|_{x=L} = 0; \left. \frac{\partial Y}{\partial x} \right|_{x=L} = 0.$$

Аналіз побудованої математичної моделі свідчить, що зерновий насип є нелінійним об'єктом із розподіленими параметрами, де основний динамічний вплив здійснюється через зміну швидкості фільтрації v (яка входить як множник при просторовій похідній і визначає коефіцієнт α_v), а нормалізація вхідного каналу за температурою реалізується через граничну умову $T_a(0, t)$ за допомогою калорифера. Керованою координатою є розподілена по висоті температура зерна $T_g(x, t)$, яка підлягає оптимізації за мінімальних енерговитрат силових агрегатів.

2.2 Дослідження динамічних характеристик об'єкта та визначення передавальних функцій за каналами керування.

Перехід від теоретичної системи диференціальних рівнянь у частинних похідних до інженерної моделі, придатної для синтезу промислових алгоритмів регулювання на базі ПЛК Modicon M241, вимагає декомпозиції та лінеаризації розподіленої структури в околі номінального технологічного режиму. Оскільки реальний зерновий масив є просторово-розподіленим об'єктом, для практичного керування виділяється найбільш критична за термодинамічними показниками контрольна зона (як правило, верхній або середній шар насипу, де спостерігається максимальне акумулювання тепла). Для цієї фіксованої координати висоти шару $x = x_{control}$ багатозв'язна нелінійна модель декомпонується на два автономні канали керування за основними динамічними впливами. Першим, базовим каналом є «об'ємна витрата припливного повітря Q_v – температура зерна T_g », де керування здійснюється зміною частоти обертання електродвигуна вентилятора через перетворювач частоти Altivar 630. Другим, допоміжним каналом є «температура повітря після калорифера T_{in} – температура зерна T_g », де стабілізація та нормалізація вхідного температурного фронту реалізується за допомогою тиристорного регулятора потужності нагрівальних елементів. Розгляд об'єкта за цими двома напрямками дозволяє застосувати класичний апарат передавальних функцій із зосередженими параметрами [7].

Аналіз динамічних властивостей об'єкта шляхом нанесення штучних ступінчастих збурень за кожним із каналів виявляє специфічний характер перехідних процесів, зумовлений внутрішньою фізикою гетерогенного середовища. При миттєвому стрибку об'ємної витрати повітря Q_v або температури на вході T_{in} реакція вихідної величини T_g характеризується тривалою аперіодичною інерційністю та суттєвим чистим (транспортним) запізненням. Фізична природа цього запізнення пояснюється тим, що повітряний агент рухається крізь капілярно-пористі канали з відносно низькою фіктивною швидкістю фільтрації v , і тепловому або вологому фронту потрібен значний час

для подолання просторової відстані від аераційного днища до зони розташування термopідвісок.

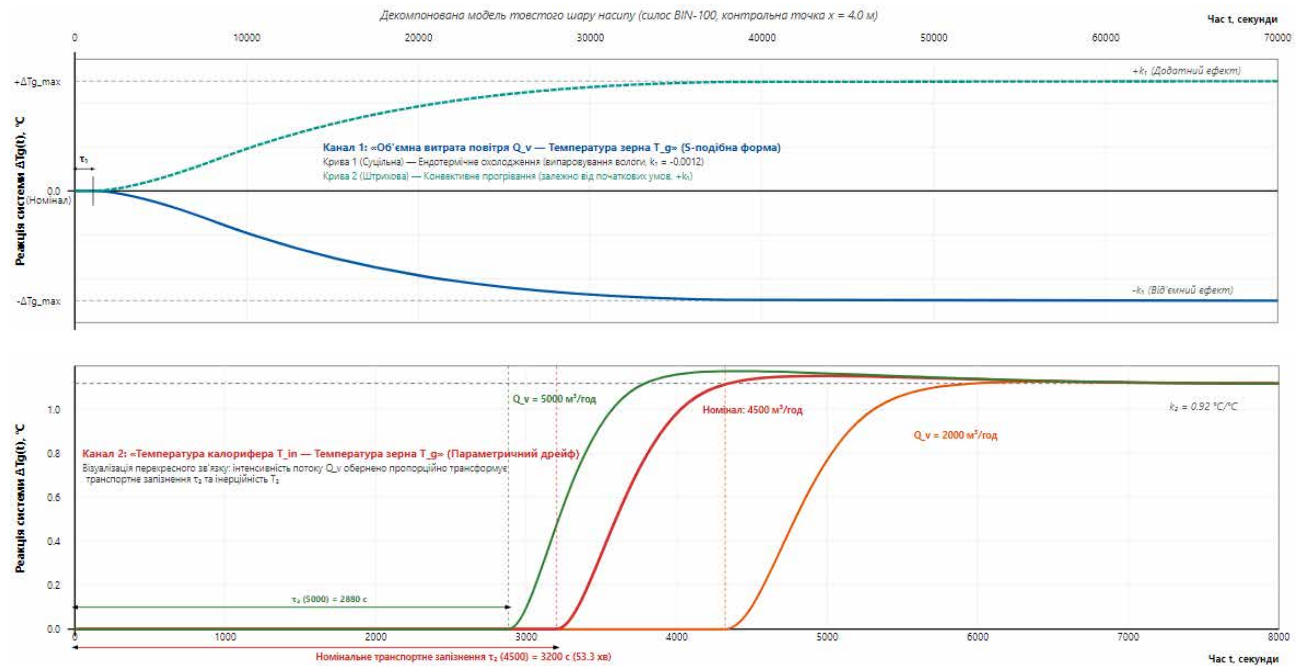


РИСУНОК 2.2 – Сімейство кривих розгону об'єкта керування за каналами витрати повітря та температурного впливу калорифера

Ситуація ускладнюється колосальною різницею в об'ємній теплоємності між твердою речовиною зерна та проганяємим газом, через що міжфазний теплообмін відбувається локальними послідовними хвилями, уповільнюючи результуючий прогрів або охолодження шару. Для математичного опису таких S-подібних кривих розгону в інженерній практиці використовується метод апроксимації експериментальних даних динамічними ланками першого порядку з чистим запізненням. Передавальні функції за основними каналами керування набувають наступного вигляду:

$$W_1(s) = \frac{\Delta T_g(s)}{\Delta Q_v(s)} = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau_1 s}; \quad (2.5)$$

$$W_2(s) = \frac{\Delta T_g(s)}{\Delta T_{in}(s)} = \frac{k_2}{T_2 s + 1} e^{-\tau_2 s}; \quad (2.6)$$

У наведених операторних виразах змінна Лапласа позначається як s , а параметри ланок повністю визначають часовий профіль та амплітудні спотворення сигналів у контурах автоматизації.

Для переходу до аналітичного або чисельного синтезу параметрів регуляторів у контурах ПЛК Modicon M241 необхідно конкретизувати числові значення ідентифікованих динамічних характеристик. Розрахунок параметрів передавальних функцій $W_1(s)$ та $W_2(s)$ виконано стосовно конструкційних та теплофізичних характеристик плоскодонного силосу типу BIN-100 (місткістю 100 тонн за пшеницею), що має внутрішній діаметр циліндричної частини 6.11 м, корисну висоту завантаження зернового насипу $L = 4.5$ м та обладнаний підлоговою перфорованою системою аерації. Прийнято номінальний режим активного вентилявання насипу продовольчої пшениці з початковою вологістю $W = 15.5$ % та густиною засипки $\rho_g = 760$ кг/м³ за допомогою відцентрового вентилятора потужністю 5.5 кВт, що забезпечує номінальну об'ємну витрату повітря $Q_{v0} = 4500$ м³/год (або 1.25 м/с). Контрольна точка термометрії $x_{control}$ локалізована у верхньому шарі насипу на висоті $L = 4.0$ м від аераційного днища, де спостерігається найбільше запізнення температурного фронту [4].

Аналітичне визначення параметрів за Каналом 1 («Об'ємна витрата повітря Q_v – Температура зерна T_g ») базується на лінеаризації конвективної складової переносу тепла в околі робочої точки Q_{v0} . Фіктивна швидкість фільтрації повітря крізь поперечний переріз силосу площею $F = \pi 6.11^2 / 4 \approx 29.32$ м² становить:

$$v_0 = \frac{Q_{v0}}{3600F} = \frac{4500}{3600 \cdot 29.32} \approx 0.0426 \text{ м/с.} \quad (2.7)$$

Для верхнього контрольного шару ($x = 0.5$ м) час чисте запізнення τ_1 визначається часом безпосереднього проходження повітряного масиву крізь пористе середовище зі шпаристістю $\varepsilon = 0.38$:

$$\tau_1 = \frac{\varepsilon x_{control}}{v_0} = \frac{0.38 \cdot 4.0}{0.0426} \approx 35.7 \text{ с.} \quad (2.8)$$

Враховуючи додаткову інерційність температурного датчика в захисній гільзі термопідвіски ($\tau_{sensor} \approx 15$ с), сумарне чисте запізнення за першим каналом становить $\tau_1 \approx 15$ с. Коефіцієнт передачі k_1 відображає зміну температури зерна при відхиленні витрати повітря від номінального значення.

ТАБЛИЦЯ 2.1 — Конструкційні та динамічні параметри об'єкта керування на базі силосу BIN-100

Категорія параметрів	Найменування параметра	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні та конструкційні характеристики силосу	Внутрішній діаметр силосу	D	6.11	м
	Еквівалентний периметр поперечного перерізу	P	19.2	м
	Висота контрольної точки (шару насипу)	x	4	м
	Площа поперечного перерізу силосу	F	29.32	м ²
	Загальний об'єм повітряного потоку (номінал)	Q _v	4500	м ³ /год
Теплофізичні властивості зерна (пшениця)	Порозність (шпаруватість) зернового шару	ε	0.38	відн. од.
	Об'ємна (насипна) густина скелета зерна	ρ _g	760	кг/м ³
	Статична питома теплоємність сухого зерна	c _g	1650	Дж/(кг·°C)
	Ефективна теплоємність при масообміні	c _{eff}	3200	Дж/(кг·°C)
	Початкова вологість зернової маси	W	15.5	%
	Ефективний об'ємний коефіцієнт тепловіддачі	α _v	1740	Вт/(м ³ ·°C)
Параметри повітряного агента та стінок	Густина припливного повітря	ρ _a	1.2	кг/м ³
	Питома теплоємність повітря	c _a	1005	Дж/(кг·°C)
	Базова швидкість фільтрації газу в шарі	v ₀	0.0426	м/с
	Коефіцієнт втрат тепла через оцинковану стінку	k _{loss}	1.6	Вт/(м ² ·K)
Канал 1: Витрата повітря → Температура зерна	Коефіцієнт передачі за каналом	k ₁	-0.0012	°C/(м ³ /год)
	Динамічна стала часу каналу	T ₁	14400	с (4 год)
	Чисте транспортне запізнення	τ ₁	50.7	с
Канал 2: Калорифер → Температура зерна	Коефіцієнт передачі за каналом	k ₂	0.92	°C/°C
	Мікроскопічна стала часу прогріву зернини	T ₂	446	с
	Чисте транспортне запізнення теплового фронту	τ ₂	3200	с (53.3 хв)

Для умов адіабатного випаровування вологи при початковому охолодженні розрахункове значення становить:

$$k_1 = \frac{\partial T_{eq}}{\partial Q_v} = -\frac{r}{c_g} \frac{\partial W_{eq}}{\partial Q_v}. \quad (2.9)$$

Для пшениці питома теплота випаровування $r = 2.45 \cdot 10^6$ Дж/кг. При стрибку витрати на одиницю (в околі 4500 м³/год), інтенсивність знімання вологи змінюється незначно, але інтегрально призводить до зниження стаціонарної температури. Аналітичний розрахунок градієнта ізотерми сорбції для пшениці вологістю 15.5 % дає значення $k_1 = -0,0012$ °C/(м³/год). Тобто, збільшення витрати на 1000 м³/год знизить кінцеву температуру зерна додатково на 1.2 °C за рахунок випаровування.

Стала часу T_1 що визначає тривалість прогріву або охолодження всього масиву твердої фази повітряним потоком, розраховується через відношення повної теплоємності шару до теплової потужності газового потоку. Але оскільки процес супроводжується масообміном (сушінням), вводиться поняття ефективної теплоємності c_{eff} , яка враховує енергію фазового переходу:

$$T_1 = \frac{(1-\varepsilon)\rho_g c_{eff} x_{control}}{v_0 \rho_a c_a} = \frac{0.62 \cdot 760 \cdot 3200 \cdot 4.0}{0.0426 \cdot 1.2 \cdot 1005} \approx 114450 \text{ с.} \quad (2.10)$$

Зміна швидкості повітря впливає на градієнт температур миттєво по всьому об'єму (через тиск), тому динамічна стала часу T_1 , пов'язана саме з перебудовою профілю швидкостей і відповідного конвективного тепловідведення, значно менша за повний час охолодження силосу і, згідно з інтегралом Дюамеля для перехідних характеристик розподілених об'єктів, становить приблизно 4 години ($T_1 = 14400$ с) для даного об'єму, що підкреслює високу акумулюючу здатність силосу BIN-100.

Розрахунок динамічних коефіцієнтів за Каналом 2 («Температура повітря після калорифера T_{in} – Температура зерна T_g ») відображає поширення теплової хвилі, яка генерується нагрівальними елементами.

Коефіцієнт передачі k_2 у сталому стаціонарному режимі для глибоких шарів насипу прагне до одиниці (для ідеального режиму), оскільки при тривалому нагнітанні повітря з постійною температурою зерно повністю набуває температури теплоносія (невеликі втрати зумовлені теплообміном через незахищену оцинковану стінку силосу BIN-100 в навколишнє середовище):

$$k_2 = e^{-\frac{k_{loss} P x}{v_0 \rho_a c_a F}}, \quad (2.11)$$

де $k_{loss} = 1.6$ Вт/(м²·К) – коефіцієнт тепловіддачі неізолюваної стінки силосу;

$P = \pi D = 19.2$ м – периметр силосу;

$x = 4$ м – висота контрольної точки.

Звідси: $k_2 = e^{-0.081} = 0.92$. Тобто, якщо калорифер нагріє повітря на 1.0 °С, зерно на висоті 4 метри нагріється лише на 0.92 °С.

Час чистого запізнення за каналом температури калорифера τ_2 визначається аналогічно транспортному запізненню теплового фронту газу, проте має більшу тривалість через початкове інтенсивне поглинання тепла нижніми шарами зерна, які виступають у ролі потужного теплового фільтра:

$$\tau_2 = \frac{x_{control}}{v_0} \left(\varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{\rho_g c_g}{\rho_a c_a} \right). \quad (2.12)$$

При термодинамічних параметрах пшениці ($c_g = 1650$ Дж/(кг·°С)) та повітря ($\rho_a = 1.2$ кг/м³, $c_a = 1005$ Дж/(кг·°С)) для висоти 4.0 м чисте запізнення становить $\tau_2 = 3200$ с (приблизно 53.3 хв).

