

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і
енергозбереження**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ
Енергетики, автоматики і
енергозбереження

_____ Каплун В.В.
« ___ » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
автоматики та робототехнічних
систем ім. акад. І. І. Мартиненка

_____ Опришко О.О.
« ___ » _____ 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА
РОБОТА**

на тему «Розробка та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи
управління температури повітря у шахтній сушарці з використанням КТЗ
"Schneider Electric"»

Спеціальність 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н, доц.
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Іващук В.В.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

д-р філософії, асистент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Ромащук О.М.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Загниборода А.С.
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і
енергозбереження

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри автоматики та
робототехнічних
систем ім. акад. І. І. Мартиненка
_____ О. О. Опришко
«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

до виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту

Загнибороді Андрію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

(код і назва)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: Розробка та дослідження комп'ютерно-
інтегрованої системи управління температури повітря у шахтній сушарці з використанням
КТЗ "Schneider Electric"»

затверджена наказом ректора НУБіП України від "26" вересня 2024 р. № 1667 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.05.30.

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: Завдання кафедри на виконання
магістерської кваліфікаційної роботи. Наукова література та публікації, що відповідають
тематичі магістерської кваліфікаційної роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз технологічного процесу сушіння зернової продукції.
2. Дослідження сушарки як об'єкта автоматизації.
3. Побудова математичної моделі об'єкта керування.
4. Визначення передатних функцій та аналіз моделі за допомогою програмного забезпечення.
5. Вибір закону керування та оцінка якості роботи системи.
6. Реалізація алгоритму керування технічними засобами.
7. Розробка схем системи автоматизації.
8. Техніко-економічне обґрунтування впровадження автоматичної системи.

Дата видачі завдання "26" вересня 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Ромашук О.М.

Завдання прийняв до виконання _____ Загниборода А.С.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. Технологічна характеристика об'єкта керування	7
1.1. Характеристика об'єкта автоматизації	7
1.2. Мета і задачі автоматизації технологічного процесу сушіння зернової продукції	19
1.3. Розробка функціональної схеми автоматизації	20
РОЗДІЛ 2. Побудова та дослідження математичної моделі об'єкта управління	23
2.1. Загальний підхід до створення математичних моделей ОУ	23
2.2. Приклад розробки і використання математичної моделі ОУ із використанням програмних продуктів MathCad або Simulink MATLAB....	26
2.3. Визначення передатних функцій об'єкта управління за результатами моделювання.....	30
2.4. Аналіз результатів досліджень	32
РОЗДІЛ 3. Обґрунтування та вибір алгоритму керування об'єктом, аналіз якості функціонування автоматичних систем керування	37
3.1. Вибір закону управління	37
3.2. Оцінка якості автоматичних систем за стандартними показниками якості	38
РОЗДІЛ 4. Реалізація алгоритму керування об'єктом.....	44
4.1. Вибір технічних засобів	44
4.2. Вибір пускової апаратури	53
4.3. Вибір кабелів і проводів	56
РОЗДІЛ 5. Схеми системи автоматизації	58
5.1. Розробка електричної принципової схеми	58
5.2. Розробка схеми з'єднань	59
5.3. Розробка схеми підключення.....	61
5.4. Розробка загального вигляду щита управління	62
5.5. Забезпечення захисту від пожежі	64
РОЗДІЛ 6. Техніко-економічне обґрунтування системи автоматичного регулювання.....	66
ВИСНОВОК.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71

ВСТУП

Завданням усіх українських агентств є сприяння максимальному розвитку країни та забезпечення населення різноманітними стійкими харчовими продуктами. Досягнення цієї мети потребує прискорення темпів соціально-економічного зростання, що базується на науково-технічному прогресі, широкомасштабній інтенсифікації та підвищенні ефективності виробничих процесів. Завдяки постійному вдосконаленню науково обґрунтованих управлінських систем, впровадженню прогресивних технологій збирання врожаю та підвищенню родючості ґрунтів, обсяги виробництва зерна в Україні щорічно зростають. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває питання його збереження.

Для збереження зерна необхідно забезпечити його якісне висушування. Процес сушіння постійно вдосконалюється: розробляються новітні методи, створюються сучасні конструкції зерносушарок, а також підвищується ефективність роботи вже існуючих шахтних сушарок. Це досягається шляхом модернізації окремих вузлів і реалізації заходів, спрямованих на зменшення витрат палива й електроенергії. Сушіння є термічним процесом, що дозволяє знизити вологість матеріалу, покращити його якість, запобігти псуванню і злежуванню, зменшити масу та полегшити транспортування і зберігання. Конструкція зерносушарки визначається масштабами виробництва та особливостями матеріалу, який може сушитися під атмосферним тиском або у вакуумі, перебуваючи у статичному, динамічному або змішаному стані.

Процес сушіння може бути періодичним або безперервним і здійснюється різними способами теплопередачі: контактним, конвекційним, радіаційним, за допомогою високочастотного струму, інфрачервоного випромінювання, а також методом ліофільного сушіння. У харчовій промисловості найбільше поширення отримали провідниковий і конвекційний способи сушіння. У провідникових сушарках тепло передається через контакт матеріалу з нагрітою поверхнею, тоді як у конвекційних — безпосередньо від теплоносія

(наприклад, гарячого повітря або газу) до матеріалу. Видалення вологи, що міститься в матеріалі, відбувається під дією механічних і фізико-хімічних процесів. Проте хімічно зв'язана волога не усувається без руйнування структури матеріалу.

Сушіння можна розглядати як дифузійний процес, оскільки волога переміщується з внутрішніх шарів до поверхні завдяки дифузії, а також як тепловий процес — коли під дією тепла з поверхні матеріалу випаровується волога.

У більшості випадків для сушіння зерна як теплоносії використовують гаряче повітря або газу, що утворюються при згорянні палива. Найбільш поширеними видами сушарок у сільському господарстві є барабанні, камерні, шахтні, стрічкові, з псевдозрідженим шаром, вібраційні з псевдозрідженим шаром і розпилювальні.

Післязбиральна обробка зерна — одна з найтрудомісткіших ланок у рослинництві. Запровадження сучасних технологій обробки зерна передбачає повну механізацію всіх етапів, що, з одного боку, суттєво знижує витрати на оплату праці, але з іншого — ускладнює управління виробничими процесами.

Зернопереробні підприємства після збирання врожаю є складними об'єктами для управління, оскільки містять велику кількість технологічного обладнання, на ефективність роботи якого впливають різноманітні випадкові чинники. Працівники часто не встигають своєчасно реагувати на такі відхилення. Умови ручного керування роботою машин є малоефективними: продуктивність праці при цьому не перевищує 65–70% від номінального рівня. Спроби збільшити продуктивність без автоматизації зазвичай ведуть до погіршення якості готової продукції.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1. Характеристика об'єкта автоматизації

Технологічний процес переробки продовольчого зерна на підприємстві включає в себе низку етапів, завдяки яким забезпечується отримання продукції належної якості. Серед основних операцій — зважування вхідної сировини, попереднє очищення, вентиляція, сушіння, первинне та повторне очищення, сортування, транспортування зерна та побічних продуктів, зважування готової продукції, її переміщення, фасування, термічна обробка (стерилізація) і тривале зберігання на складах.

Тривале зберігання можливе лише для зерна з вологістю не вище 14,5–15,0%. Зерно з підвищеною вологістю є нестабільним у зберіганні, оскільки волога і тепло створюють сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів і шкідників, що викликає самонагрівання та подальше псування. Особливо небезпечно зберігати сире зерно — іноді вже на другий або третій день після надходження на зберігання в ньому починається процес самонагрівання.

Під час самонагрівання температура зерна в окремих шарах може сягати 40–50°C і навіть вище. Це значно погіршує якість зерна: воно змінює колір, набуває затхлого запаху, втрачає схожість і погіршує свої хлібопекарські та борошномельні властивості.

Основним способом збереження свіжозібраного вологого або сирого зерна є його сушіння у зерносушарках до досягнення стабільного рівня вологості. Критичні показники вологості для безпечного зберігання становлять: для пшениці, жита та ячменю — 14,5%; для вівса, рису, пшона та кукурудзи — 13,5%; для гороху та гречки — 15%.

На якість зерна після сушіння істотно впливають такі параметри, як температура його нагрівання, температура і швидкість сушіння, а також тривалість перебування в нагрітому стані. Вибір цих параметрів повинен забезпечити максимально швидке висушування з мінімальними витратами

теплової енергії та повітря при повному збереженні або покращенні якості зерна.

Передусім сушінню підлягають партії зерна з найвищим рівнем вологості, а також те зерно, яке зберігається у сховищах без обладнання для активної вентиляції.