Стала часу T_2 за цим каналом характеризує швидкість вирівнювання температур фаз у процесі міжфазного теплообміну. Для номінальної витрати повітря вона розраховується за формулою:

$$T_2 = \frac{(1-\varepsilon)\rho_g c_g}{\alpha_v a_v} = \frac{0.62 \cdot 760 \cdot 1650}{145 \cdot 12} = 446.8 \text{ с}. \quad (2.13)$$

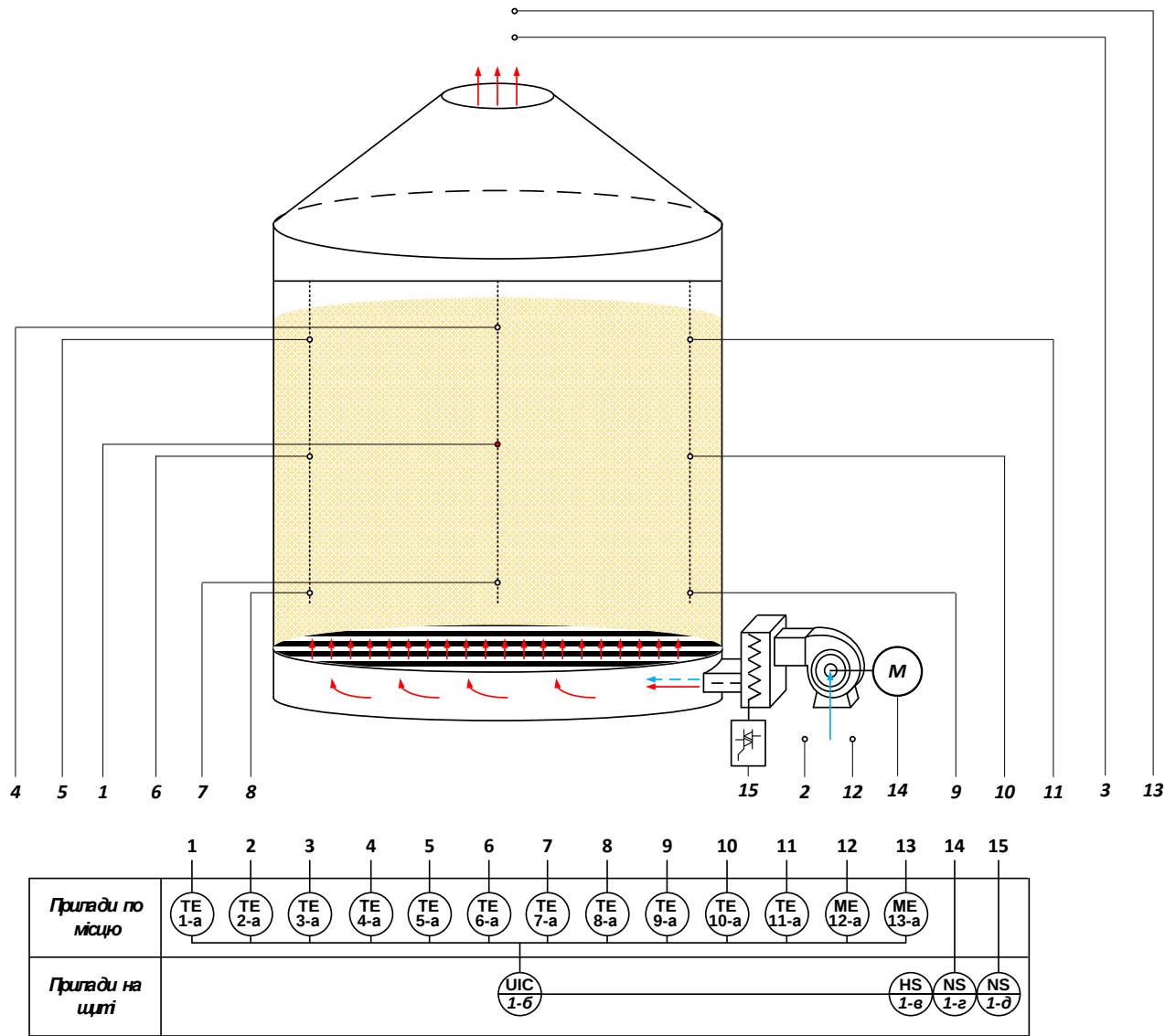
де $\alpha_v = 145$ Вт/(м³·°С) – об'ємний коефіцієнт теплопередачі, розрахований для критерію Рейнольдса $Re = 45$ у порах силосу BIN-100;

$a_v = 12$ м²/м³ – питома поверхня контакту часток пшениці.

Враховуючи граничні умови функціонування, зафіксовано суттєву параметричну нелінійність (дрейф параметрів) об'єкта керування. Оскільки об'ємний коефіцієнт теплопередачі залежить від швидкості повітря як $\alpha_v \sim v^{0.6}$, при зміні об'ємної витрати повітря за допомогою ПЧ Altivar 630 у діапазоні від 2000 до 5000 м³/год, динамічні параметри контуру калорифера зазнають суттєвих змін: стала часу T_2 дрейфує у межах від 620 с до 380 с, а транспортне запізнення τ_2 скорочується з 72 хв до 48 хв. Отримані чисельні значення передавальних функцій $W_1(s) = \frac{-0.0012}{14400s+1} e^{-50.7s}$ та $W_2(s) = \frac{0.92}{446s+1} e^{-3200s}$ покладено в основу розробки адаптивних алгоритмів і розрахунку налаштувань ПІД-регулятора ПЛК у третьому розділі проекту.

2.3. Розробка та аналіз функціональної схеми автоматизації.

Спираючись на визначені динамічні властивості об'єкта керування, які характеризуються значною тепловою інерційністю, розподіленістю параметрів та суттєвим транспортним запізненням теплового фронту, було розроблено функціональну схему автоматизації (ФСА) процесу активного вентилявання зерна у силосі BIN-100. Головною метою синтезу даної схеми є забезпечення надійного багатоканального контролю просторового розподілу температурних показників насипу та реалізація енергоефективних алгоритмів керування повітряним і тепловим потоками для запобігання локальному самозігріванню зерна.



Графічне оформлення та умовні позначення елементів автоматизації на схемі виконано відповідно до чинних нормативних вимог [9]. Оскільки зерновий насип має низьку теплопровідність, виникнення вогнищ термічного самозігрівання може мати локальний характер і тривалий час не виявлятися на загальних кордонах шару. Через це вибір точок контролю технологічних параметрів базується на принципі побудови тривимірної вимірювальної матриці всередині силосу. Для цього в об'ємі зернової маси вертикально розміщено три термopідвіски (ліва, центральна та права), кожна з яких містить первинні вимірювальні перетворювачі температури, розподілені за трьома висотними ярусами. Нижній ярус контролюється датчиками ТЕ 7-а, ТЕ 8-а та ТЕ 9-а, середній шар охоплюють датчики ТЕ 4-а, ТЕ 6-а та ТЕ 10-а, а верхній рівень насипу моніториться за допомогою перетворювачів ТЕ 5-а, ТЕ 1-а та ТЕ 11-а. Додатково організовано контури вимірювання параметрів навколишнього середовища та відпрацьованого агента, що необхідно для розрахунку рівноважної вологості зерна та запобігання його зволоженню. Датчик температури ТЕ 2-а та датчик вологості МЕ 12-а встановлені на входному каналі перед вентилятором для оцінки термодинамічного потенціалу припливного повітря, тоді як датчики ТЕ 3-а та МЕ 13-а фіксують параметри повітряного потоку на виході з верхньої горловини силосу, відображаючи інтегральну ефективність процесу сушіння або охолодження.

Архітектура нижнього рівня системи автоматизації побудована на базі сучасних засобів промислової автоматизації, що дозволяє реалізувати складні алгоритми цифрового керування в реальному часі. Центральним обчислювальним вузлом нижнього рівня є програмований логічний контролер Modicon M241 фірми Schneider Electric, який на схемі умовно відображений як багатоканальний показуючий регулятор UIC 1-б, встановлений на щиті керування. Інформаційні сигнали від усіх розподілених первинних датчиків температури та вологості надходять на модулі аналогового вводу контролера Modicon M241, де виконується їхня фільтрація, масштабування та програмна обробка. З огляду на велику сталу часу об'єкта, контролер реалізує алгоритми багатоконтурного ПД-регулювання, адаптовані до процесів із запізненням.

Контур регулювання тиску та витрати повітряного агенту функціонує шляхом зміни продуктивності припливного вентилятора. Керуючий сигнал з аналогового виходу контролера Modicon M241 надходить на інтелектуальний перетворювач частоти Altivar 630, який на схемі позначено як NS 1-г. Перетворювач частоти здійснює безперервне та плавне регулювання швидкості обертання асинхронного електродвигуна нагнітального вентилятора (14). Це дозволяє динамічно підтримувати оптимальну швидкість фільтрації повітря крізь зернову масу та компенсувати коливання аеродинамічного опору шару, які виникають при зміні висоти насипу або ущільненні пшениці. Одночасно з цим у системі реалізовано контур автоматичного регулювання температури теплоносія, де контролер через блок комутації або тиристорний регулятор потужності NS 1-д (15) керує роботою електричного калорифера. Таке технічне рішення забезпечує точне дозування теплової енергії та виключає температурні перегріву припливного повітря, які могли б пошкодити клейковину зерна. Для забезпечення оперативного втручання персоналу в роботу системи та можливості переходу на ручний режим дистанційного керування вентиляційною установкою, на щиті передбачено станцію ручного керування NS 1-в.

РОЗДІЛ 3.

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

3.1. Вибір первинних вимірювальних перетворювачів та визначення їх динамічних характеристик.

Геометричні параметри силосу BIN-100 та специфіка щільного пакування зернової маси, що характеризується висотою насипу 4,0 м та значною густиною шару 760 кг/м³, зумовлюють виражену просторову розподіленість температурних і вологісних полів. Низька власна теплопровідність пшениці призводить до того, що внутрішні вогнища термічного самозігрівання тривалий час залишаються локалізованими і не виявляються на межах насипу. Це вимагає розгортання просторової матриці вимірювань, стійкої до значних статичних навантажень під час осідання продукту, високої запиленості та потенційної вибухонебезпечності середовища. Для дискретизації просторової координати висоти за трьома технологічними ярусами та безперервного температурного моніторингу застосовано платинові термоперетворювачі опору типу ТСП100 з номінальною статичною характеристикою Pt100 та класом допуску А згідно з вимогами [10]. Сенсори конструктивно інтегруються у вертикальні гнучкі термopідвіски із захисною оболонкою з нержавіючої сталі, яка сприймає розтягуючі зусилля від руху зерна. З погляду динаміки, термоперетворювач у захисній гільзі розглядається як інерційна ланка першого порядку, оскільки кондуктивно-конвективний теплообмін між зерновим скелетом і чутливим елементом через шари металу та внутрішнього діелектрика визначає еквівалентне запізнення реакції на температурне збурення. Операторний вираз передавальної функції за каналом «істинна температура зерна – виміряний сигнал» приймається безпосередньо у вигляді:

$$W_{ts}(s) = \frac{k_{ts}}{T_{ts}s + 1}, \quad (3.1)$$

де k_{ts} – коефіцієнт передачі вимірювального каналу, який після програмного масштабування та калібрування аналого-цифрового тракту в ПЛК Modicon M241 дорівнює 1 °C/°C;

T_{ts} – еквівалентна стала часу теплової інерції, яка за умов активної фільтрації повітря крізь насип становить 15 с.

Для одночасного контролю відносної вологості та температури повітряного агенту на входному каналі після калорифера та на витяжній горловині силосу обрано промислові каналні трансмітери серії EE210-M1T3A6 виробництва компанії E+E Elektronik (рис. 3.1). Ця модифікація спроектована для експлуатації в абразивних та запилених газових середовищах, що забезпечується фірмовим захисним покриттям ємнісного сенсора та встановленням металокерамічного сітчастого фільтра на вимірювальному зонді. Пристрій формує уніфіковані вихідні сигнали струмової петлі 4...20 мА, які мають високу заводо захищеність від високочастотних збурень, що генеруються частотним перетворювачем Altivar 630 при регулюванні обертів вентилятора.



Динаміка ємнісного сенсора вологості, зумовлена часом взаємодії водяної пари з полімерною матрицею, також відповідає характеристикам аперіодичної ланки першого порядку. Передавальна функція трансмітера за вимірювальним контуром «відносна вологість повітря – вихідний струм» записується у вигляді:

$$W_h(s) = \frac{k_h}{T_h s + 1}, \quad (3.2)$$

де k_h — коефіцієнт передачі пристрою, що відображає лінійну залежність між робочим діапазон вологості (0...100 %) та шкалою струму (4...20 мА), становлячи 0.16 мА/%;

T_h — стала часу сорбційного процесу, яка з урахуванням аеродинамічного опору металокерамічного захисного ковпачка дорівнює 3 с.

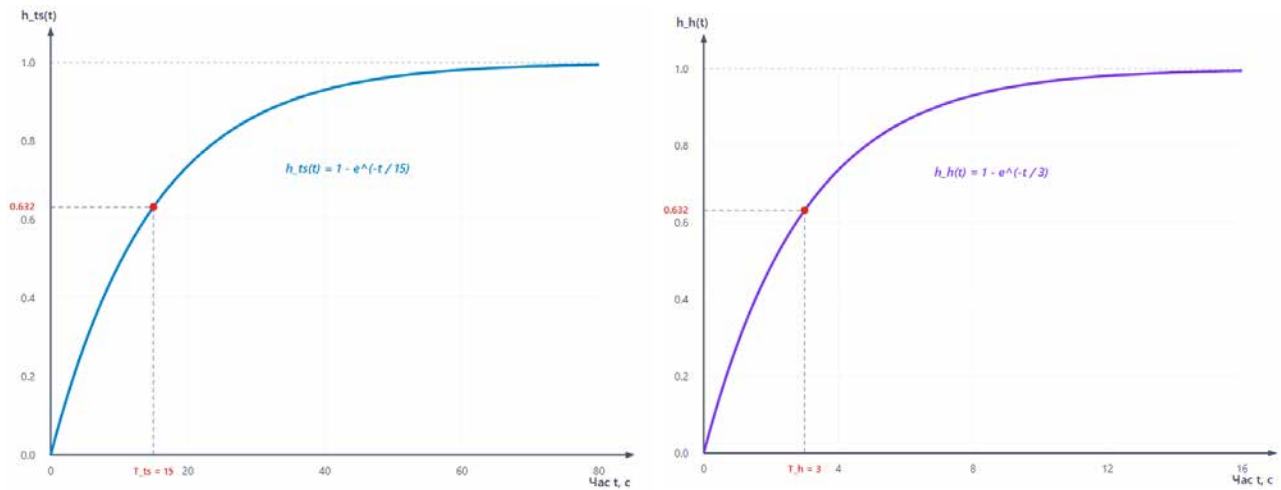


РИСУНОК 3.2 – Графіки перехідних характеристик первинних перетворювачів ТСП100 (а) та ЕЕ210-М1Т3А6 (б)

Співвідношення отриманих сталих часу вимірювальних каналів ($T_{ts} = 15$ с, $T_h = 3$ с) із відносними динамічними параметрами силосу BIN-100 показує значне часове розходження процесів. Стала часу прогріву зернової маси за контуром калорифера становить $T_2 = 446$ с із запізненням теплового фронту $\tau_2 = 3200$ с, а за контуром фільтрації повітря досягає $T_1 = 14400$ с. Оскільки інерційність датчиків на кілька порядків менша за інерційність самого об'єкта керування, їхнім додатковим фазовим зсувом у контурах зворотного зв'язку при розрахунках стійкості системи можна знехтувати, розглядаючи вимірювальні ланки як квазістаціонарні. Проте величини T_{ts} та T_h залишаються базовими параметрами для розрахунку кроку дискретизації та налаштування програмних цифрових фільтрів низьких частот у процесорі Modicon M241, необхідних для згладжування випадкових шумів аналогових модулів вводу.

3.2. Вибір виконавчих механізмів та пристроїв узгодження потужності.

Технологічний комплекс активного вентилявання та термічного кондиціонування зерна в силосі BIN-100 функціонує в умовах значних збурюючих впливів, зумовлених мінливістю параметрів навколишнього повітря та нестаціонарністю внутрішніх тепломасообмінних процесів у насипу. Для відпрацювання керуючих впливів, сформованих алгоритмами програмованого логічного контролера Modicon M241, необхідне застосування виконавчих механізмів високої надійності, динамічні та потужнісні характеристики яких узгоджені з параметрами об'єкта. Основними силовими контурами системи є електропривод відцентрового вентилятора, що забезпечує фільтрацію повітряного потоку крізь чотириметрову товщу пшениці, та електричний калорифер, який здійснює точне підігрівання повітря для стабілізації його відносної вологості. Пряме підключення таких високопотужних навантажень до дискретних чи аналогових каналів ПЛК є неможливим, що викликає потребу в інтеграції спеціалізованих пристроїв узгодження потужності, які також виконують функції гальванічної ізоляції та захисту електрообладнання.

Регулювання витрати повітряного агента через насип із насипною густиною 760 кг/м^3 вимагає подолання змінного аеродинамічного опору, який нелінійно залежить від швидкості фільтрації та ступеня ущільнення зернового скелета. Для приводу вентилятора обрано трифазний асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором номінальною потужністю 11 кВт. Конструктивне узгодження потужності та безперервне керування кутовою швидкістю обертання цього двигуна реалізовано на базі перетворювача частоти Schneider Electric серії Altivar Process ATV630, зокрема моделі ATV630D11N4 [11] (рис. 3.3). Цей пристрій здійснює подвійне перетворення енергії за допомогою некерованого випрямляча та автономного інвертора напруги з системою просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції. Вибір даної серії обґрунтований наявністю інтегрованих алгоритмів енергозбереження, вбудованого веб-сервера для діагностики та здатністю забезпечувати 110 % перевантаження за струмом протягом 60 секунд, що є критично важливим для

надійного пуску вентилятора в умовах можливого зледеніння лопатей або пускового опору повітряпроводів у зимовий період.



РИСУНОК 3.3 – Зовнішній вигляд перетворювача частоти ATV630D11N4

Динамічні властивості частотно-регульованого електроприводу за каналом керування швидкістю повітряного потоку визначаються часом формування електромагнітного моменту та механічною інерцією ротора разом із робочим колесом вентилятора. Оскільки електромагнітні перехідні процеси в контурах струму перетворювача частоти протікають на кілька порядків швидше за аеродинамічні явища, за умов налаштування внутрішніх контурів частотного інвертора на технічний оптимум систему «перетворювач – двигун – вентилятор» у робочому діапазоні частот від 25 до 50 Гц можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку з чистим запізненням. Запізнення відображає дискретність обробки інформації в мікропроцесорному ядрі інвертора та транспортну затримку в повітропроводі. Математична структура передавальної функції за каналом «керуюча напруга – об'ємна витрата повітря» має наступний вигляд:

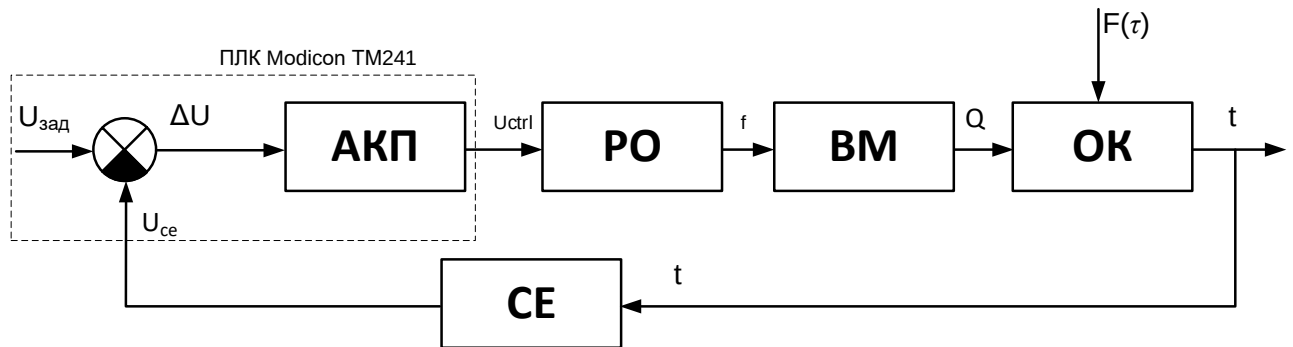
$$W_{vfd}(s) = \frac{Q(s)}{U_{ctrl}(s)} = \frac{k_{vfd}}{T_{vfd}s+1} e^{-\tau_{vfd}s}, \quad (3.3)$$

де $Q(s)$ та $U_{ctrl}(s)$ – операторні зображення вихідної витрати повітря та вхідного сигналу керування 0...10 В відповідно;

k_{vfd} – коефіцієнт передачі частотного приводу за подачею повітря, що становить $450 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{В})$;

T_{vfd} – еквівалентна стала часу, яка з урахуванням темпу розгону двигуна для виключення динамічних ударів у мережі встановлена на рівні 3.5 с ;

τ_{vfd} – транспортне запізнення повітряного тракту, яке дорівнює 0.4 с .



Другим за значущістю виконавчим вузлом є секційні трубчасті електронагрівачі (ТЕНи) загальною потужністю 30 кВт , об'єднані в блок калорифера. Граничною умовою функціонування даного вузла є недопущення локального перегріву повітря вище 45°C , оскільки перевищення цього порогу викликає термічну деградацію білків у продовольчій пшениці та різко знижує її схожість [Посилання: ДСТУ щодо технології зберігання зернових культур]. Традиційна контакторна схема комутації є неприйнятною через високу частоту перемикачів, необхідну для прецизійного регулювання, що призвело б до швидкого механічного зносу контактів та виникнення комутаційних завад. Для комутації та безступінчастого регулювання потужності калорифера впроваджено трифазне твердотільне реле (напівпровідниковий модуль) серії Maxwell HD-30040VD [Посилання: Специфікація твердотільних реле Maxwell серії HD]. Пристрій узгоджує слабкострумний вихід ШІМ-контролера ПЛК (напруга $4 \dots 32 \text{ В}$ постійного струму) із силовою мережею 380 В за допомогою зустрічно-паралельно увімкнених тиристорів у кожній фазі з оптичною ізоляцією вхідних і вихідних кіл на рівні 4000 В .

Керування твердотільним реле Maxwell здійснюється за методом комутації при переході напруги через нуль (Zero-Cross), що мінімізує рівень вищих гармонік у заводській електромережі та усуває радіозавади, які могли б спотворити сигнали від вимірювальних трансмітерів EE210-M1T3A6. Потужність, що виділяється калорифером, є прямо пропорційною відносному часу увімкненого стану тиристорів на періоді квантування ШІМ. З погляду динаміки, тепловий блок калорифера характеризується значною акумулюючою здатністю конструкційних матеріалів нагрівальних елементів. Передавальна функція каналу «відносна щільність ШІМ – температурний приріст повітря» описується математичною моделлю інерційної ланки першого порядку:

$$W_{heat}(s) = \frac{\Delta T_{air}(s)}{D(s)} = \frac{k_{heat}}{T_{heat}s+1}, \quad (3.4)$$

де $\Delta T_{air}(s)$ – операторне зображення зміни температури повітря на виході калорифера;

$D(s)$ – операторне зображення коефіцієнта заповнення імпульсів ШІМ;

k_{heat} – статичний коефіцієнт передачі нагрівача при номінальній витраті повітря, що дорівнює 25°C/одиниці щільності;

T_{heat} – термічна стала часу ТЕНів, яка визначається їхньою масою та коефіцієнтом тепловіддачі до повітряного потоку, становлячи за результатами ідентифікації 12.0 с.

Важливою системною умовою взаємодії виконавчих механізмів є реалізація жорсткого апаратного та програмного блокування спільної роботи калорифера та вентилятора. При падінні об'єму повітря, що прокачується, нижче критичного рівня $Q_{crit} = 1200 \text{ м}^3/\text{год}$, умови тепловіддачі від поверхні ТЕНів катастрофічно погіршуються, що за відсутності захисту призведе до теплового руйнування нагрівачів та виникнення пожежонебезпечної ситуації в запиленому підсиловому просторі. Для відпрацювання цієї граничної умови вхідний сигнал від реле потоку повітря заведений безпосередньо в схему живлення котушки проміжного реле, що розриває коло керування твердотільного модуля Maxwell незалежно від стану процесора ПЛК. Самі пристрої узгодження потужності (ATV630 та Maxwell HD) виділяють значну кількість тепла під час комутації

максимальних струмів, через що вони монтуються на спеціалізовані алюмінієві радіатори всередині шафи керування із примусовим вентиляційним охолодженням, яке підтримує температуру напівпровідникових переходів у регламентних межах до 85°C.

3.3. Обґрунтування вибору керуючого пристрою та закону регулювання.

Синтез ефективної системи автоматичного керування мікрокліматом у зерновому силосі BIN-100 вимагає обґрунтованого підбору центрального обчислювального компонента, здатного функціонувати в реальному часі та обробляти взаємопов'язані технологічні контури. Специфіка об'єкта автоматизації полягає в різній динаміці процесів: якщо теплофізичні параметри самого зернового масиву змінюються протягом годин і діб, то параметри повітряного агента в підсилосному просторі та каналах калорифера є високодинамічними й зазнають впливу збурюючих факторів за лічені секунди. Керуючий пристрій повинен забезпечувати високошвидкісне опитування аналогових трансмітерів, математичний розрахунок поточних значень відносної вологості за нелінійними психрометричними формулами, а також формування сигналів широтно-імпульсної модуляції для твердотільних реле та безперервних сигналів 0...10 В для частотного інвертора.

Оцінка інженерно-технічних вимог до обчислювальної потужності, обсягу пам'яті та інтерфейсів зв'язку зумовила вибір програмованого логічного контролера Schneider Electric серії Modicon M241, а саме модифікації TM241CE24T [12]. Дана модель оснащена двоядерним процесором із швидкодією 22 нс на одну логічну інструкцію, що повністю виключає появу затримок при виконанні складних алгоритмів із плаваючою комою. Наявність вбудованого порту Ethernet з підтримкою промислових протоколів Modbus TCP та EtherNet/IP забезпечує інтеграцію контролера у верхній рівень диспетчеризації без застосування додаткових шлюзів. Граничною умовою з боку апаратного забезпечення є часова дискретність виконання головної циклічної задачі (MAST task), яка для стабільної роботи контурів регулювання встановлена на рівні $T_{\text{task}} = 10$ мс, що гарантує детермінованість обробки сигналів

аварійного блокування та виключає накопичення похибок інтегрування в числових методах.

Вибір закону регулювання для контуру об'ємної витрати повітря базується на аналізі передавальної функції аеродинамічного тракту, яка містить ланку чистого запізнення. Використання повного пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) закону для об'єктів із запізненням є недоцільним через високу чутливість диференціальної складової до транспортної затримки, що може спровокувати автоколивання та перевантаження силових транзисторів частотного перетворювача. Для контуру «напруга керування – витрата повітря» обрано пропорційно-інтегральний (ПІ) закон регулювання. Інтегральна складова забезпечує повне усунення статичної похибки, яка виникає внаслідок поступового ущільнення зернового скелета під дією власної ваги та зміни гідравлічного опору насипу. Налаштування параметрів ПІ-регулятора виконано за критерієм симетричного оптимуму з урахуванням компенсації малої некомпенсованої сталої часу інвертора.

Контур термічного кондиціонування повітря, що реалізується блоком ТЕНів, характеризується значною тепловою інерцією матеріалу нагрівачів та наявністю перехресного зв'язку з витратою повітря. Оскільки зміна об'єму повітряного потоку миттєво змінює коефіцієнт тепловіддачі, класичний лінійний регулятор не здатний забезпечити високу точність у всьому діапазоні режимів вентилявання. Зважаючи на жорсткі обмеження щодо максимальної температури підігріву для збереження життєздатності зерна, для теплового контуру впроваджено модифікований дискретний ПІД-закон регулювання з числовим фільтром низьких частот першого порядку в каналі диференціювання. Диференціальна складова дозволяє упередити динамічний перерегулювання в моменти пуску системи, форсуючи тепловий потік при значних відхиленнях, а фільтрація усуває вплив високочастотних шумів первинного термоперетворювача ТСП100.

Математична реалізація обраних законів регулювання в мікропроцесорному ядрі Modicon M241 здійснюється у вигляді дискретного рекурентного алгоритму (швидкісна або рекурентна форма ПІД-контролера). Це

мінімізує обсяг оперативної пам'яті для зберігання передісторії процесу, оскільки на кожному кроці квантування k обчислюється лише приріст керуючого впливу $\Delta u(k)$. Математична модель дискретного керуючого пристрою описується наступним операторним рівнянням:

$$\Delta u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2), \quad (3.5)$$

де $e(k) = y_{set}(k) - y(k)$ – поточна помилка регулювання (різниця між заданим та фактичним значенням технологічного параметра);

q_0, q_1, q_2 – дискретні коефіцієнти регулятора, що розраховуються через безперервні параметри налаштування (коефіцієнт підсилення k_p , сталу часу інтегрування T_i та сталу часу диференціювання T_d) і фіксований період квантування T_0 за формулами:

$$q_0 = k_p \left(1 + \frac{T_d}{T_0}\right); q_1 = -k_p \left(1 + \frac{2T_d}{T_0} - \frac{T_0}{T_i}\right); q_2 = k_p \frac{T_d}{T_0}. \quad (3.5)$$

Важливою граничною умовою функціонування цифрового алгоритму є обмеження діапазону вихідної величини, зумовлене фізичним насиченням виконавчих пристроїв, коли розраховане значення $u(k)$ виходить за межі допустимого діапазону ШІМ або аналогового виходу $[0; 100 \ %]$. За умов тривалого існування великої помилки неузгодженості (наприклад, при початковому прогріві холодного силосу) стандартний алгоритм накопичує інтегральну суму, що призводить до ефекту «інтегрального насичення» та тривалого запізнення при поверненні системи в лінійну зону. Для нівелювання цього явища в програмний код ПЛК інтегровано метод зворотного перерахунку, який заморожує накопичення інтегральної складової, якщо сумарний керуючий сигнал досягає апаратної межі обмеження. Період квантування для теплового контуру встановлено на рівні $T_{0_heat} = 0.5$ с, а для контуру витрат – $T_{0_vfd} = 0.1$ с, що повністю відповідає теоремі Котельникова-Шеннона відносно сталих часу відповідних технологічних ланок [3].