Сушіння зерна має низку важливих переваг: воно значно покращує умови зберігання, запобігаючи самонагріванню; є ефективним засобом боротьби зі шкідниками запасів; сприяє дозріванню зерна після збирання; позитивно впливає на його якість; забезпечує раціональніше використання зерносховищ, оскільки сухе зерно можна зберігати у вищому насипу порівняно з вологим або сирим.

Потреба в сушінні під час зберігання виникає в таких випадках:

- при підвищенні температури зерна, коли немає інших можливостей уникнути самонагрівання;

- за наявності зараження шкідниками за відсутності інших засобів боротьби;

- для доведення вологості до необхідного рівня відповідно до умов зберігання.

Сушіння здійснюється у спеціалізованих зерносушарках, що є складовою технічного обладнання хлібоприймальних підприємств. Найбільш поширеними є шахтні зерносушарки, принцип дії яких базується на тепло- і вологообміні в ущільненому, нерухомому шарі зерна.

Окрім традиційних методів, останнім часом на зернопереробних підприємствах активно впроваджуються сучасні способи сушіння — у пневматичних та газорециркуляційних зерносушарках, де зерно обробляється у висхідному потоці сушильного агента.

У шахтних зерносушарках сушіння може відбуватись або за одноетапною схемою, або за диференційованим одностадійним режимом. В одностадійному процесі сушильний агент (суміш димових газів з повітрям) подається до камери нагрівання одним потоком з однаковою температурою. У

диференційованому варіанті камера розділяється на дві зони: в першій температура сушильного агента нижча, ніж у другій. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність сушіння та продуктивність сушильного обладнання.

Сушарка споживає теплову енергію (до 150 °С) та електроенергію (напругою 220/380 В), тому необхідно дотримуватись заходів безпеки, щоб уникнути опіків і ураження електричним струмом. Експлуатація обладнання повинна здійснюватись згідно з установленими правилами техніки безпеки.

Конструкція та принцип дії сушарки

Відкрита шахтна сушарка зернового типу призначена для обробки та сушіння насіння зернових, зернобобових культур, кукурудзи та інших злакових у сфері сільського господарства. Вона входить до складу зерноочисно-сушильних ліній і виконує функції приймання, транспортування та попереднього очищення зерна.

Залежно від типу використовуваного палива, сушарки можуть бути оснащені теплогенераторами, що працюють на газі, рідкому або твердому паливі. Для моделі СЗШ-20Г-1 паливом є природний газ, для СЗШ-20Ж-1 — побутова піч або дизельне паливо, а для СЗШ-20Т-1 — дрова, вугілля, торф та інші види твердого палива.

Для ефективної роботи вологість зерна, яке підлягає сушінню, не повинна перевищувати 30%, а рівень його чистоти має бути не менше 95%. Сушарка працює від змінного струму з напругою 220/380 В $\pm 10\%$ та частотою 50 Гц. Оптимальні умови експлуатації — температура навколишнього повітря від – 10 до +40 °С і відносна вологість не більше 70%.

Моделі сушарок серії СЗШ-20

Модель СЗШ-20Г-1 (рис. 1, 2, 3) оснащена пічним блоком АТГ1,6, що працює на природному газі. Сушарка СЗШ-20Ж-1 має піч АТ-1,6 для рідкого палива, а СЗШ-20Т-1 — блок ВУ-Т-1,5, що використовує тверде паливо. Усі інші конструктивні вузли в цих моделях є ідентичними.

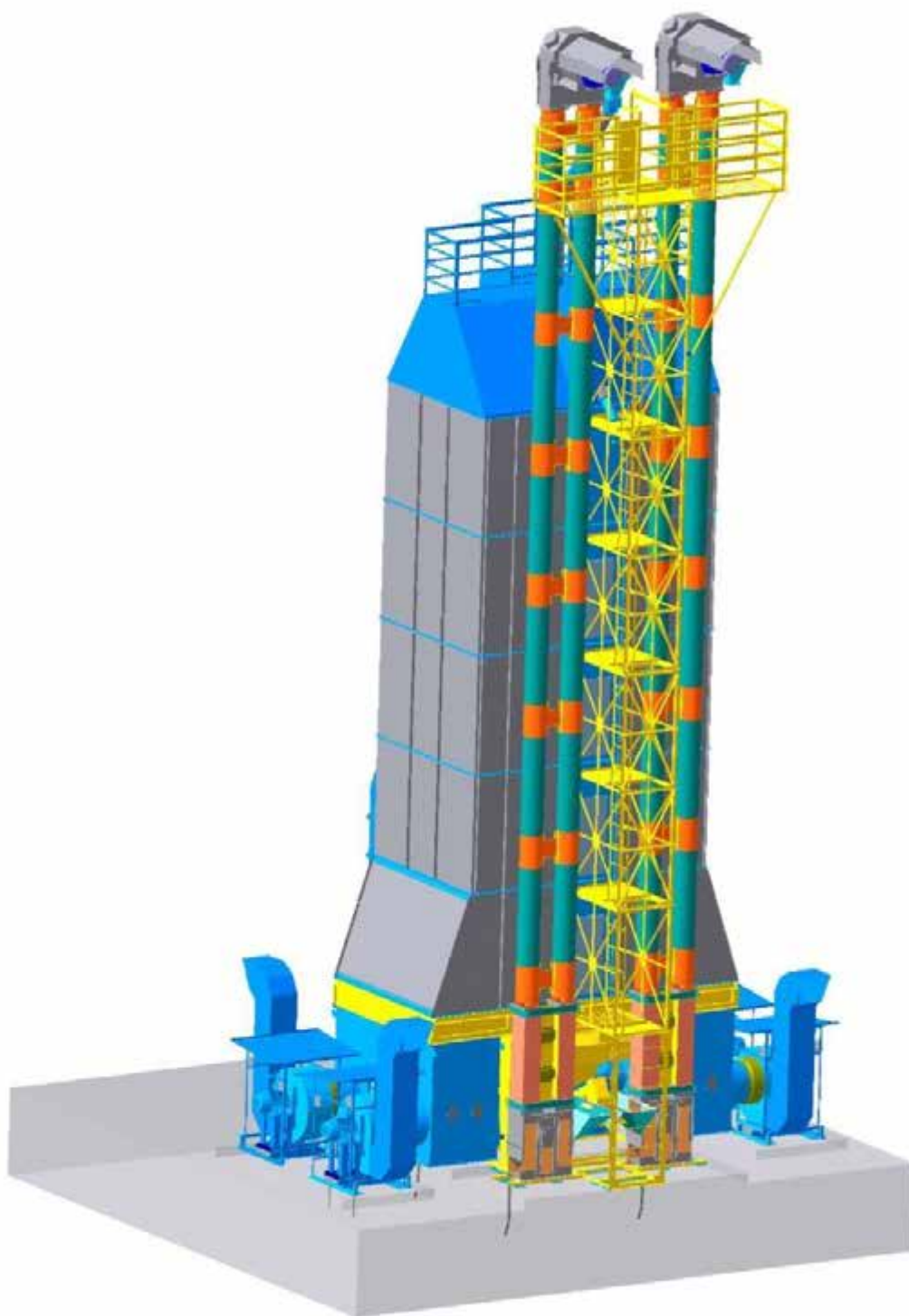


Рис. 1.1. Загальний вид сушарки (вид спереду)