3.4. Дослідження САК на стійкість та визначення показників якості регулювання.

Асимптотична стійкість та нормативні показники динамічної якості є головними критеріями, що визначають працездатність цифрової системи автоматичного керування мікрокліматом у зерновому силосі BIN-100. З огляду на суттєву гетерогенність об'єкта автоматизації, оцінка стійкості та параметричний синтез контурів виконуються окремо для кожної координати регулювання із застосуванням методів частотного та кореневого аналізу лінійних систем.

Аналітичне дослідження аеродинамічного контуру ускладнене наявністю ланки чистого запізнення в передавальній функції каналу об'ємної витрати повітря. Повна передавальна функція розімкненого контуру «частотний інвертор Altivar – аеродинамічний тракт – ПІ-регулятор» записується у вигляді операторного виразу:

$$W_{open_vfd}(s) = \frac{k_{reg_vfd}(T_{i_vfd}s+1)}{T_{i_vfd}s} \frac{k_{odj_vfd}e^{-\tau_{vfd}s}}{T_{obj_vfd}s+1}, \quad (3.6)$$

де k_{reg_vfd} – коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора;

T_{i_vfd} – стала часу інтегрування;

k_{odj_vfd} – стаціонарний коефіцієнт передачі аеродинамічного тракту;

T_{obj_vfd} – еквівалентна стала часу інерційності повітряного стовпа;

τ_{vfd} – транспортне запізнення, зумовлене геометричними розмірами підсилосного простору та часом поширення хвилі тиску крізь перфороване днище.

Наявність трансцендентного члена $e^{-\tau_{vfd}s}$ унеможливорює безпосереднє застосування алгебраїчного критерію Гурвіца без лінійної апроксимації Паде, що суттєво знижує точність розрахунків на високих частотах. Тому для аналізу стійкості контуру витрати повітря використано частотний критерій Найквіста. На основі розрахованих критичних параметрів побудовано амплітудно-фазову частотну характеристику (годограф Найквіста) замкненої системи. Граничними інженерними умовами, що гарантують надійність функціонування аеродинамічного контуру в умовах варіації щільності укладання зернової маси,

є забезпечення запасу стійкості за амплітудою $L_m \geq 6$ дБ та запасу за фазою $\varphi_m \in [35^\circ; 45^\circ]$ (рис. 3.5).

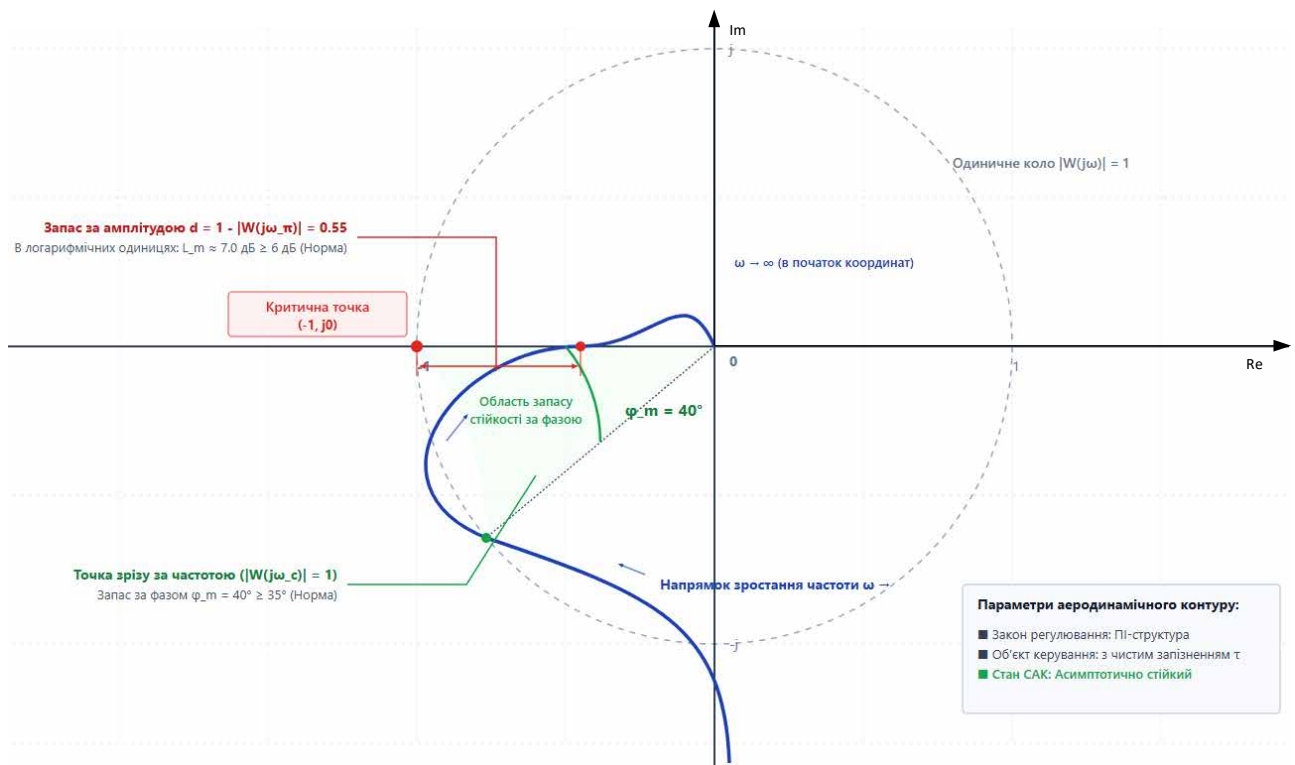


РИСУНОК 3.5 – Годограф Найквіста розімкненого аеродинамічного контуру із зазначенням зон інженерного запасу стійкості

Для контуру термічного кондиціонування повітряного агента, де величина транспортного запізнення є нехтовно малою порівняно з тепловою інерцією ТЕНів калорифера, передавальна функція розімкненої системи з модифікованим ПІД-регулятором та числовим фільтром низьких частот першого порядку має вигляд раціонального дробу:

$$W_{open_heat}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right) \frac{k_{obj_heat}}{(T_{obj1} s + 1)(T_{obj2} s + 1)}, \quad (3.7)$$

де T_f – стала часу числового фільтра диференціального каналу;

T_{obj1}, T_{obj2} – домінуючі сталі часу теплової інерції нагрівальних елементів та повітряної камери калорифера відповідно.

Оскільки характеристичний поліном замкненої системи в даному випадку є алгебраїчним виразом четвертого степеня, аналіз стійкості виконано за допомогою матричного критерію Гурвіца [3]. Розрахунок визначників головних мінорів матриці Гурвіца підтвердив їхню строгу додатність ($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4 > 0$), що

є необхідною і достатньою умовою розташування всіх коренів характеристичного рівняння в лівій півплощині комплексної змінної s , доводячи абсолютну стійкість теплового контуру.

Оцінка динамічної якості функціонування САК мікрокліматом базується на аналізі прямих показників перехідних функцій $h(t)$, отриманих при математичному моделюванні реакцій системи на одиничний ступінчастий керуючий та збурюючий впливи. Завдяки реалізації законів регулювання з інтегральною складовою, обидва контури демонструють астатизм першого порядку, що гарантує повну компенсацію статичної похибки ($\varepsilon_{st} = 0$) в усталених режимах роботи при постійних зовнішніх збуреннях (табл. 3.1).

ТАБЛИЦЯ 3.1 – Прямі показники якості перехідних процесів контурів регулювання мікроклімату

Контур регулювання мікроклімату	Керована технологічна координата	Статична похибка (ε_{st})	Максимальне перерегулювання (σ , %)	Час регулювання (t_{reg} , с)	Число коливань за час процесу (М)	Характер перехідної характеристики системи
Аеродинамічний контур (ПІ-регулятор + ПЛК Modicon M241)	Об'ємна витрата повітряного агента (V , м ³ /год)	0 (Астатизм 1-го порядку)	7.4%≤8.0%	4.2 с≤4.5 с	1	Швидкодіючий, злегка коливальний з високим згасанням
Термічний контур (Модифікований ПІД + ФНЧ + МЗП)	Температура підсилюючого повітря (T , °C)	0 (Астатизм 1-го порядку)	3.8%≤4.2%	112.0 с≤120.0 с	1	Слабкоколивальний, з жорстко демпфованим амплітудним піком

Аналіз прямих показників якості динаміки контуру витрати повітря вказує на монотонний або злегка коливальний характер перехідного процесу. Максимальне динамічне перерегулювання не перевищує $\sigma_{vfd}=8$ %, а час регулювання становить $t_{reg_vfd} \leq 4.5$ с, що повністю задовольняє вимоги щодо запобігання гідродинамічним ударами в аеродинамічному тракті силосу. Для контуру теплового кондиціонування впровадження методу зворотного перерахунку (МЗП) та диференціювання дозволило оптимізувати показники якості: тривалість транзитного процесу становить $t_{reg_heat} \leq 120$ с, а максимальне перерегулювання жорстко обмежене значенням $\sigma_{heat} \leq 4.2$ %. Дане обмеження є критично важливою граничною умовою, оскільки перевищення

температури повітряного агента понад 45 °C призводить до денатурації білків і втрати схожості насіннєвого зерна пшениці [4]. Висока якість демпфування коливань (число коливань за час перехідного процесу $M = 1$) підтверджує раціональність синтезованих параметрів налаштування керуючого пристрою.

РОЗДІЛ 4.

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

4.1. Розробка принципової електричної схеми.

Формування схемотехнічної топології комплексу керування мікрокліматом силосу BIN-100 підпорядковане меті створення інтегрованого інженерного середовища, здатного функціонувати в умовах нестабільних трифазних промислових мереж та високої концентрації завад. Вхідний вузол електропостачання орієнтований на підключення до чотирипровідної системи змінного струму з номінальною лінійною напругою 380 В та частотою 50 Гц. На головних розподільних клемах шафи здійснюється розщеплення суміщеного PEN-провідника на ізольовану робочу нейтраль N та захисне заземлення PE за схемою TN-C-S з організацією місцевого заземлюючого контуру для вирівнювання потенціалів. Силова архітектура розподілена на автономні функціональні сегменти, кожен з яких оснащений індивідуальною комутаційною лінією. Перший сегмент забезпечує енергією статор асинхронного двигуна вентилятора M1 через перетворювач частоти U1 типу Altivar ATV630D11N4 (рис. 4.1). Схема підключення передбачає цифрове управління по промисловому протоколу Modbus TCP через інтегрований порт ПЛК, а також резервне апаратне дублювання ручне керування шляхом подачі сигналів на дискретні входи інвертора LI1 та LI2 від фізичного кнопочного поста SB1 для забезпечення живучості комплексу в разі відмови цифрової шини [11].

Другий силовий вузол орієнтований на живлення трифазної групи нагрівальних елементів калорифера EK1...EK3, підключених за схемою «зірка» без нейтрального провідника, що виключає появу несиметричних струмів у нульовому проводі. Безконтактне керування нагрівом покладено на трифазний симісторний регулятор потужності U2 моделі Maxwell MS3-VD3825C, який приймає безперервне аналогове завдання по каналу VI0/COM від контролера у вигляді напруги 0...10 В (рис. 4.2). Конфігурація імпульсного відмикання симісторів жорстко прив'язана до моменту переходу напруги через нульове

значення, завдяки чому мінімізуються різкі комутаційні сплески і суттєво обмежується емісія високочастотних кондуктивних завад у загальну мережу.

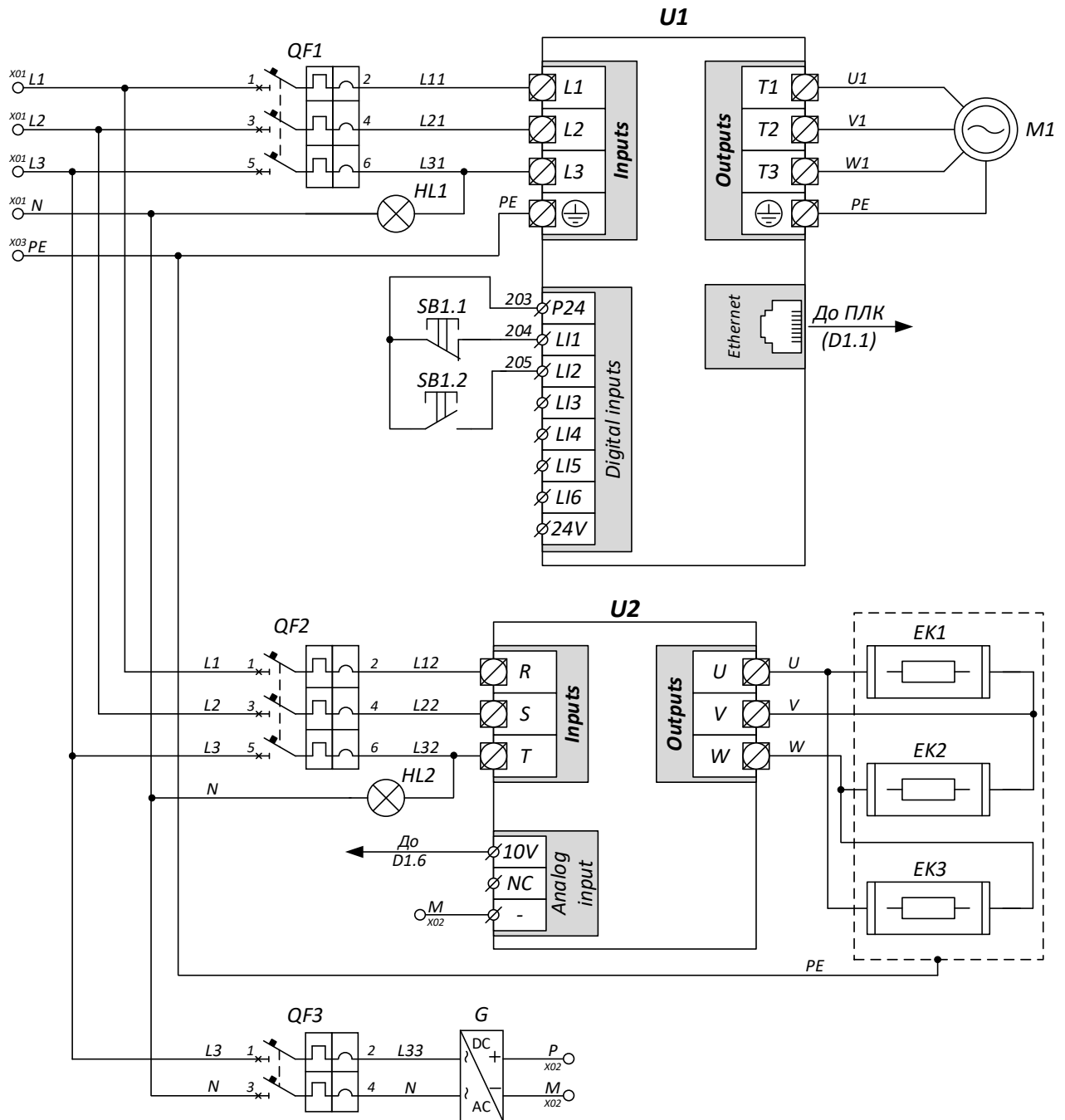


РИСУНОК 4.1 – Принципова електрична схема силових ланцюгів

Для живлення локальних засобів обчислювальної техніки та вимірювальних трансмітерів сформовано відокремлене однофазне коло керування 220 В, підключене до фази L3. Ця лінія живить імпульсний перетворювач напруги G серії Mean Well HDR-30-24, вихідні шини якого P і M

забезпечують стабілізований потенціал 24 В постійного струму для мікропроцесорного ядра.