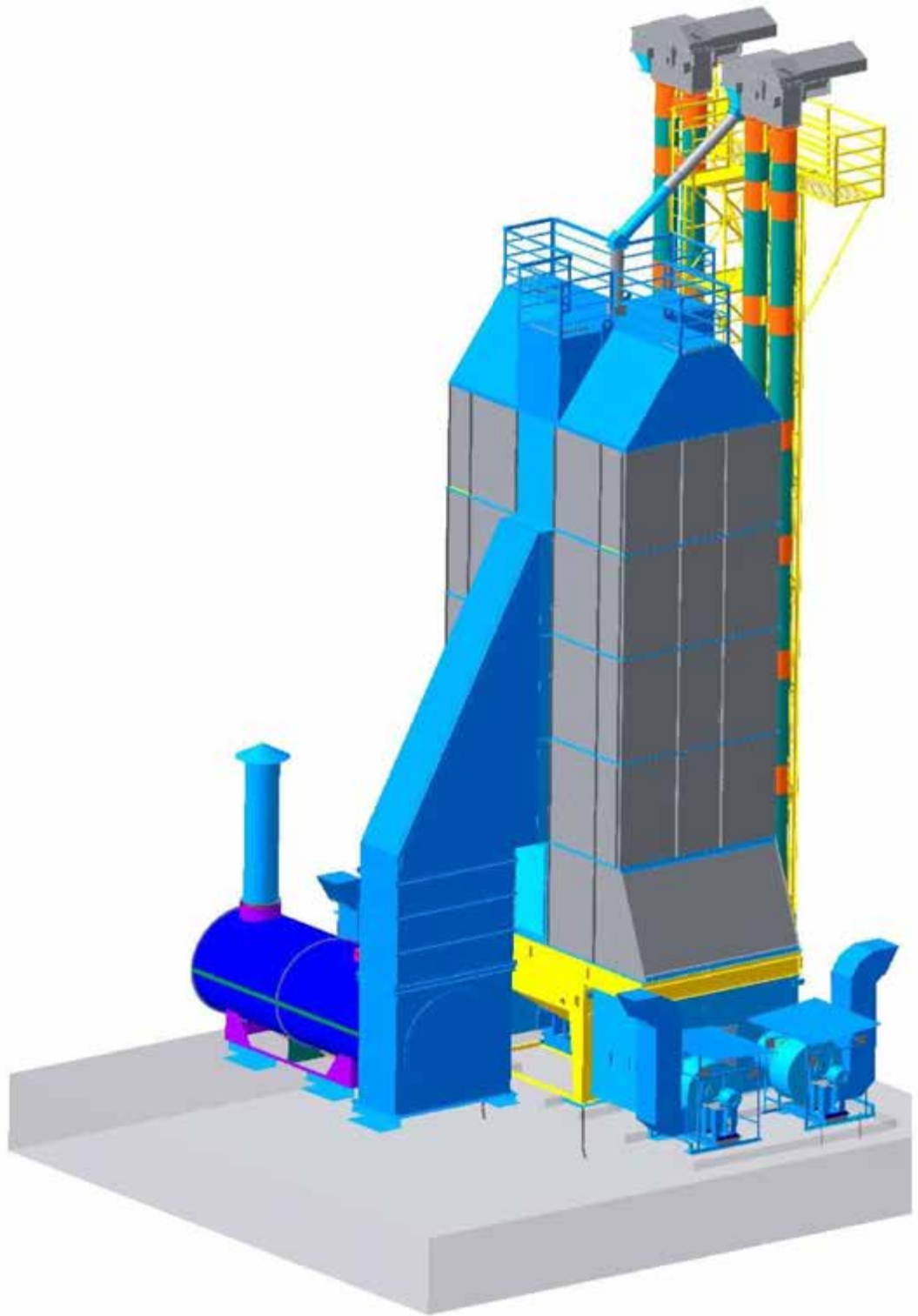


Рис. 1.2. Загальний вид сушарки (вид збоку)

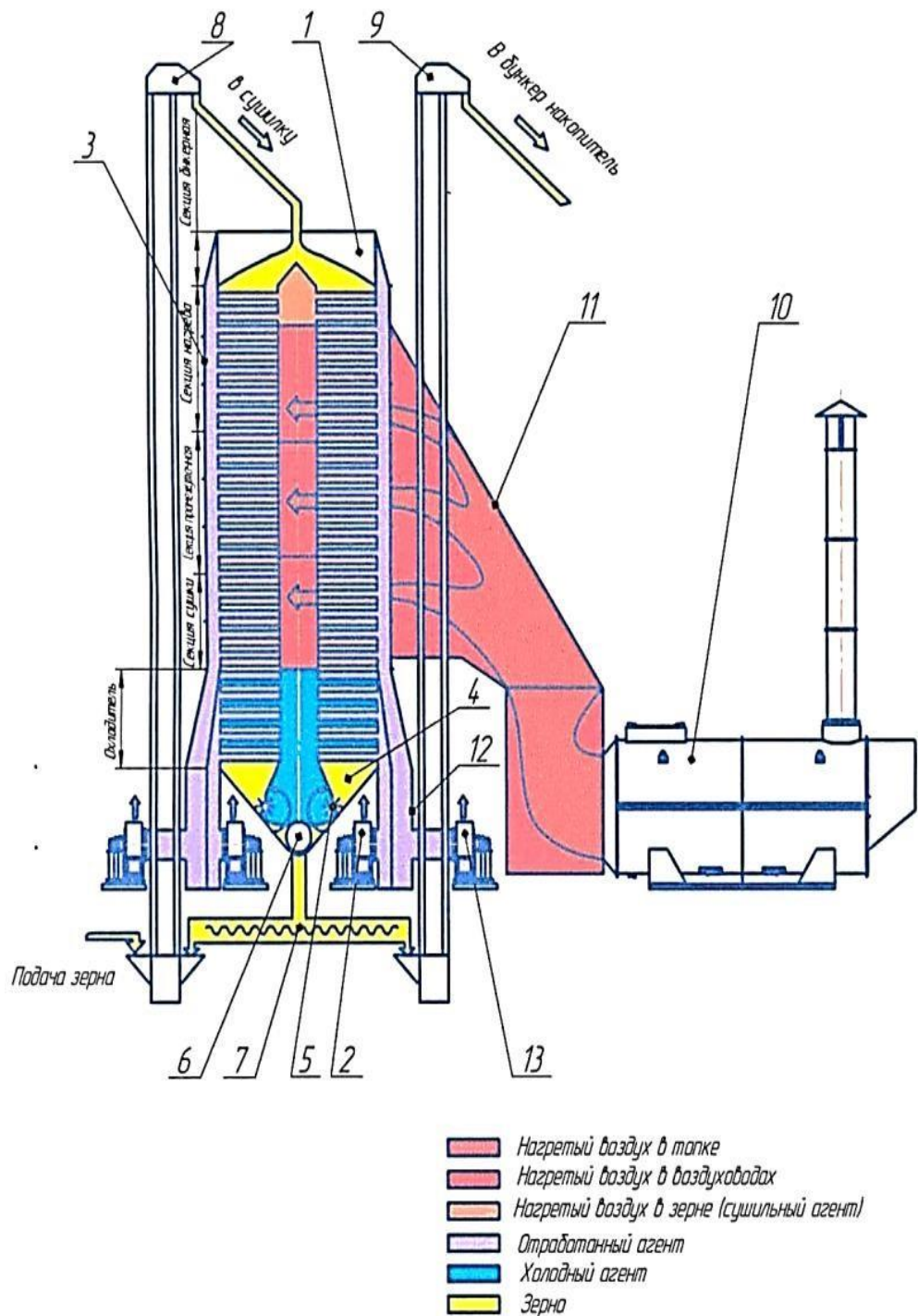


Рис. 1.3. Принципова конструктивно-технологічна схема сушарки СЗШ-20-1: 1 - надсушильний бункер; 2, 13 - витяжні вентилятори; 3 - сушильні модулі; 4 - підсушильний бункер; 5 - роторний вивантажний привід; 6 - гвинтовий конвеєр; 7 - реверсивний перемикач потоків зерна; 8 - завантажувальний норія; 9 - розвантажувальна норія; 10 - топковий блок; 11 - система подачі агента сушіння; 12 - повітропровід

До складу сушарки (рис. 1.3) входять:

- Суперсушильний бункер (1) оснащений зернорозподільником у шахтах, датчиками рівня наповнення та механізмом відведення зерна.
- Два вертикально з'єднані вали, що утворюють сушильну колону, складаються з модульних елементів (3), поділених на нагрівальну, сушильну, проміжну та охолоджувальну зони.
- Подавальні та напірні коробки встановлені в одному горизонтальному ряду, чергуючись між собою.
- Опорна секція обладнана витяжними вентиляторами (13), з'єднана з чотирма повітроводами сушильної секції та двома вентиляторами, що обслуговують зону охолодження. До неї також належать сушильний бункер (4), два поворотних розвантажувальних механізми (5), гвинтовий транспортер (6) і реверсивний перемикач потоку зерна (7).
- Присутні системи для завантаження зерна за допомогою норії (8) та розвантаження через зернопроводи (9).
- Пічний блок може бути виконаний у трьох варіантах: АТГ-1,6 (газовий), АТ-1,6 (на рідкому паливі) або ВУ-Т-1,5 (твердопаливний) (10).
- Система подачі та розподілу сушильного агента (11) працює у зв'язці з повітроводами (12).
- Сушарка обладнана електроприводами, включаючи приводи витяжних механізмів з можливістю регулювання продуктивності.
- Система автоматизованого контролю та управління здійснює моніторинг температури агента сушіння, нагріву зерна, рівня заповнення бункера, запуск і керування піччю. Також передбачено світлову та звукову сигналізацію.