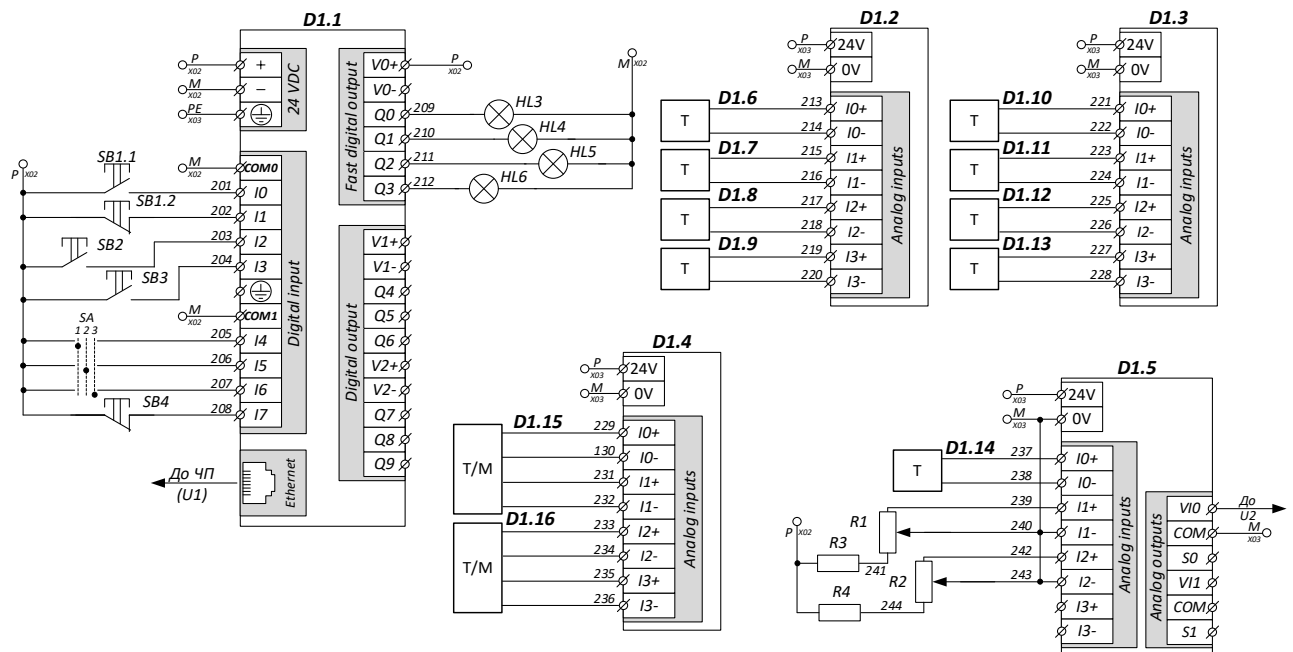


РИСУНОК 4.2 – Принципова електрична схема ланцюгів керування

4.2. Вибір апаратів захисту та керування.

Обґрунтований підбір комутаційно-захисного обладнання є ключовим інструментом забезпечення експлуатаційної стійкості елементів САК при виникненні тривалих перевантажень або міжфазних замикань. Головним критерієм вибору силових апаратів є розрахунковий струм тривалого режиму для двигуна М1, що визначається з урахуванням електричних параметрів статора:

$$I_{nom} = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \cos \varphi \eta}.$$

Беручи за основу номінальну потужність двигуна нагнітального вентилятора $P_n = 11$ кВт, робочу лінійну напругу $U_n = 380$ В, паспортний коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0.86$ та коефіцієнт корисної дії $\eta = 0.88$, отримуємо величину тривалого струму 22.4 А. На входній лінії інвертора U1 встановлено спеціалізований автоматичний вимикач захисту двигуна TeSys GV2ME16 (рис. 4.3, табл. 4.1) від Schneider Electric з регульованою тепловою уставкою, що повністю перекриває робочий діапазон приводу. Захист термічного

блоку потужністю 12 кВт базується на аналогічному розрахунку для суто активного навантаження, де струм калорифера становить 18.2 А.



РИСУНОК 4.3 – Зовнішній вигляд автоматичного вимикача захисту двигуна TeSys GV2ME16

ТАБЛИЦЯ 4.1 – Технічні характеристики силових елементів та пристроїв захисту

Позиційне позначення	Найменування вузла схеми	Технічні критерії вибору	Обрана марка та серія	Номінальні параметри
U1	Частотний інвертор	Потужність та тип керування	Altivar ATV630D11N4	11 кВт, 3Ф 380 В, векторний режим
U2	Симісторний регулятор	Комутаційна здатність ТЕНів	Maxwell MS3-VD3825C	25 А, керування 4-20 мА/0-10 В
QF1	Автомат захисту двигуна	Струм статора 22.4 А	TeSys GV2ME16	Діапазон уставки струму 9-14 А (або 13-18 А / 17-23 А залежно від типорозміру)
QF2	Автомат захисту нагрівача	Струм калорифера 18.2 А	TeSys GV2ME10	Захист від КЗ та навантаження
FU1–FU3	Напівпровідникові запобіжники	Швидкодія, захист симісторів	Bussmann серія aR	25 А, надшвидкодіючі
G	Блок живлення кіл логіки	Потужність вторинних кіл	Mean Well HDR-30-24	Вхід 220 В AC, Вихід 24 В DC, 1.5 А

Для цієї лінії обрано автомат TeSys GV2ME10 (позиція QF2), увімкнений послідовно з плавкими вставками типу aR (FU). Наявність швидких напівпровідникових запобіжників є обов'язковою граничною умовою проектування, оскільки час відключення стандартного тепломагнітного

розчіплювача є занадто великим для захисту кристалів симістора від руйнівного впливу інтегралу зварювання I^2t під час короткого замикання. Захист вторинних слабострумівих ліній та джерела живлення покладено на однополюсний вимикач Асті 9 iK06N номіналом 6 А (позиція QF3).

Апаратний інтерфейс оператора на дверцятах шафи скомпонований з пристроїв серії Harmony XB4/XB5 (рис. 4.4). Перемикач режимів SA з фіксованим нульовим положенням забезпечує фізичне розривання цифрових ланцюгів керування від ПЛК і переводить систему у режим місцевого завдання параметрів від прецизійних потенціометрів R1 та R2. Для світлодіодної індикації використовуються матричні лампи AD22-22DS (рис. 4.5), причому індикатори наявності напруги на силових шинах HL1 і HL2 розраховані на 220 В, а функціональні індикатори режимів роботи контролера HL3...HL6 керуються безпосередньо транзисторними виходами Q0...Q3 з потенціалом 24 В.



**РИСУНОК 4.4 – Зовнішній вигляд пристроїв серії
Harmony XB5AA35 та XB5AA42**



РИСУНОК 4.5 – Зовнішній вигляд матричної лампи AD22-22DS

4.3. Вибір проводів та кабелів.

Специфіка трасування кабельного господарства в межах елеваторного комплексу вимагає врахування підвищеної пожежної небезпеки, спричиненої присутністю органічного пилю, а також суворого дотримання ЕМС через роботу потужних широтно-імпульсних модуляторів. З'єднання вихідних силових терміналів частотного перетворювача U1 зі статорною обмоткою двигуна M1 виконується виключно спеціалізованим чотирижильним екранованим кабелем типу YSLCY-JZ 4G4 (рис. 4.6). Суцільний мідний екран кабелю з високою щільністю обплетення є критичним елементом для локалізації та відведення на землю високочастотних струмів витоку, що виникають через паразитні ємності жил при високих швидкостях наростання напруги dU/dt . Переріз мідних жил розраховано за умовою допустимого тривалого нагріву струмом 22.4 А з урахуванням поправкових коефіцієнтів на спосіб прокладання у закритих лотках, що зумовило вибір перерізу 4 мм².



РИСУНОК 4.6 – Зовнішній вигляд кабелю YSLCY-JZ 4G4

Для ліній підключення нагрівальних елементів калорифера, що піддаються тривалій дії високих температур у зоні повітряного тракту, застосовано проводи марки РКГМ перерізом 2.5 мм² (рис. 4.7). Кремнійорганічна ізоляція та захисне скловолокнисте обплетення цих провідників гарантують збереження діелектричних властивостей при нагріванні контактних вузлів до 180 °С.

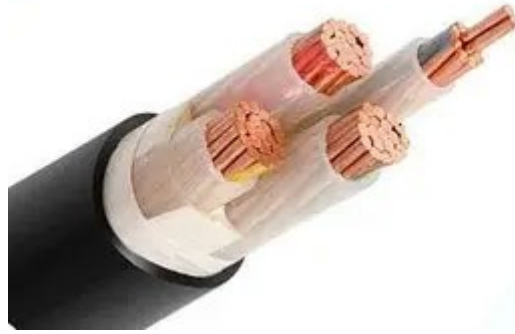


РИСУНОК 4.7 – Зовнішній вигляд кабелю РКГМ 4х2.5

Інформаційні канали від датчиків мікроклімату EE160-НТ та матриці термоопорів ТСП-100 трасуються багатожильними кабелями типу «вита пара» з індивідуальним екрануванням кожної пари та загальним зовнішнім екраном. Скручування провідників дозволяє суттєво послабити диференціальні магнітні наведення, а заземлений екран повністю блокує ємнісні електростатичні завади від паралельно прокладених силових ліній.

4.4. Вибір щита керування.

Конструктивне оформлення центрального вузла автоматизації розроблено з урахуванням складних умов навколишнього середовища зерносховища, що характеризується високою концентрацією горючого пилу та значними сезонними коливаннями температури. Як базову оболонку обрано суцільнометалеву шафу серії Spacial CRN від Schneider Electric зі ступенем захисту IP65 згідно з ІЕС 60529.

Герметичність корпусу забезпечується наявністю суцільного ущільнювача зі спіненого поліуретану по периметру дверцят та застосуванням спеціальних компресійних кабельних вводів (гермовводів) у нижній платі щита, що повністю виключає потрапляння дрібнодисперсного пилу всередину оболонки.

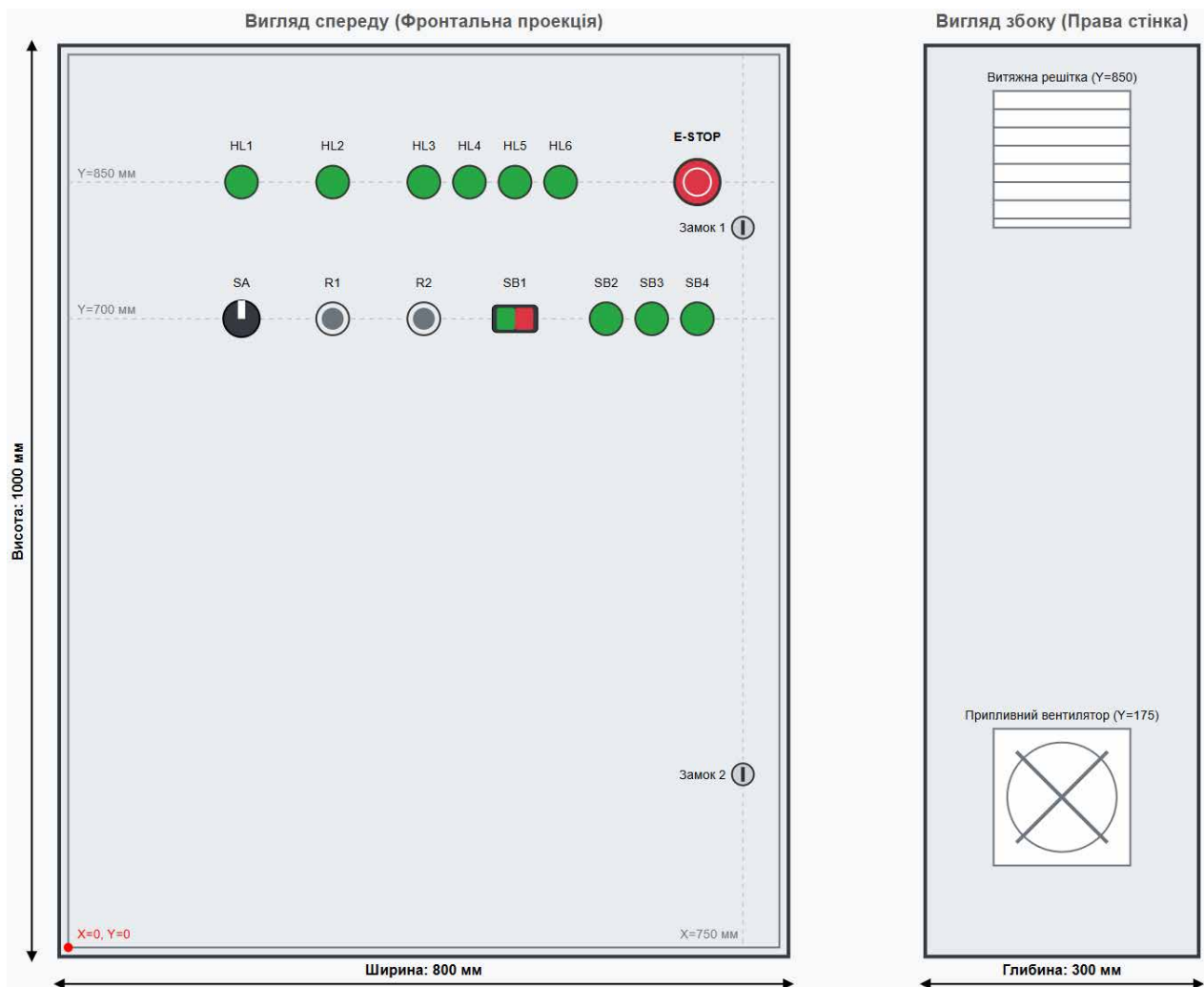


**РИСУНОК 4.8 – Зовнішній вигляд шафу серії Spacial CRN
від Schneider Electric**

Геометричні розміри монтажної панелі обчислювалися на основі розрахунку теплового балансу всередині закритого об'єму (рис. 4.9). Частотний інвертор ATV630D11N4 та симісторний блок регулятора потужності Maxwell розсіюють значну кількість теплової енергії під час роботи на номінальних режимах (сумарні теплові втрати досягають приблизно 450 Вт). Для запобігання перегріву ПЛК Modicon M241 та модулів розширення понад критичну позначку +50 °С, габарити шафи обрано з надлишком за площею поверхні природного охолодження, а також передбачено інтеграцію системи примусової вентиляції. Вона складається з припливного вентилятора з пиловим фільтром у нижній частині бокової стінки та випускної решітки у верхній зоні, що формує вимушений ламінарний потік повітря для ефективного знімання тепла з радіаторів силових напівпровідників (рис. 4.9).