Норії типу NCK-1-40 (однопоточні, трубчасті) використовуються для подачі вологого зерна до сушарки, його транспортування в режимі "сушарка на сушарці" та вивантаження вже висушеного зерна. До складу конструкції входять завантажувальні та розвантажувальні головки, ковшові та круглі ремені, секції для обслуговування і проміжні приводи. Зерно подається в

приймальний лоток нижньої головки, підхоплюється ковшами, транспортується вгору, де вивантажується в передбачене місце, після чого рухається напірною трубою до наступного етапу.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики сушарок СЗШ-20

Показник	Сушарка з топковим агрегатом		
	СЗШ-20Г-1 АТГ-1,6	СЗШ-20Ж-1 АТ-1,6	СЗШ-20Т-1 ВУ-Т-1,5
1	2	3	4
Тип	шахтна	модульна	відкритого виконання
Продуктивність по сирому зерну пшениці при зниженні вологості з 20 до 14 %, т/год	20		
Допустимі відхилення продуктивності, %	від плюс 10 до мінус 5		
Теплова потужність, кВт		1600	1500
Вид палива	Природний газ	Дизельне паливо	Тверде паливо
Витрата палива номінальний:			
-природний газ (ОНР = 8500 ккал/ч), м ³ /ч	180	—	—
-лічне побутове (ОНР = 9800 ккал/ч), кг/год		156	—
- тверде паливо (ОНР = 5000 ккал/ч), кг/год	—	—	500
Питома витрата палива, м ³ /т (кг/т), не більше	9,0	7,8	25
Інтервал регулювання температури теплоносія, °С	40 - 120		40 - 80
Встановлена сумарна електрична потужність електродвигунів, кВт, не більше		121,0	128,0
Напруга електричної мережі, фазне / лінійне, В	220/380		
Питома витрата електроенергії, кВт год/т, не більше		6,1	6,4
Сумарна виробнича потужність витяжних вентиляторів, м ³ /год, не більше	136000		
Нерівномірність сушки, %	±2,5		

1	2	3	4
Нерівномірність нагрівання зерна, °С			
-фуражного	±7		
-насінного	±5		
Дроблення зерна, %, не більше	0,25		
Витрата тепла на 1 кг випаруваної вологи, кДж/кг, не більше	4350		
Габаритні розміри, мм:			
довжина (включаючи норії)	14300		18500
ширина	13900		13900
висота (по конику норій)	21750		21750
Маса (без комплекту закладних частин), кг, не більше	26000		35500
Напрацювання на відмову, год, не менше	800		
Термін служби до списання, років	10		
Коефіцієнт готовності з операційного часу, не менше	0,99		
Коефіцієнт надійності технологічного процесу, не менше	0,98		
Питома сумарна трудомісткість технічного обслуговування, чол./год, не більше	9 0,02		
Ресурс до списання, год	8000		
Щоденний операційний час ТО, год.	0,15		

Пічний агрегат.

Для сушарок моделей СЗШ-20Г-1 та СЗШ-20Ж-1 використовуються пічні блоки, які працюють відповідно на газоподібному та рідкому паливі. У свою чергу, сушарка СЗШ-20Г-1 комплектується піччю, що працює на твердому паливі.

До складу блоку згоряння входять камера згоряння з пальником, теплообмінник, запобіжний клапан, блок автоматичного запуску та керування пальником. Пічний блок є повністю автоматизованим і має окрему систему керування. Його робота електрично пов'язана з витяжними вентиляторами —

запуск печі можливий лише після ввімкнення вентиляторів 2 і 13 та після 3–5-хвилинної продувки внутрішніх камер. Необхідна температура сушильного агента задається на контролері МТ-2141 і підтримується автоматично.

Пічний агрегат постачається як окремий комплект обладнання. Детальна інформація щодо його конструкції, експлуатації, техобслуговування та гарантійних умов міститься в технічній документації.

Система повітрообміну включає в себе вентилятори та димовідвідні канали. Вона поділена на два окремі контури: один відповідає за нагрів та сушіння зерна, інший — за його охолодження. Відпрацьоване повітря виводиться назовні. У системі застосовуються радіальні вентилятори типу ВЦ14-46-8 (ВР 280-46-8) і ВЦ14-46-5 (ВР-280-46-5). Чотири з них підключені до повітропроводів, що обслуговують нагрівальну та сушильну секції, ще два — до повітропроводів охолоджувального відсіку. З'єднання пічного блоку з сушаркою здійснюється через систему повітропроводів.

У нижній частині повітропроводів передбачені сервісні дверцята, а на стіні встановлені сходи для доступу обслуговуючого персоналу під час ремонту або технічного обслуговування.

Нагрітий до встановленої температури сушильний агент подається вентиляторами через систему повітропроводів, проходячи далі по секціях сушарки — нагрівальній, проміжній, сушильній та охолоджувальній.

Опорна секція складається з чотирьох вертикальних стійок, об'єднаних у єдину раму. Вона включає бункер, випускні затвори, розвантажувальний шнек, вентилятори, осадкові жалюзі та приводний механізм. На виході шнека встановлено реверсивний перемикач, що дозволяє змінювати напрямок потоку зерна. Опорна секція виконує роль основної опори для всієї сушильної конструкції.

З обох боків до опорної секції приєднані повітроводи, які звернувшись з'єднуються з каналами сушильних секцій, а знизу підключені до входів вентиляторів. У центральній частині секції розміщено сушильний бункер, який поділений на окремі відсіки. Дно бункера обладнане випускними

затворами та кожухом шнека. Внутрішні схили відсіків формують простір над шнеком, через який надходить атмосферне повітря до охолоджувального відділення. Верхня частина цих відсіків з'єднана з нижнім модулем охолоджувача й заповнюється зерном.

Приводна система витяжних пристроїв складається з електродвигуна, ремінної передачі, черв'ячного редуктора та ланцюгового приводу, що обертає зірочки на валу стулок. Керування продуктивністю сушарки здійснюється через вмикання та вимикання двигуна. Шнек приводиться в дію окремим електродвигуном через постійну ланцюгову передачу.

Електрообладнання включає загальний пульт керування сушильною лінією, датчики рівня зерна, електродвигуни, сигналізаційний дзвінок, а також терморегулятор типу МТ-2141. Пульт управління оснащений пускачами, кнопками, елементами захисту та іншим обладнанням для керування як основними вузлами зерносушарки, так і допоміжними машинами всієї технологічної лінії.

У пульті також розміщено регулятор витяжних пристроїв, який забезпечує зміну частоти обертання відповідного електродвигуна. Чим вища частота, встановлена на панелі частотного перетворювача (від «мін» до «макс»), тим швидше обертається двигун.

У контексті системи керування сушаркою (див. рис. 1.4) основними вихідними параметрами виступають:

- Кінцева вологість зерна W_k .
- Температуру нагрівання зерна θ_z .
- Температура агенту сушіння що виводиться з сушарки t_2 .
- Рівень зерна в завантажувальному бункері над сушаркою H .
- Збурення об'єкта, що подається в сушарку W_n .
- Температура вологості зерна θ_n .
- Температура навколишнього повітря θ_{nz} .
- Відносна вологість навколишнього повітря ϕ .
- Параметр який характеризує чистоту та об'ємну масу зерна k_z .

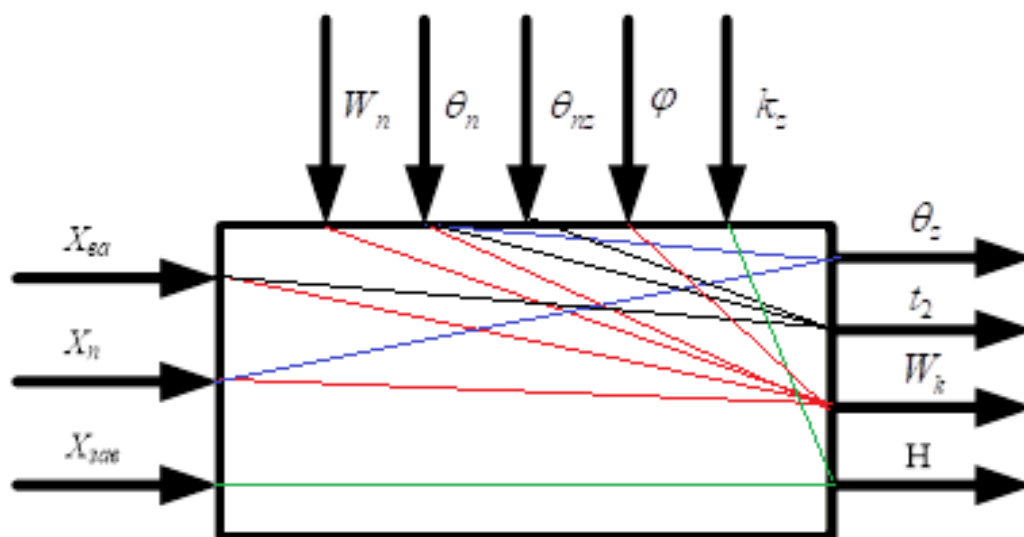


Рис. 1.4. Схема сушарки, як об'єкта управління

У сучасних зерносушарках можливості керування обмежуються такими основними діями:

Регулювання положення виконавчого механізму випускного апарата ($X_{ва}$), що впливає на продуктивність сушарки (Q);

Зміна подачі палива до камери згоряння (X_n);

Регулювання подачі зерна до шахтної сушарки ($X_{зав}$).