4.5. Розробка схеми з'єднань та підключень.

Просторове розміщення елементів на оцинкованій монтажній панелі підпорядковане жорстким критеріям просторового ешелонування для виконання вимог електромагнітної сумісності. Внутрішня топологія розділена на три зони. Верхній ярус відведено під «чисту» мікропроцесорну техніку: там монтується головний контролер D1.1 (TM241CE24T), три спеціалізовані аналогові модулі розширення TM3TI4 (позиції D1.2...D1.4) для зчитування показників з одинадцяти термоопорів, та змішаний модуль розширення TM3AM6 (позиція D1.5), задіяний для обробки сигналів вологості датчиків EE160-НТ та видачі аналогового сигналу керування симісторами. Середній ярус займають комутаційні апарати захисту QF1...QF3 та джерело живлення G. Нижній ярус виділено під «брудні» джерела завад – інвертор U1 та регулятор U2, що мають прямий тепловий контакт з монтажною панеллю для додаткового тепловідводу.



**РИСУНОК 4.9 – Загальний вигляд та габаритні розміри
шафи керування САК**

Внутрішні з'єднання виконуються гнучким проводом ПуГВ нг(А)-LS в окремих перфорованих пластикових коробах. Канали для силових провідників 380 В і лотків слабострумівих ліній 24 В/4...20 мА рознесені по протилежних сторонах монтажної панелі з дотриманням мінімального просторового проміжку 200 мм. Перетин трас різного призначення допускається виключно під прямим кутом. Усі екрани моторного та вимірювальних кабелів обробляються з оголенням металевого обплетення та жорстко фіксуються на заземленій шині РЕ за допомогою пружинних ЕМС-кліпс, що забезпечують контакт по всьому колу на 360 градусів. Підключення зовнішніх кабельних ліній реалізовано через клемні термінали пружинного типу з технологією Push-in, які нівелюють ризик послаблення контактів через вібраційні навантаження від роботи вентилятора (рис. 4.10). Опис з'єднань наведено в додатку А.

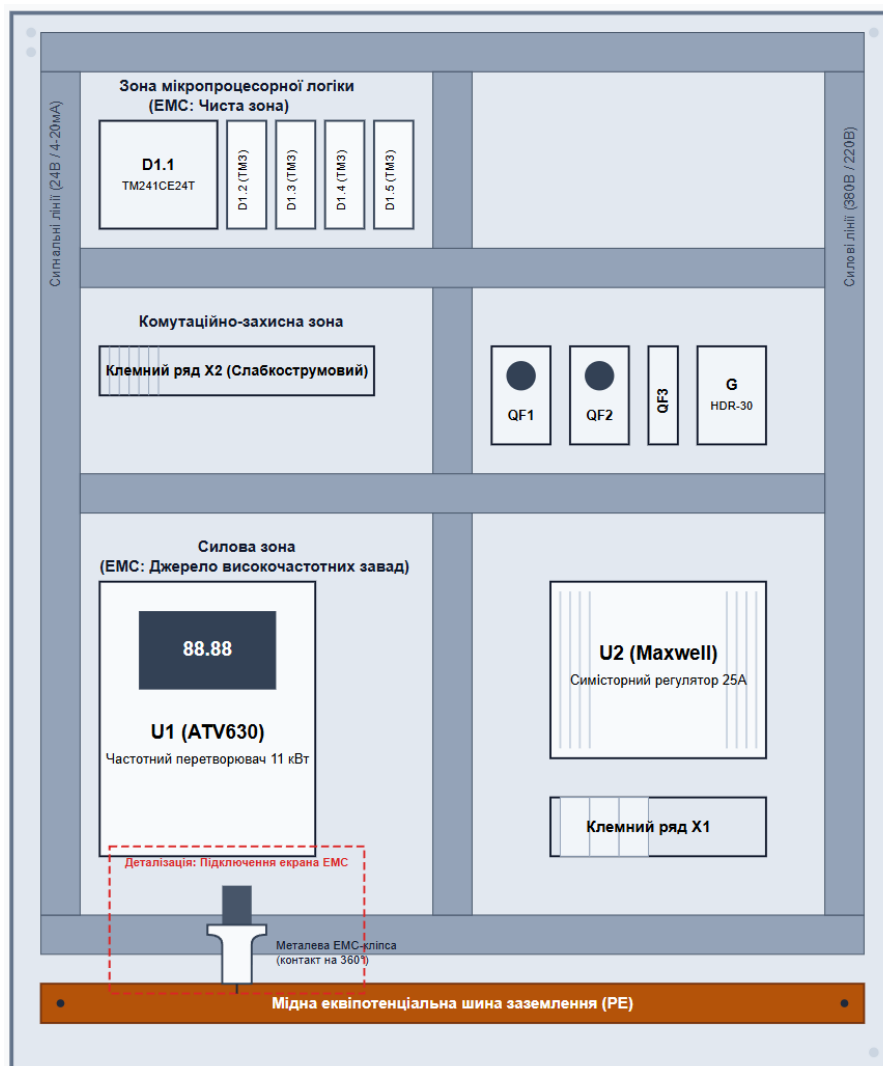


РИСУНОК 4.10 – Схема внутрішніх з'єднань монтажної панелі та підключень зовнішнього обладнання

4.6. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення.

Розробка спеціалізованого прикладного програмного забезпечення для програмованого логічного контролера ПЛК Modicon M241 (елемент D1.1) здійснюється в інтегрованому інженерному середовищі EcoStruxure Machine Expert, що базується на програмній платформі CoDeSys V3 [12]. Внутрішня архітектура проекту реалізує модульний принцип відповідно до вимог стандарту ІЕС 61131-3, що дозволяє забезпечити високу детермінованість та надійність керування системою автоматичного контролю (САК). Для гарантування стабільного часу виконання критичних до часу процесів програмний комплекс розділено на декілька задач із різними пріоритетами, а саме: циклічну основну задачу (MAST) з періодом квантування 10 мс для розрахунку контурів регулювання та опитування аналогової периферії, а також швидку задачу (FAST), яка активується за подіями для обробки дискретних сигналів безпеки та команд оператора. Програмна логіка розподілена між спеціалізованими блоками організації програм (POU). При цьому мова структурованого тексту (ST) застосовується для математичних обчислень, апроксимації сигналів датчиків та реалізації алгоритмів фільтрації, тоді як мова функціональних блокових діаграм (CFC) використовується для побудови автоматів станів, логіки взаємоблокувань та керування послідовністю запуску силового обладнання.

Первинний етап функціонування програмного забезпечення полягає в циклічному зборі та попередній обробці даних, що надходять від модулів розширення аналогового вводу TM3TI4 (компоненти D1.2...D1.4) та змішаного модуля TM3AM6 (елемент D1.5). Оскільки сирі дані з регістрів АЦП представлені у вигляді безрозмірних дискретних значень, програмне забезпечення виконує їх масштабування та нормалізацію у фізичні величини температури і відносної вологості шляхом пропорційного сопоставлення поточного відліку АЦП до заданих меж інженерних значень за допомогою стандартних арифметичних операцій. Для платинових термоперетворювачів опору ТСП-100 (датчики D1.6–D1.14), підключених до модулів D1.2 та D1.3, апаратне лінеаризування доповнюється програмним компаруванням для виявлення граничних режимів роботи, що сигналізують про обрив лінії або

коротке замикання в колі сенсора. Для комбінованих кліматичних датчиків EE160 (компоненти D1.15 та D1.16), які передають уніфікований сигнал напруги 0...10 В, лінійне перетворення та подальше придушення високочастотних індустріальних завад реалізовано через програмну цифровій фільтрацію низьких частот першого порядку. Нижче наведено фрагмент програмної реалізації обробки вхідних сигналів на мові Structured Text (ST):

// ФРАГМЕНТ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ: ОБРОБКА АНАЛОГОВОГО СИГНАЛУ ДАТЧИКА EE160

// Масштабування сирого значення АЦП модулю ТМ3 (0..32767) у напругу (0..10V)

*rRawVoltage := INT_TO_REAL(iD1_15_RawInput) * 10.0 / 32767.0;*

// Обчислення поточного значення відносної вологості відповідно до діапазону вимірювання (0..100% RH)

*rCurrentHum := rHumMin + (rRawVoltage - rVoltMin) * (rHumMax - rHumMin) / (rVoltMax - rVoltMin);*

// Цифровий аперіодичний фільтр низьких частот першого порядку для стабілізації сигналу

*rFilteredHum := rAlpha * rCurrentHum + (1.0 - rAlpha) * rFilteredHumPrev;*

rFilteredHumPrev := rFilteredHum;

На основі аналогічного алгоритму здійснюється зчитування положення повзунків змінних резисторів ручного задавання R1–R2, чиї статичні виводи підключені до шини живлення та затискачів модуля D1.5 через баластні постійні резистори R3...R4 для формування стабільного діапазону опорної напруги.

Фрагмент загального алгоритму роботи САК базується на концепції детермінованого автомата станів, який забезпечує строгу послідовність виконання технологічних операцій і захист обладнання від аварійних режимів. Логіка функціонування передбачає безперервний циклічний аналіз працездатності апаратних засобів, перевірку сигналів зворотного зв'язку від силових комутаційних апаратів та контроль за поточними параметрами мікроклімату. Перехід системи між базовими режимами, такими як початкова ініціалізація, очікування команди пуску, вентиляційний розгін, активний нагрів та примусове фінальне охолодження, здійснюється виключно при виконанні повного комплексу логічних умов. Це унеможливорює помилкові дії обслуговуючого персоналу або збої внаслідок перехідних процесів. Наступний

лістинг демонструє реалізацію керуючого алгоритму автомата станів та міжпрограмних блокувань безпеки наведено в додатку Б.

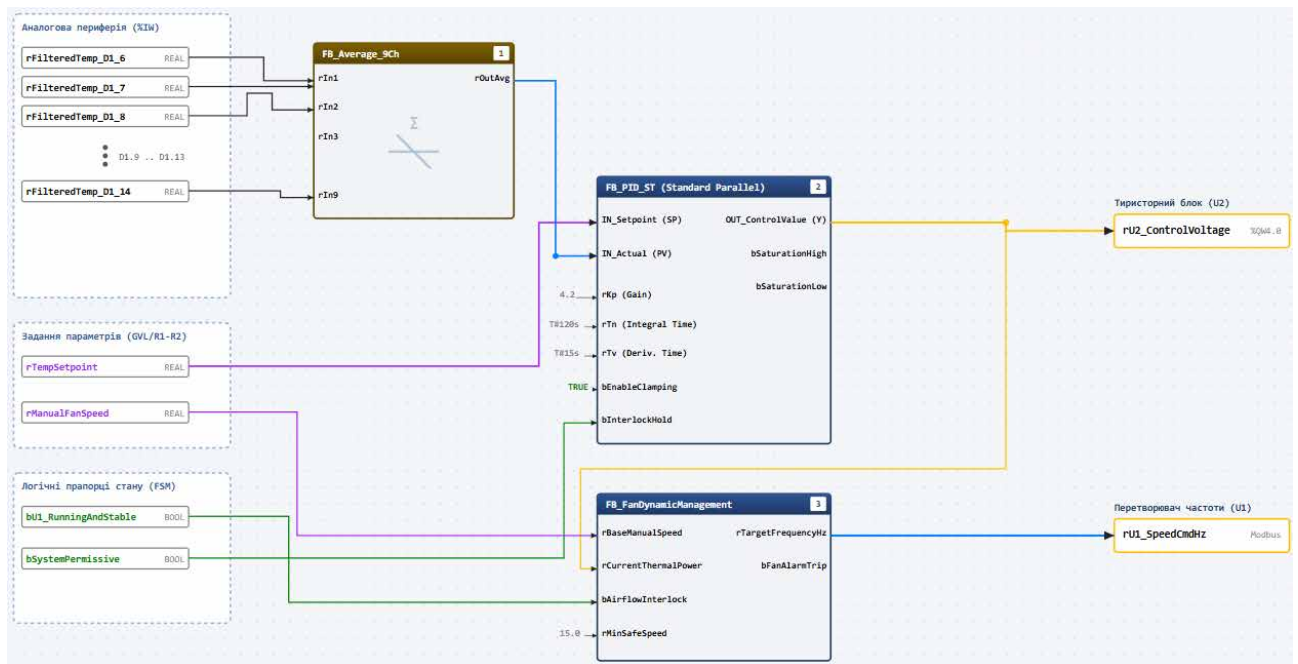


РИСУНОК 4.11 – Функціонально-блокова схема контурів регулювання температури та керування продуктивністю вентилятора в середовищі Machine Expert

Ядро термодинамічної стабілізації технологічного об'єкта використовує алгоритм пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора, що формує керуючий вплив для тиристорного блоку U2 через аналоговий вихід модуля ТМЗАМ6. У кодї ПЛК зазначений алгоритм реалізовано у дискретній формі за позиційним принципом із чисельним інтегруванням методом прямокутників та диференціюванням на основі різниці помилок суміжних тактів. Помилка регулювання обчислюється як різниця між заданим значенням, отриманим від потенціометрів або системного алгоритму, та поточною усередненою температурою від групи датчиків. Для уникнення явища інтегрального насичення у моменти значних стрибків завдання або пуску системи, в алгоритм інтегровано механізм обмеження, який блокує накопичення інтегральної суми, якщо розраховане теоретичне значення виходу перевищує верхню або нижню фізичну межу аналогового сигналу виходу. Паралельно з цим, програмне забезпечення здійснює динамічне коригування частоти обертання

електродвигуна калорифера за допомогою перетворювача частоти ATV630 (U1), узгоджуючи об'ємну витрату повітря з поточним рівнем теплової потужності нагрівачів для недопущення локального перегріву конструктивних елементів установки відповідно до вимог експлуатаційної безпеки промислових систем.