Аналізуючи функціонування зерносушарки як об'єкта керування, важливо забезпечити оптимальне управління її роботою з урахуванням встановлених меж: температури охолоджуючого повітря (t) та кінцевої вологості висушеного зерна (W_k). При цьому слід дотримуватися обмежень, зокрема не допускати перевищення максимально допустимої температури нагрівання зерна, що визначає межу температури повітря, що подається.

Крім контролю самого процесу сушіння, оператор повинен також слідкувати за додатковими операціями: запуском печі теплогенератора, контролем заповнення приймального бункера зерном, а також оперативно реагувати на аварійні ситуації, зокрема гасити полум'я у печі при його виникненні.

1.2. Мета і задачі автоматизації технологічного процесу сушіння зернової продукції

Щоб підвищити ефективність сушіння та зберегти якість зерна, необхідно ретельно контролювати його температуру та вологість під час нагрівання. Це дозволяє уникнути перегріву, пересушування або, навпаки, недостатнього висушування. Однак контроль цих параметрів у реальному часі є складним, а іноді — і неможливим.

Зазвичай вологість і температура зерна вимірюються лише на початку та в кінці сушильного процесу. Температура зерна в зоні максимального нагрівання контролюється лише на певних типах сушарок: наприклад, у газових рециркуляційних моделях її визначають у теплообмінниках. У шахтних зерносушарках дистанційний контроль, як правило, відсутній, а ручний відбір проб із шахтних каналів є технічно складним.

Також ускладнення виникають через неточності показань датчиків: термочутливі елементи можуть бути впливати не лише зерном, а й потоком сушильного чи охолоджувального повітря, яке має іншу температуру. Щодо вологості, то її можливо визначити з належною точністю лише у відібраній пробі зерна.

Одним із традиційних напрямів удосконалення сушіння є створення безперервних пристроїв для відбору проб і контролю висоти зернового шару (наприклад, у сушарці СЗШ-20Г). Проте такі прилади мають складну конструкцію, потребують індивідуального калібрування та чутливі до умов роботи — зокрема, до щільності, засміченості та швидкості потоку зерна.

Альтернативний підхід полягає у визначенні вологості та температури зерна опосередковано — за параметрами відпрацьованого сушильного агента (ВАС), зокрема його температурою та відносною вологістю. Для цього використовуються компактні й надійні промислові датчики. Такий підхід є простим і зручним для впровадження в системи контролю та автоматизації сушіння.

Контроль характеристик ВАС має важливе значення, оскільки вони можуть служити індикаторами ефективності процесу. Втрати тепла з ВАС у шахтних сушарках нині можуть досягати 15–20%. Тому моніторинг температури та відносної вологості ВАС на виході із сушарки дозволяє оптимізувати процес сушіння, зменшити енергоспоживання та підвищити загальну продуктивність.

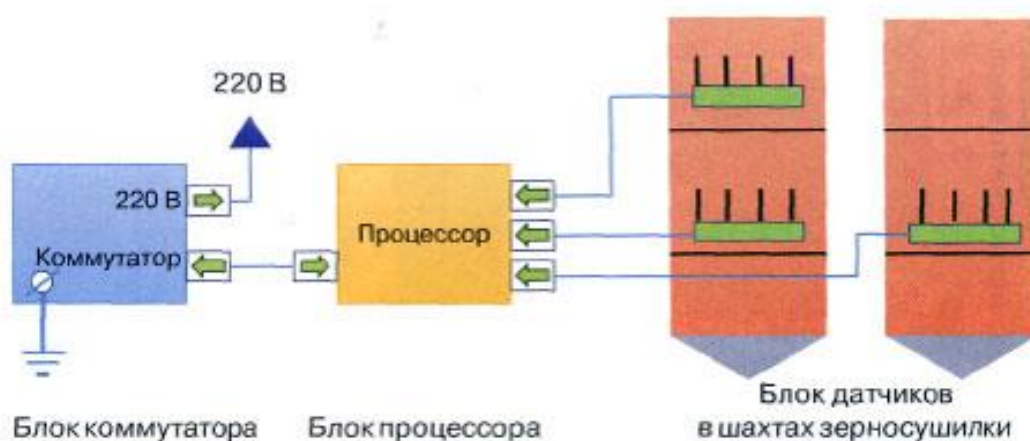


Рис. 1.5. Загальна електрична схема системи контролю температури ОАС моделі СКТ-50/1

1.3. Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматики є ключовим проектним документом, що визначає структуру і рівень автоматизації технологічного процесу конкретного об'єкта. Вона відображає технологічне обладнання, засоби зв'язку, управління, пристрої та засоби автоматизації за допомогою стандартних графічних символів, показуючи їх взаємозв'язки, а також супроводжується таблицями символів і необхідними поясненнями.

Графічно функціональну схему можна поділити на дві зони: верхню та нижню. У верхній частині розміщується технологічна схема, а в нижній — умовні позначення, які ілюструють розташування локальних пристроїв, щитів, панелей і пунктів управління. Графічні символи пристроїв і засобів автоматизації, їхні розміри і буквені позначення мають відповідати стандарту ГОСТ 21.404-85 СПДС «Автоматизація технологічних процесів. Умовні позначення пристроїв та засобів автоматизації в схемах».

На функціональних схемах пристрої та засоби автоматизації показуються детально: кожен окремий прилад чи блок, що входить до складу системи, відображається своїм умовним графічним символом. У верхній частині таких символів (круги) зазначається вимірюване значення та функція приладу у порядку їх розташування зліва направо. У нижній частині розміщується позиційне позначення вимірювального набору або окремих його компонентів.

Функціональні складові продукту включають:

Елемент ланцюга — це складова частина ланцюга, що виконує певну функцію у виробі і не може бути поділена на менші частини з окремими значеннями та власними символами.

Пристрій — це об'єднання кількох компонентів, які формують єдину структурну одиницю.

Функціональна група — це сукупність елементів, які виконують певні функції у виробі, але не об'єднані в єдину структуру.

Функціональне коло — комплекс елементів, функціональних груп і пристроїв, пов'язаних між собою лініями, які утворюють канал для досягнення певної мети.

Вимоги до проектування

Немає окремого стандарту для зображення звичайних графічних символів, які застосовуються у функціональних схемах. Існують лише загальні вимоги, закріплені у проектній або технічній документації, а також у ГОСТ 2.702–2011 «Єдина система проектної документації. Правила виконання електричних схем».

Функціональна схема демонструє процеси, що відбуваються в кожному функціональному контурі виробу окремо або у виробі загалом. Порівняно зі структурною схемою, вона більш детально розкриває функції кожного елемента чи пристрою.

На схемі представлені всі функціональні частини виробу та основні зв'язки між ними.

Можливе об'єднання функціональних компонентів у функціональні групи, які на схемі виділяються пунктирними лініями. Кожна така група отримує власне позначення.

Функціональна схема системи автоматичного регулювання вологості зерна у шахтній зерносушарці наведена на рисунку 1.6.