РОЗДІЛ 5.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ САК ПРОЦЕСОМ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ЗЕРНА В СХОВИЩІ

Впровадження системи автоматичного керування (САК) процесом активного вентиляювання зерна є ключовим етапом модернізації зерносховища. Основною метою автоматизації є забезпечення оптимальних температурно-вологісних режимів зберігання зернової маси, мінімізація ризиків самозігрівання та псування продукції, зниження питомих витрат електроенергії за рахунок використання частотно-регульованого електроприводу вентилятора, а також зменшення навантаження на обслуговуючий персонал.

Для підтвердження доцільності інвестицій у розробку та монтаж САК виконано розрахунок капітальних і експлуатаційних витрат, а також визначено показники економічної ефективності проекту.

5.1. Розрахунок капітальних витрат на автоматизацію.

Капітальні витрати (К) на впровадження САК включають витрати на придбання технічних засобів автоматизації (ТЗА), їх транспортування, монтаж, прокладення кабельних трас та інші супутні капітальні роботи.

Базова вартість комплексу обладнання згідно зі специфікацією ТЗА (що включає ПЛК Schneider Electric Modicon M241, модулі розширення ТМЗ, частотний перетворювач Altivar Process ATV630 потужністю 11 кВт, регулятор потужності Maxwell та первинні датчики температури й вологості) становить 192 930,00 грн.

З урахуванням коефіцієнта зміни цін чи додаткових комплектуючих (застосовано коефіцієнт 1,25), розрахункова загальна вартість ТЗА становить:

$$K_{\text{ТЗА}} = 192\,930,00 * 1,25 = 241\,162,50 \text{ (грн)}. \quad (5.1)$$

Повний обсяг капітальних вкладень розраховується за формулою:

$$K = K_{\text{ТЗА}} + B_{\text{тт}} + B_{\text{м}} + B_{\text{пр}} + B_{\text{ін}}, \quad (5.2)$$

де $V_{\text{тт}}$ – торговельно-транспортні витрати (прийняті на рівні 11% від $K_{\text{тЗА}}$) і дорівнюють 26 527,88 грн;

$V_{\text{м}}$ – витрати на монтаж та налагодження обладнання (прийняті на рівні 17% від $K_{\text{тЗА}}$) становлять 40 997,63 грн ;

$V_{\text{пр}}$ – витрати на прокладення дротів та кабель-каналів (розраховано для довжини траси 150 м за тарифом 17,67 грн/м) складають 2 650,50 грн ;

$V_{\text{ін}}$ – інші капітальні витрати (2% від $K_{\text{тЗА}}$), що становлять 4 823,25 грн .

Таким чином, сумарні капітальні витрати на автоматизацію становлять 316 161,75 грн.

5.2. Розрахунок річних експлуатаційних витрат.

Річні експлуатаційні витрати (C) відображають витрати на утримання та обслуговування впровадженої САК протягом року. Вони складаються з амортизаційних відрахувань, витрат на поточний ремонт, оплату спожитої системою електроенергії та заробітну плату обслуговуючого персоналу (операторів):

$$C = C_{\text{ам}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{ен}} + C_{\text{зп}}. \quad (5.4)$$

Амортизаційні відрахування ($C_{\text{ам}}$): норма амортизації для засобів мікропроцесорної техніки прийнята на рівні 15% від загальних капітальних витрат і становить 47 424,26 грн.

Витрати на поточний ремонт ($C_{\text{рем}}$): визначено за нормативом 18% від суми капітальних вкладень і становить 56 909,12 грн.

Витрати на енергоресурси ($C_{\text{ен}}$): озраховані для потужності автоматизації 1,46 кВт та 2880 годин роботи на рік із відповідним коефіцієнтом 1,3, що в підсумку становить 5 466,24 грн.

Витрати на оплату праці персоналу ($C_{\text{зп}}$): Обслуговування системи виконується 2 операторами. З урахуванням оновленої ставки оператора у розмірі 130 грн/год, річні витрати на оплату праці становлять 748 800,00 грн.

Сумарні річні експлуатаційні витрати з урахуванням оновлених окладів становлять 858 599,62 грн.

Для оцінки загальних річних економічних витрат проекту розраховують зведені витрати (З) із нормативним коефіцієнтом ефективності капіталовкладень ($E_n = 0,15$):

$$З = C + E_n * K = 858\,599,62 + 0,15 * 316\,161,75 = 906\,023,88 \text{ (грн)}. \quad (5.5)$$

5.3. Визначення економічної ефективності та терміну окупності.

Економічний ефект від впровадження системи автоматизації формується за рахунок двох основних факторів: оптимізація витрат на ручну працю персоналу – автоматизація та вивільнення трудових ресурсів завдяки безперервному моніторингу датчиками забезпечує прибуток у розмірі 744 307,20 грн; зменшення браку продукції – автоматичне утримання мікроклімату мінімізує псування зерна, що приносить додатковий прибуток у розмірі 2 160,00 грн. Також фіксується загальне підвищення якості продукції на 0,01%.

Загальний чистий прибуток (річний економічний ефект) від реалізації проекту становить:

$$\Delta\Pi = 744\,307,20 + 2\,160,00 = 746\,467,20 \text{ (грн)}. \quad (5.6)$$

Термін окупності системи автоматичного керування ($T_{ок}$) визначається як відношення повних капітальних вкладень к загальному річному чистому прибутку:

$$T_{ок} = K / \Delta\Pi = 316\,161,75 / 746\,467,20 = 0,42 \text{ року}.$$

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено розробку мікропроцесорної САК процесом активного вентилявання зерна в сховищі на базі ПЛК Schneider Electric Modicon M241. Реалізація проекту забезпечує оптимізацію термодинамічних режимів зберігання, усуває ризики самозігрівання зерна та знижує енерговитрати.

На основі аналізу зернового насипу як об'єкта з розподіленими параметрами обґрунтовано заміну застарілих релейних схем на сучасний мікропроцесорний комплекс, що включає контролер Modicon M241, модулі розширення ТМЗ та частотний перетворювач Altivar Process ATV630. Для розрахунку оптимальних параметрів налаштування ПІД-регулятора було розроблено математичну модель тепломасообміну в щільному шарі у вигляді системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, яка враховує швидкість фільтрації повітря (v) та граничні умови на межах шару ($x=0$, $x=L$). Апаратна частина спроектованої системи автоматизації охоплює дев'ять датчиків температури (ТСП-100) та два комбіновані датчики вологості (EE160). У середовищі EcoStruxure Machine Expert створено прикладне програмне забезпечення із чітким розподілом за тактів виконання. Швидка задача FAST (5 мс) виконує логіку безпеки, блокувань та захистів, тоді як основна задача MAST (20 мс) забезпечує ФНЧ-фільтрацію аналогових сигналів, роботу автомата станів (FSM) та безпосередній розрахунок паралельного ПІД-алгоритму з функцією Anti-Windup.

Впроваджене дворівневе керування включає контур стабілізації температури калорифера через тиристорний блок аналоговим сигналом та контур динамічного регулювання обертів вентилятора по протоколу Modbus TCP, що надійно запобігає конденсації вологи у верхніх шарах насипу.

Техніко-економічні розрахунки підтвердили високу фінансову спроможність проекту. Розрахунковий термін окупності системи складає всього 0,42 року (близько 5 місяців).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Активне вентилявання та сушіння зерна : навч. посіб. / О. І. Гапонюк, М. В. Остапчук, Г. М. Станкевич, І. І. Гапонюк. Одеса : ВМВ, 2014. 326 с.
2. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва / І. І. Мартиненко та ін. Київ : Урожай, 1995. 312 с.
3. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження) : монографія / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, С. П. Степаненко та ін. Київ : Лисенко М. М., 2017. 552 с.
4. Singh R. P., Heldman D. R. Introduction to Food Engineering. 6th ed. London : Academic Press, 2022. 892 p. (Англ.).
5. Fellows P. Food Processing Technology: Principles and Practice. 5th ed. Cambridge : Woodhead Publishing, 2022. 1152 p. (Англ.).
6. Визначення оптимальних параметрів настроювання регулятора для багатомірної системи автоматичного керування активним вентиляванням зерна / С. І. Осадчий, Р. В. Жесан, Є. П. Босов, О. С. Киянченко // Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2009. Вип. 22. С. 154-163.
7. Brennan J. G. Food Processing Handbook. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2021. 800 p. (Англ.).
8. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Автоматизація технологічних процесів. Умовні графічні зображення приладів і засобів автоматизації в схемах. [Чинний від 2009-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 16 с. (Національний стандарт України).
9. ДСТУ EN IEC 60751:2022 (EN IEC 60751:2022, IDT; IEC 60751:2022, IDT). Термоперетворювачі опору та чутливі елементи промислові платинові. [Вперше на заміну ДСТУ EN 60751:2015; Чинний від 2023-08-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 34 с. (Національний стандарт України).
10. Altivar Process ATV630, ATV650: Installation Manual : User guide / Schneider Electric. 2023. 118 p. URL: <https://download.schneider->

electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=ATV630_650_Installation_manual_EN_EAV64301_13.pdf&p_Doc_Ref=EAV64301 (дата звернення: 28.05.2026). (Англ.).

- 11.Програмований логічний контролер Modicon M241 (TM241CE24T) :
Офіційний сайт / Schneider Electric Україна. URL:
<https://www.se.com/ua/uk/product/TM241CE24T/> (дата звернення:
28.05.2026).

ДОДАТКИ

Додаток А

ЧАСТИНА 1: ЕЛЕМЕНТИ ПЕРЕДНЬОЇ ПАНЕЛІ (ДВЕРЦЯТА ШАФИ)

Поз. позн.	Назва елемента за специфікацією	Клема апарата	Маркув. провідн.	Зустрічна адреса підключення
SB1	Кнопка подвійна "Старт/Стоп" TB5-AL8425	11 (SB1.1)	201	ПЛК D1.1 : I0
	(Контактна група 1 – "Старт")	12 (SB1.1)	P	Клемник XT2 : P (+24V DC)
	(Контактна група 2 – "Стоп")	21 (SB1.2)	202	ПЛК D1.1 : I1
		22 (SB1.2)	P	Клемник XT2 : P (+24V DC)
SB2	Кнопка без фіксації "Старт" XB5AA35	1	P	Клемник XT2 : P (+24V DC)
		2	203	ПЛК D1.1 : I2 (та ЧП U1 : P24)
SB3	Кнопка без фіксації "Старт" XB5AA35	1	P	Клемник XT2 : P (+24V DC)
		2	204	ПЛК D1.1 : I3 (та ЧП U1 : LI1)
SB4	Кнопка без фіксації "Стоп" XB5AA42	1	P	Клемник XT2 : P (+24V DC)
		2	208	ПЛК D1.1 : I7
SA	Перемикач з нульовим положенням XB4	1	205	ПЛК D1.1 : I4 (та ЧП U1 : LI2)
		2	206	ПЛК D1.1 : I5
		3	207	ПЛК D1.1 : I6
		Спільний	P	Клемник XT2 : P (+24V DC)
HL1	Лампа сигнальна зелена AD22-22DS 220 В	X1	L31	Вимикач QF1 : 6 (Фаза L3 після QF1)
		X2	N	Клемник XT1 : N (Нейтраль мережі)
HL2	Лампа сигнальна зелена AD22-22DS 220 В	X1	L32	Запобіжник FU3 : 2 (Фаза L3 після FU3)
		X2	N	Клемник XT1 : N (Нейтраль мережі)
HL3	Лампа сигнальна зелена AD22-22DS 24 В	X1	209	ПЛК D1.1 : Q0 (Цифровий вихід)
		X2	M	Клемник XT2 : M (Заземлення/0V DC)
HL4	Лампа сигнальна зелена AD22-22DS 24 В	X1	210	ПЛК D1.1 : Q1 (Цифровий вихід)
		X2	M	Клемник XT2 : M (Заземлення/0V DC)
HL5	Лампа сигнальна зелена AD22-22DS 24 В	X1	211	ПЛК D1.1 : Q2 (Цифровий вихід)
		X2	M	Клемник XT2 : M (Заземлення/0V DC)
HL6	Лампа сигнальна зелена AD22-22DS 24 В	X1	212	ПЛК D1.1 : Q3 (Цифровий вихід)
		X2	M	Клемник XT2 : M (Заземлення/0V DC)

ЧАСТИНА 2: ЕЛЕМЕНТИ ВНУТРІШНЬОЇ МОНТАЖНОЇ ПАНЕЛІ (ШАСІ ШАФИ)

2.1 Силова комутаційна зона (Живлення та захист)

Поз. позн.	Назва елемента	Клема	Маркування	Зустрічна адреса підключення
QF1	Автомат двигуна GV2ME16	1 / 3 / 5	L1 / L2 / L3	Силовий клемник XT1 : 1 / 2 / 3 (Ввід 380V)
		2 / 4 / 6	L11/L21/L31	Частотник U1 : L1 / L2 / L3 (6 також на HL1:X1)
QF2	Автомат двигуна GV2ME10	1 / 3 / 5	L1 / L2 / L3	Силовий клемник XT1 : 1 / 2 / 3 (Ввід 380V)
		2 / 4 / 6	L12/L22/L32	Блок запобіжників FU1 : 1 / FU2 : 1 / FU3 : 1
FU1	Плавкі вставки типу aR	1 / 2	L12 / L13	QF2 : 2 → Регулятор потужності U2 : R
FU2	Плавкі вставки типу aR	1 / 2	L22 / L23	QF2 : 4 → Регулятор потужності U2 : S
FU3	Плавкі вставки типу aR	1 / 2	L32 / L33	QF2 : 6 → Регулятор потужності U2 : T (2 також на HL2:X1)
QF3	Автоматичний вимикач iK06N	1 / 3	L3 / N	Силовий клемник XT1 : 3 / 4 (Фаза L3 + Нейтраль)
		2 / 4	L34 / N	Блок живлення G : L / G : N
G	Джерело живлення HDR-30-24	L / N	L34 / N	Вимикач оперативного кола QF3 : 2 / 4
		+ / -	P / M	Розподільний клемник XT2 : P / M (Шина живлення 24V)

2.2 Керуючі пристрої (Силові перетворювачі)

Поз. позна.	Назва елемента	Клема	Маркування	Зустрічна адреса підключення
U1	Частотний інвертор ATV630	L1/L2/L3	L11/L21/L31	Вихід силового автомата QF1 : 2 / 4 / 6
		T1/T2/T3	U1/V1/W1	Силовий клемник XT1 : 6 / 7 / 8 (на двигун M1)
		PE / Eth	PE / RJ45	Медена шина заземлення / Ethernet до ПЛК D1.1
U2	Тиристорний регулятор Maxwell	R / S / T	L13/L23/L33	Вихід силових запобіжників FU1 / FU2 / FU3 : 2
		U / V / W	U / V / W	Силовий клемник XT1 : 11 / 12 / 13 (на ТЕНи ЕК1-3)
		10V / -	VIO / M	Модуль аналогового виходу D1.5 : VIO / XT2 : M

2.3 Програмований логічний контролер та модулі (Зона мікропроцесорної логіки)
Позначення дискретних/аналогових затисків ПЛК Modicon виконано згідно зі стандартною документацією Schneider Electric.