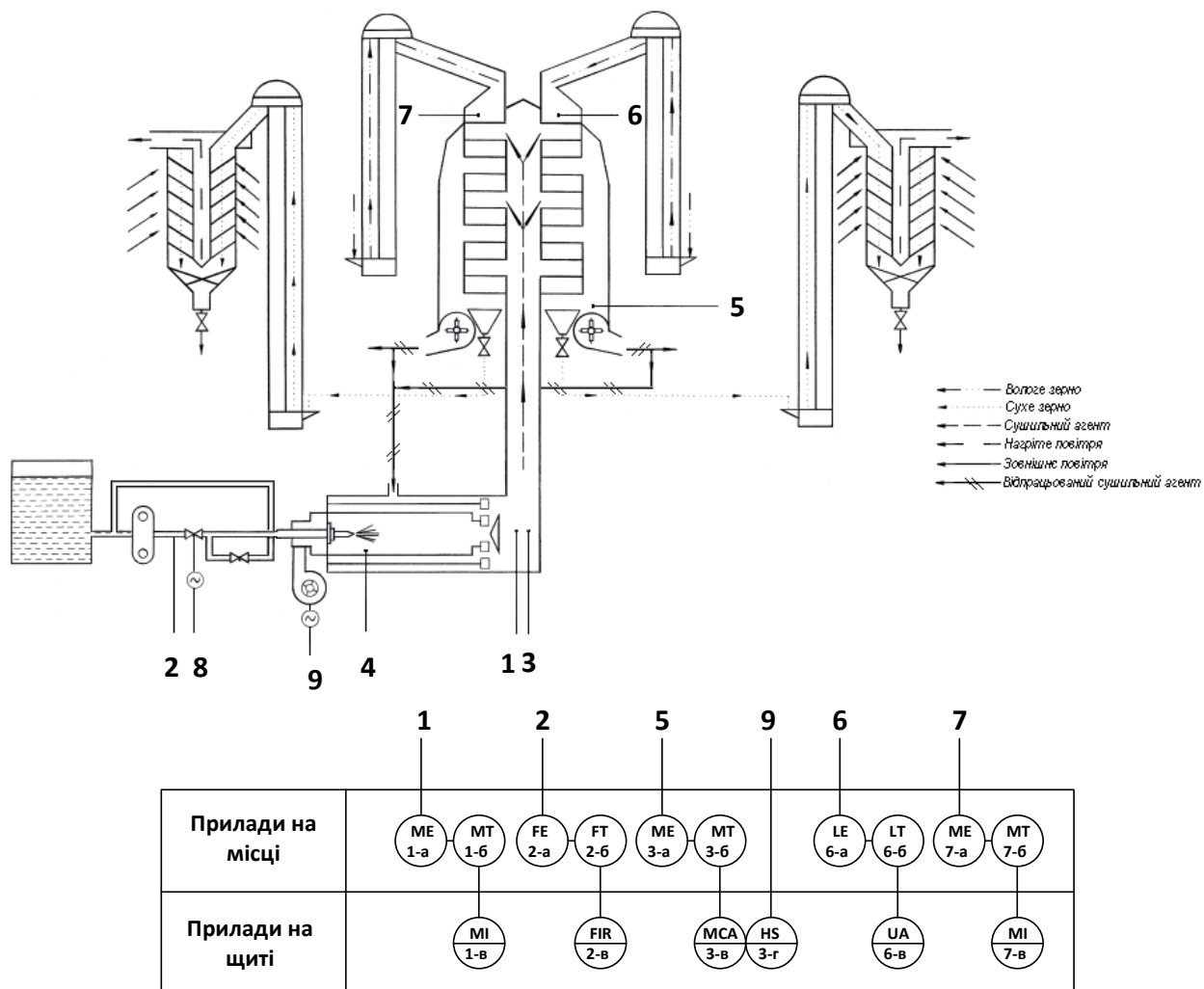


Рис. 1.6. Функціональна схема САК системи регулювання вологості зерна у шахтній зерносушарці

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

2.1. Загальний підхід до створення математичних моделей ОУ

На сьогодні існує велика різноманітність конструкцій зерносушарок і оброблюваних у них зернових продуктів. Багато обладнання все ще можна віднести до кількох основних типів. Наприклад, це можуть бути проточні місткості або пристрої з прямотечією чи протитечією, які утворюють рухомий щільний шар зерна, через який проходить сушильний агент.

Простіші фізичні моделі процесу найчастіше використовують для імітації теплопередачі та масообміну в шарах зерна. Як базова фізична модель приймається наступна схема: вода з вологого зерна випаровується за законом Дальтона, що описує випаровування з вільної поверхні (у нашому випадку зерно розглядається як частина геометричної поверхні). Тепло- і вологообмін між окремими зернами практично не враховується, спостерігається лише взаємодія між зерном і сушильним агентом. Вологе та сухе зерно в межах шару мають однакову температуру, а теплообмін із зовнішнім середовищем відсутній. Головним рушієм масообміну є різниця парціального тиску між поверхнею зерна та сушильним агентом, тоді як рушійною силою конвективної теплопередачі є різниця температур між зерном і теплоносієм.

Нестаціонарний процес передачі тепла і маси під час сушіння зерна можна описати диференціальними рівняннями матеріального та теплового балансу, а також матеріального балансу на виході сушильної установки за такою схемою:

$$m_T C_p \frac{dt}{d\tau} = Q_{T1} - Q_{T2} - Q_{T-3} \quad (2.1)$$

$$m_3 C_3 \frac{d\theta}{d\tau} = Q_{31} - Q_{32} + Q_{T-3} - Q_{\text{вин}} \quad (2.2)$$

$$m_T \frac{dd}{d\tau} = W_{T1} - W_{T2} + W_{\text{вип}} \quad (2.3)$$

$$m_{O3} \frac{dU}{d\tau} = W_{31} - W_{32} - W_{\text{вип}} \quad (2.4)$$

Де m_T - маса сушильного агента, m_3 - маса зерна, m_{O3} - маса сухого зерна, що знаходиться в камерісушіння, кг;

C_p - питома теплоємність теплоносія Дж/кг.°С;

C_3 - питома теплоємність зерна Дж/кг.°С;

t – температура теплоносія °С;

θ - температура зерна °С;

τ - час, с;

Q_{T-3} - кількість теплоти, що передається від теплоносія зерну за одиницю часу, Вт;

Q_{T1}, Q_{T2} - кількість теплоти, що за одиницю часу виводиться із шахти, Вт;

$Q_{\text{вип}}$ - кількість теплоти, яка витрачається за одиницю часу під час випаровування вологи;

W_{T1}, W_{T2} - кількість вологи, що подається до сушарки та виводиться з відпрацьованим теплоносієм, кг/с;

W_{31}, W_{32} - кількість вологи, що за одиницю часу вноситься і виводиться із сушарки з зерном, кг/с;

$W_{\text{вип}}$ - кількість вологи, яка за одиницю часу випаровується з зерна, кг/с.

Ці складові рівняння (2.1) – (2.4) визначаються простим співвіднесеннями і відомими рівняннями масообміну та теплообміну:

$$Q_{T1} = G_T C_p t_1 \quad (2.5)$$

$$Q_{T2} = G_T C_p t \quad (2.6)$$

$$Q_{31} = G_3 C_3 \theta_1 \quad (2.7)$$

$$Q_{32} = G_3 C_3 \theta \quad (2.8)$$

$$Q_{T-3} = \alpha \cdot f(\bar{t} - \bar{\theta}) \quad (2.9)$$

$$Q_{\text{вум}} = r \cdot \beta \cdot f'(P''(\bar{\theta}) - P_T(\bar{d})) \quad (2.10)$$

$$W_{T1} = G_T \cdot d_1 \quad (2.11)$$

$$W_{T2} = G_T \cdot d \quad (2.12)$$

$$W_{31} = G_0 \cdot U_1 \quad (2.13)$$

$$W_{32} = G_0 \cdot U_2 \quad (2.14)$$

$$W_{\text{вум}} = \beta \cdot f'(P''(\bar{\theta}) - P_T(\bar{d})) \quad (2.15)$$

$$\bar{t} = 0,5(t_1 + t) \quad (2.16)$$

$$\bar{d} = 0,5(d_1 + d) \quad (2.17)$$

$$\bar{\theta} = 0,5(\theta_1 + \theta) \quad (2.18)$$

де t_1, θ_1, d_1, U_1 - параметри процесу на вході в сушарку;

G_0, G_3, G_T - витрати абсолютно сухого зерна, волого зерна та теплоносія відповідно, кг/с;

α - коефіцієнт теплообміну, Вт/м²·°С.;

β - коефіцієнт масообміну, кг/с·м²·Па;

f, f' - повна поверхня зерна і «змочена», м²;

r – теплота пароутворення, Дж/кг;

$$P''(\theta) = a\theta + C \quad (2.19)$$

P'' - тиск насиченої пари, при температурі поверхні зерна θ ;

$$P_T(d) = b \cdot d \quad (2.20)$$

P_T – парціальний тиск пари в сушильному агенті, Па;

a, b, c – коефіцієнти лінійної апроксимації.