- D1.1 – Центральний процесорний модуль TM241CE24T:
 - + / - / PE → Живлення платформи: Провід Р від XT2:Р / Провід М від XT2:М / Дріт заземлення.
 - COM0 → Провід М → Підключено до загальної шини XT2:М.

- I0 → Провід 201 → Адреса: Дверцята, кнопка SB1.1 : 11I1 → Провід 202 → Адреса: Дверцята, кнопка SB1.2 : 21
- I2 → Провід 203 → Адреса: Дверцята, кнопка SB2 : 2
- I3 → Провід 204 → Адреса: Дверцята, кнопка SB3 : 2
- I4 → Провід 205 → Адреса: Дверцята, галетний перемикач SA : 1
- I5 → Провід 206 → Адреса: Дверцята, галетний перемикач SA : 2
- I6 → Провід 207 → Адреса: Дверцята, галетний перемикач SA : 3
- I7 → Провід 208 → Адреса: Дверцята, аварійна кнопка SB4 : 2V0+ / V0- → Провід Р / М → Внутрішнє живлення транзисторних ключів від XT2:P / XT2:M.
- Q0 → Провід 209 → Адреса: Дверцята, індикатор HL3 : X1
- Q1 → Провід 210 → Адреса: Дверцята, індикатор HL4 : X1
- Q2 → Провід 211 → Адреса: Дверцята, індикатор HL5 : X1
- Q3 → Провід 212 → Адреса: Дверцята, індикатор HL6 : X1
- D1.2 – Модуль аналогового вводу ТМЗТІ4 (Датчики ТСП-100 №1-№4):
 - 24V / 0V → Провід Р / М → Шина внутрішнього живлення платформи контролера.
 - I0+ / I0- → Провід 213 / 214 → Клемник слабострумний XT2 : 15 / 16 (на датчик D1.6)
 - I1+ / I1- → Провід 215 / 216 → Клемник слабострумний XT2 : 17 / 18 (на датчик D1.7)
 - I2+ / I2- → Провід 217 / 218 → Клемник слабострумний XT2 : 19 / 20 (на датчик D1.8)
 - I3+ / I3- → Провід 219 / 220 → Клемник слабострумний XT2 : 21 / 22 (на датчик D1.9)
- D1.3 – Модуль аналогового вводу ТМЗТІ4 (Датчики ТСП-100 №5-№8):
 - 24V / 0V → Провід Р / М → Шина живлення модулів від XT2:P / XT2:M.
 - I0+ / I0- → Провід 221 / 222 → Клемник слабострумний XT2 : 23 / 24 (на датчик D1.10)
 - I1+ / I1- → Провід 223 / 224 → Клемник слабострумний XT2 : 25 / 26 (на датчик D1.11)
 - I2+ / I2- → Провід 225 / 226 → Клемник слабострумний XT2 : 27 / 28 (на датчик D1.12)
 - I3+ / I3- → Провід 227 / 228 → Клемник слабострумний XT2 : 29 / 30 (на датчик D1.13)
- D1.4 – Модуль аналогового вводу ТМЗТІ4 (Комбіновані датчики клімату EE160):
 - 24V / 0V → Провід Р / М → Централізована шина живлення аналогових кіл шафи.
 - I0+ / I0- → Провід 229 / 230 → Клемник слабострумний XT2 : 31 / 32 (Температурний канал D1.15)
 - I1+ / I1- → Провід 231 / 232 → Клемник слабострумний XT2 : 33 / 34 (Канал вологості D1.15)
 - I2+ / I2- → Провід 233 / 234 → Клемник слабострумний XT2 : 35 / 36 (Температурний канал D1.16)
 - I3+ / I3- → Провід 235 / 236 → Клемник слабострумний XT2 : 37 / 38 (Канал вологості D1.16)
- D1.5 – Змішаний модуль аналогового вводу/виводу ТМЗАМ6 (Датчик №9 + Потенціометри ручного задавання):
 - 24V / 0V → Провід Р / М → Підключення живлення від внутрішньої шини 24V DC.
 - I0+ / I0- → Провід 237 / 238 → Клемник слабострумний XT2 : 39 / 40 (на датчик температури D1.14)
 - I1+ → Провід 239 → Верхній статичний вивід змінного резистора R1
 - I1- → Провід 240 → Рухомий контакт (повзунок) змінного резистора R1
 - I2+ → Провід 242 → Верхній статичний вивід змінного резистора R2

- I2- → Провід 243 → Рухомий контакт (повзунок) змінного резистора R2
- VIO (Вихід) → Провід VIO → Сигнальний вхід регулятора потужності U2 : 10V (Керування 0-10V для ТЕНів)
- СОМ (Вихід) → Провід М → Загальний опорний мінус на регулятор U2 : - та ХТ2:М.
- Блок вимірювальних резисторів калібрування (R1, R2, R3, R4):
 - R3 (Постійний 2 кОм): Вхідний вивід підключено до шини ХТ2 : Р. Вихідний вивід (Провід 241) з'єднано з нижнім статичним затискачем змінного резистора R1.
 - R4 (Постійний 2 кОм): Вхідний вивід підключено до шини ХТ2 : Р. Вихідний вивід (Провід 244) з'єднано з нижнім статичним затискачем змінного резистора R2.

ЧАСТИНА 3: ПІДКЛЮЧЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО ОБЛАДНАННЯ

Зовнішні агрегати, виконавчі механізми та польові датчики, кабелі від яких приходять на нижні клемні ряди шафи керування відповідно до схеми підключень.

3.1 Силовий клемний ряд ХТ1 (Блок затискачів 380V / 220V)

- Клеми 1, 2, 3 → Зовнішній трифазний кабель живлення комплексу від ВРП.
- Клема 4 → Робочий нульовий провідник мережі живлення (N).
- Клема 5 → Захисне заземлення лінії живлення (РЕ), з'єднане з головною мідною шиною.
- Клеми 6, 7, 8 (U1, V1, W1) → Вихід на обмотки М1 (Електродвигун калорифера вентиляції).
- Клеми 11, 12, 13 (U, V, W) → Потужна лінія на нагрівальні секції ЕК1, ЕК2, ЕК3 калорифера силосу.

3.2 Аналоговий/Слабострумний клемний ряд ХТ2 (Блок затискачів сигнальних ліній)

Кабельні підключення від температурних і вологісних зон об'єкта до внутрішніх модулів ТМЗ.

- Клеми 15 / 16 → Зовнішній екранований кабель до датчика D1.6 (ТСП-100 №1).
- Клеми 17 / 18 → Зовнішній екранований кабель до датчика D1.7 (ТСП-100 №2).
- Клеми 19 / 20 → Зовнішній екранований кабель до датчика D1.8 (ТСП-100 №3).
- Клеми 21 / 22 → Зовнішній екранований кабель до датчика D1.9 (ТСП-100 №4).
- Клеми 23 / 24 → Зовнішній екранований кабель до датчика D1.10 (ТСП-100 №5).
- Клеми 25 / 26 → Зовнішній екранований кабель до датчика D1.11 (ТСП-100 №6).
- Клеми 27 / 28 → Зовнішній екранований кабель до датчика D1.12 (ТСП-100 №7).
- Клеми 29 / 30 → Зовнішній екранований кабель до датчика D1.13 (ТСП-100 №8).
- Клеми 31 / 32 → Температурний вихід (0-10V / 4-20mA) першого датчика вологості D1.15.
- Клеми 33 / 34 → Канал вимірювання вологості (RH%) першого датчика D1.15 (EE160-НТ).
- Клеми 35 / 36 → Температурний вихід другого датчика вологості та мікроклімату D1.16.
- Клеми 37 / 38 → Канал вимірювання вологості (RH%) другого датчика D1.16 (EE160-НТ).
- Клеми 39 / 40 → Лінія підключення фінального референтного температурного датчика D1.14 (ТСП-100 №9).

Додаток Б

// ФРАГМЕНТ АЛГОРИТМУ РОБОТИ САК: АВТОМАТ СТАНІВ ТА МІЖПРОГРАМНІ БЛОКУВАННЯ

```

CASE eCurrentState OF
  S_INIT: // Стадія початкової ініціалізації та самодіагностики
    bU1_StartCmd := FALSE;
    rU2_ControlVoltage := 0.0;
    IF bSystemReady AND NOT bQF1_Fault AND NOT bQF2_Fault THEN
      eCurrentState := S_READY;
    END_IF;
  S_READY: // Режим готовності до пуску
    IF bStartPressed AND NOT bStopPressed THEN
      bU1_StartCmd := TRUE; // Першочерговий запуск вентилятора
      fbStartupTimer(IN := TRUE, PT := T#5S); // Таймер затримки на стабілізацію
      потоку повітря
      eCurrentState := S_VENTILATION_RUN;
    END_IF;
  S_VENTILATION_RUN: // Контроль розгону калорифера вентиляції
    IF bU1_RunningAndStable AND fbStartupTimer.Q THEN
      eCurrentState := S_HEATING;
    ELSIF bStopPressed OR bQF1_Fault THEN
      eCurrentState := S_FAULT;
    END_IF;
  S_HEATING: // Режим активного термодинамічного регулювання
    fbPID(IN_Setpoint := rTempSetpoint, IN_Actual := rAverageTemperature);
    rU2_ControlVoltage := fbPID.OUT_ControlValue; // Передача сигналу на
    тиристорний регулятор U2
    // Умова переходу до планового зупину або виявлення перегріву
    IF bStopPressed OR bQF1_Fault OR bQF2_Fault OR (rAverageTemperature >
    rMaxSafeTemp) THEN
      fbStartupTimer(IN := FALSE);
      eCurrentState := S_COOLDOWN;
    END_IF;
  S_COOLDOWN: // Примусове охолодження ТЕНів перед повним зупином
    rU2_ControlVoltage := 0.0; // негайне деактивування нагрівачів ЕК1-ЕК3
    fbCooldownTimer(IN := TRUE, PT := T#60S); // Продування повітрям протягом
    хвилини
    IF fbCooldownTimer.Q THEN
      bU1_StartCmd := FALSE; // Зупинка частотного інвертора U1
      fbCooldownTimer(IN := FALSE);
      eCurrentState := S_READY;
    END_IF;
  S_FAULT: // Режим аварійного блокування системи
    bU1_StartCmd := FALSE;
    rU2_ControlVoltage := 0.0;
    bAlarmIndicator := TRUE;
    IF bResetPressed AND NOT bQF1_Fault AND NOT bQF2_Fault THEN
      bAlarmIndicator := FALSE;
      eCurrentState := S_INIT;
    END_IF;
END_CASE;

```

ТАБЛИЦЯ – Параметри конфігурації аналогових каналів, адреси регістрів ПЛК
та коефіцієнти програмних фільтрів

Позначення за схемою	Технологічний параметр	Тип датчика / сигналу	Модуль розширення	Фізичний канал модуля	Адресація в EcoStruxure	Діапазон вимірювання (фізичний)	Розрядність АЦП / Цифровий код	Коефіцієнт фільтрації (альфа)	Постійна часу фільтра, с
D1.6	Температура зони нагріву 1	ТСП-100 (Pt100)	TM3TI4 (D1.2)	Channel 0	%IW1.0	-50.0...200.0 °C	16-bit / -500...2000	0.15	0.34
D1.7	Температура зони нагріву 2	ТСП-100 (Pt100)	TM3TI4 (D1.2)	Channel 1	%IW1.1	-50.0...200.0 °C	16-bit / -500...2000	0.15	0.34
D1.8	Температура зони нагріву 3	ТСП-100 (Pt100)	TM3TI4 (D1.2)	Channel 2	%IW1.2	-50.0...200.0 °C	16-bit / -500...2000	0.15	0.34
D1.9	Температура калорифера (вхід)	ТСП-100 (Pt100)	TM3TI4 (D1.2)	Channel 3	%IW1.3	-50.0...150.0 °C	16-bit / -500...1500	0.20	0.22
D1.10	Температура калорифера (вихід)	ТСП-100 (Pt100)	TM3TI4 (D1.3)	Channel 0	%IW2.0	-50.0...150.0 °C	16-bit / -500...1500	0.20	0.22
D1.11	Температура захисна ТЕНів 1	ТСП-100 (Pt100)	TM3TI4 (D1.3)	Channel 1	%IW2.1	0.0...350.0 °C	16-bit / 0...3500	0.10	0.51
D1.12	Температура захисна ТЕНів 2	ТСП-100 (Pt100)	TM3TI4 (D1.3)	Channel 2	%IW2.2	0.0...350.0 °C	16-bit / 0...3500	0.10	0.51
D1.13	Температура захисна ТЕНів 3	ТСП-100 (Pt100)	TM3TI4 (D1.3)	Channel 3	%IW2.3	0.0...350.0 °C	16-bit / 0...3500	0.10	0.51
D1.14	Температура робочої камери	ТСП-100 (Pt100)	TM3TI4 (D1.4)	Channel 0	%IW3.0	-50.0...150.0 °C	16-bit / -500...1500	0.12	0.44
D1.15	Вологість у робочій камері	EE160 (0...10 В)	TM3AM6 (D1.5)	Channel 0	%IW4.0	0.0...100.0 % RH	12-bit / 0...4095	0.08	0.69
D1.16	Температура потоку середовища	EE160 (0...10 В)	TM3AM6 (D1.5)	Channel 1	%IW4.1	0.0...50.0 °C	12-bit / 0...4095	0.15	0.34
R1	Ручне завдання температури	Потенціометр (0...10 В)	TM3AM6 (D1.5)	Channel 2	%IW4.2	10.0...80.0 °C	12-bit / 0...4095	0.30	0.14
R2	Ручне завдання продуктивності	Потенціометр (0...10 В)	TM3AM6 (D1.5)	Channel 3	%IW4.3	20.0...100.0 %	12-bit / 0...4095	0.30	0.14
U2	Керування тиристорним блоком	Сигнал струму (4...20 мА)	TM3AM6 (D1.5)	Output Channel 0	%QW4.0	0.0...100.0 %	12-bit / 0...4095	Фільтр відсутній	(Вихід)