2.2. Приклад розробки і використання математичної моделі ОУ із використанням програмних продуктів MathCad або Simulink MATLAB

Підставивши формули (2.5 – 2.18) в рівняння (2.1 - 2.4), після того здійснивши всі необхідні перетворення, у нас виходить система рівнянь, яка описує динамічні режими сушарки:

$$m_T C_T \frac{dt}{d\tau} = G_T C_T t_1 - (G_T C_T + \alpha f) t + \alpha f \theta \quad (2.21)$$

$$m_3 C_3 \frac{d\theta}{d\tau} = G_3 C_3 \theta_1 - (G_3 C_3 + f + r\beta \cdot f' a) \theta + \alpha f t + r\beta f' b \cdot d - r\beta f' c \quad (2.22)$$

$$m_T \frac{dd}{d\tau} = G_T d_1 - (G_T + \beta \cdot f' b) d + \beta f' a \theta - \beta f' \cdot c \quad (2.23)$$

$$m_{O3} \frac{dU}{d\tau} = G_{30} U_1 - G_{30} U - \beta \cdot f' a \theta + \beta f' b d - \beta f' c \quad (2.24)$$

Змінні параметри об'єкту моделювання залишаємо у вигляді суми сталих значень (X_0) і їх приросту (ΔX):

$$t_1 = t_{10} + \Delta t_1 \quad (2.25)$$

$$t = t_0 + \Delta t \quad (2.26)$$

$$\theta_1 = \theta_{10} + \Delta \theta_1 \quad (2.27)$$

$$\theta = \theta_0 + \Delta \theta \quad (2.28)$$

$$G_T = G_{10} + \Delta G_T \quad (2.29)$$

$$G_3 = G_{30} + \Delta G_3 \quad (2.30)$$

$$U_1 = U_{10} + \Delta U_1 \quad (2.31)$$

$$U = U_0 + \Delta U \quad (2.32)$$

$$d_1 = d_{10} + \Delta d_1 \quad (2.33)$$

$$d = d_0 + \Delta d \quad (2.34)$$

Підставивши змінні в рівняння (2.21 – 2.24), і виконавши віднімання та множення рівнянь статики (рівняння (2.21 – 2.24) при $dt/dT=d\theta/dT=dd/dT=dU/dT=0$) та ігноруючи члени високого ступеня малосності отримаємо систему лінійних диференційних рівнянь у приростах, для нестандартних режимів роботи сушарки:

$$m_T C_T \frac{d\Delta t}{d\tau} = G_T C_T \Delta t_1 - (G_T t_1 - C_T t) \Delta G_T - (G_T C_T + \alpha f) \Delta t + \alpha f \Delta \theta_1, \quad (2.35)$$

$$m_3 C_3 \frac{d\Delta \theta}{d\tau} = G_3 C_3 \Delta \theta_1 - (G_3 \theta_1 - C_3 \theta) \Delta G_3 - (G_3 C_3 + \alpha f + r f' \beta a) \Delta \theta + f + r \beta \cdot f' a \theta + \alpha f \Delta t + r \beta f' b \cdot \Delta d, \quad (2.36)$$

$$m_T \frac{d\Delta d}{d\tau} = G_T \Delta d_1 + (d_1 - d) \Delta G_T - (G_T + \beta \cdot f' b) \Delta d + \beta f' a \Delta \theta, \quad (2.37)$$

$$m_{O3} \frac{d\Delta U}{d\tau} = G_{30} \Delta U_1 + (U_1 - U_2) \Delta G_{O3C} - G_{O3} \Delta U + \beta \cdot f' a \Delta \theta + \beta f' b \Delta d, \quad (2.38)$$

Розв'язання цієї системи рівнянь з отриманням однозначного результату можна здійснити за допомогою чисельних методів на ЕОМ або у вигляді передаточних функцій.

Для аналізу динамічних і статичних характеристик, а також для побудови передаточних функцій, буде використано програмне забезпечення MathCad.

The screenshot shows the MathCad software interface with the following content:

$\Theta_{20} := 15$ $Gz := 2.7$ $\Theta := 15$
 $mv := 20$ $Gv := 8.7$ $\Theta_0 := 15$
 $Cp := 1050$ $f := 10000$ $U_0 := 0.25$
 $mz := 6600$ $\alpha := 10$ $U_k := 0.16$
 $Cz := 2300$ $\tau := 0, 1.. 10000$ $t_1 := 120$
 $Rb := 3.39$ $t_{20} := 120$ $r_0 := 2500-1000$

$T1 := \frac{mz \cdot Cz}{\alpha \cdot f} \cdot \left(1 + \frac{1}{Rb} \right)$ $T1 = 196.579$ $T2 := \frac{mv \cdot Cp}{\alpha \cdot f}$ $T2 = 0.21$

$a1 := 1 + \frac{2Gz \cdot Cz}{\alpha \cdot f}$ $a1 = 1.124$ $a2 := 1 + \frac{2Gv \cdot Cp}{\alpha \cdot f}$ $a2 = 1.183$

$b1 := t_1 + \left(\frac{2Gz \cdot Cz}{\alpha \cdot f} - 1 \right) \cdot \Theta$ $b1 = 106.863$

$b2 := \Theta + \left(\frac{2Gv \cdot Cp}{\alpha \cdot f} - 1 \right) \cdot t_1$ $b2 = -83.076$

$A := T1 \cdot T2$ $A = 41.282$

$B := a1 \cdot T2 + a2 \cdot T1$ $B = 232.73$

$C := a1 \cdot a2 - 1$ $C = 0.33$

$$\begin{aligned}
 D1 &:= b2 + a2 \cdot b1 & D1 &= 43.311 \\
 D2 &:= b1 + a1 \cdot b2 & D2 &= 13.469 \\
 r1 &:= \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A \cdot C}}{2 \cdot A} & r1 &= -1.417 \times 10^{-3} \\
 r2 &:= \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A \cdot C}}{2 \cdot A} & r2 &= -5.636 \\
 \theta_2(\tau) &:= \frac{\theta_{20} \cdot C - D1}{C \cdot (r1 - r2)} \cdot (r1 \cdot e^{r2 \cdot \tau} - r2 \cdot e^{r1 \cdot \tau}) + \frac{D1}{C} \\
 t_2(\tau) &:= \frac{t_{20} \cdot C - D2}{C \cdot (r1 - r2)} \cdot (r1 \cdot e^{r2 \cdot \tau} - r2 \cdot e^{r1 \cdot \tau}) + \frac{D2}{C} \\
 U_2(\tau) &:= U_0 + \frac{Cz(\theta_{20} \cdot C - D1)}{r_0 \cdot C \cdot Rb} \left[1 - \frac{1}{r1 - r2} \cdot (r1 \cdot e^{r2 \cdot \tau} - r2 \cdot e^{r1 \cdot \tau}) \right]
 \end{aligned}$$

Рис 2.1. Знімок екрану розрахунків з Mathcad

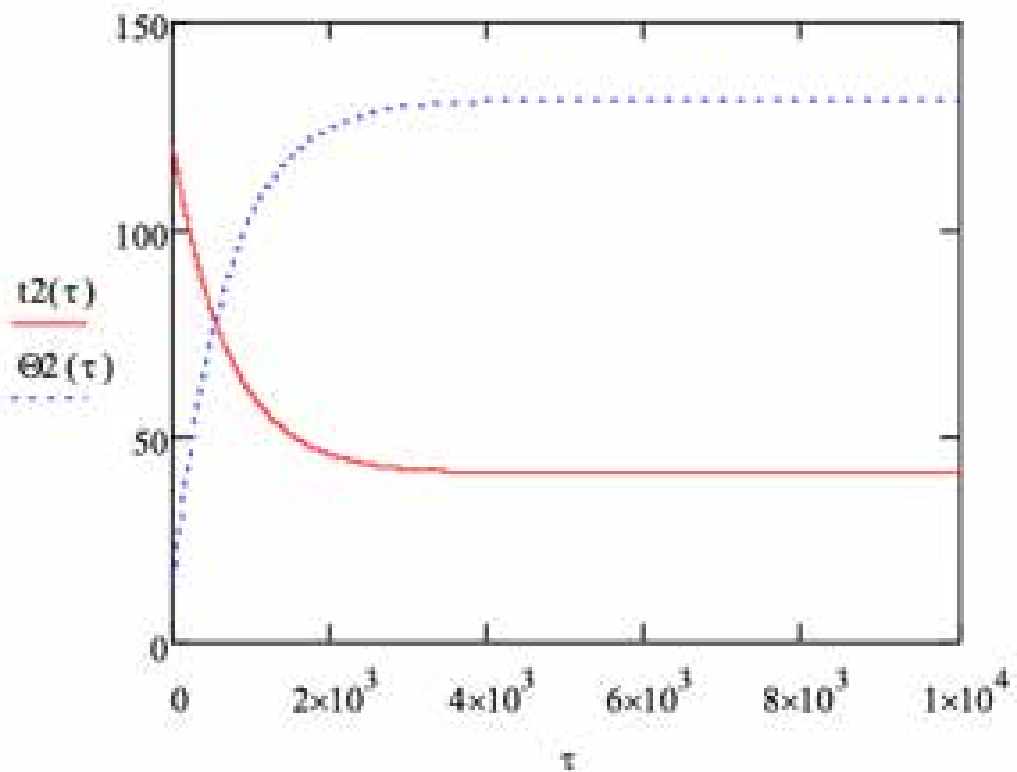


Рис 2.2. Графік залежності температури теплоносія t_2 і температури зерна θ_2 від часу τ

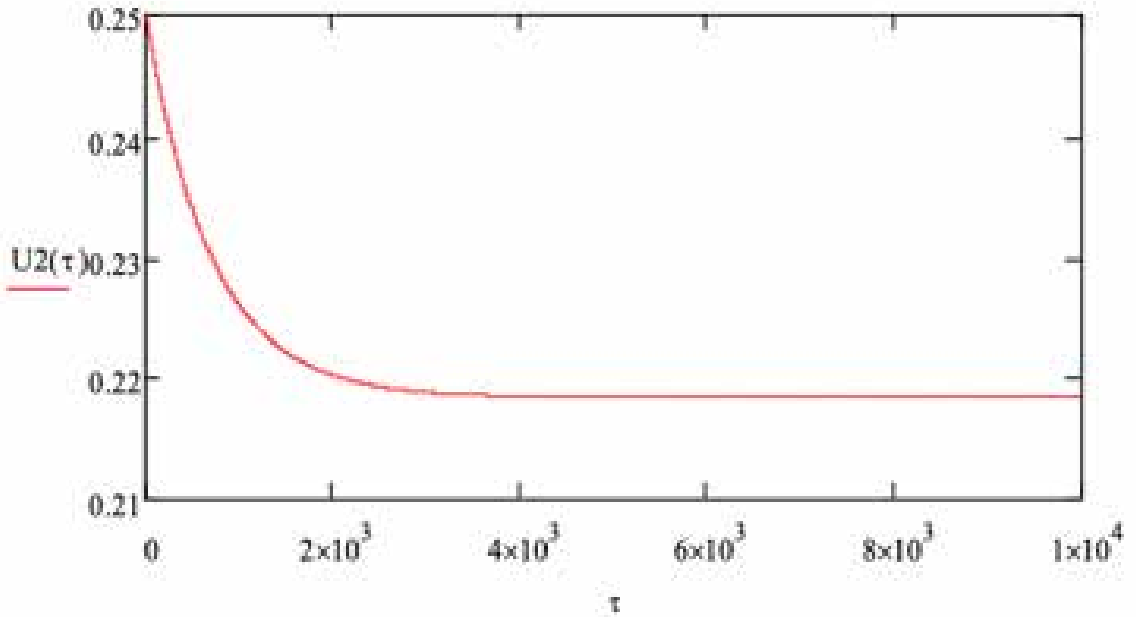


Рис 2.3. Графік зміни вологовмісту зерна

2.3. Визначення передатних функцій об'єкта управління за результатами моделювання

Виконаємо перетворення, виконавши поступове ділення рівняння (2.35) на коефіцієнти при Δt , рівняння (2.36) на коефіцієнт $\Delta \theta$, Δd , і (2.38) на коефіцієнт при ΔU .

Введемо позначення:

$$T_1 = \frac{m_T C_T}{F_1} \quad ; \quad F_1 = G_T C_T + \alpha f \quad ; \quad T_2 = \frac{m_3 C_3}{F_2} \quad ; \quad F_2 = G_3 C_3 + \alpha f + r \beta f' a \quad ; \quad T_3 = \frac{m_T}{F_3} \quad ;$$

$$F_3 = G_T + \beta f' b \quad ;$$

$$T_3 = \frac{m_{03}}{G_{03}} \quad ; \quad K_1 = \frac{G_T C_T}{F_1} \quad ; \quad K_2 = \frac{G_T t_1 - C_T t}{F_1} \quad ; \quad K_3 = \frac{\alpha f}{F_1} \quad ; \quad K_4 = \frac{G_3 C_3}{F_2} \quad ; \quad K_5 = \frac{G_3 \theta_1 - C_3 \theta}{F_2} \quad ;$$

$$K_6 = \frac{\alpha f}{F_2} \quad ;$$

$$K_7 = \frac{r \cdot \beta f' b}{F_2} \quad ; \quad K_8 = \frac{G_T}{F_3} \quad ; \quad K_9 = \frac{d_1 - d_2}{F_3} \quad ; \quad K_{10} = \frac{\beta \cdot f' a}{F_3} \quad ; \quad K_{11} = 1 \quad ; \quad K_{12} = \frac{U_1 - U_2}{G_{03}} \quad ;$$

$$K_{13} = \frac{\beta \cdot f' a}{G_{03}}$$

$$K_{14} = \frac{\beta \cdot f' b}{G_{03}},$$

Опишемо математичну модель за перетвореннями Лапласа, враховуючи нульові початкові умови.

Виконавши перетворення Лапласа отримаємо таку систему рівнянь:

$$(T_1 s + 1) \Delta t(s) = K_1 \Delta t_1(s) + K_2 \Delta G_T(s) + K_3 \Delta \theta(s), \quad (2.39)$$

$$(T_2 s + 1) \Delta \theta(s) = K_4 \Delta \theta_1(s) + K_5 \Delta G_3(s) + K_6 \Delta t(s) + K_7 \Delta d(s), \quad (2.40)$$

$$(T_3 s + 1) \Delta d(s) = K_8 \Delta d_1(s) + K_9 \Delta G_T(s) + K_{10} \Delta \theta(s), \quad (2.41)$$

$$(T_4 s + 1) \Delta U(s) = K_{11} \Delta U_1(s) + K_{12} \Delta G_{30}(s) + K_{13} \Delta \theta(s) + K_{14} \Delta d(s), \quad (2.42)$$

Передаточні функції за окремими каналами можна отримати з рівнянь (2.39)-(2.42) у такому вигляді:

$$\begin{aligned} W_1(s) &= \frac{\Delta t(s)}{\Delta t_1(s)} = \frac{K_1}{T_1 s + 1}; & W_2(s) &= \frac{\Delta t(s)}{\Delta G_T(s)} = \frac{K_2}{T_1 s + 1}; & W_3(s) &= \frac{\Delta t(s)}{\Delta \theta(s)} = \frac{K_3}{T_1 s + 1}; \\ W_4(s) &= \frac{\Delta \theta(s)}{\Delta \theta_1(s)} = \frac{K_4}{T_2 s + 1}; & W_5(s) &= \frac{\Delta \theta(s)}{\Delta G_3(s)} = \frac{K_5}{T_2 s + 1}; & W_6(s) &= \frac{\Delta \theta(s)}{\Delta t(s)} = \frac{K_6}{T_2 s + 1}; \\ W_7(s) &= \frac{\Delta \theta(s)}{\Delta d(s)} = \frac{K_7}{T_2 s + 1}; & W_8(s) &= \frac{\Delta d(s)}{\Delta d_1(s)} = \frac{K_8}{T_3 s + 1}; & W_9(s) &= \frac{\Delta \theta(s)}{\Delta G_T(s)} = \frac{K_9}{T_4 s + 1}; \\ W_{10}(s) &= \frac{\Delta d(s)}{\Delta \theta(s)} = \frac{K_{10}}{T_3 s + 1}; & W_{11}(s) &= \frac{\Delta U(s)}{\Delta U_1(s)} = \frac{K_{11}}{T_4 s + 1}; & W_{12}(s) &= \frac{\Delta U(s)}{\Delta G_{30}(s)} = \frac{K_{12}}{T_4 s + 1}; \\ & & W_{13}(s) &= \frac{\Delta U(s)}{\Delta \theta(s)} = \frac{K_{13}}{T_4 s + 1}; & W_{14}(s) &= \frac{\Delta U(s)}{\Delta d(s)} = \frac{K_{14}}{T_4 s + 1}; \end{aligned}$$

2.4. Аналіз результатів досліджень

З рівнянь 2.22 та 2.24 через відсутність теплових витрат в огородженнях сушарки, ми отримаємо:

$$m_3 C_3 \frac{d\Delta\theta}{d\tau} = G_3 C_3 (\theta_1 - \theta) - C_3 \theta + \alpha f (\bar{t} - \bar{\theta}) - r \cdot G_3 \frac{dU}{d\tau}, \quad (2.43)$$

Використавши критерій Ребіндера $Rb = G_3 \frac{dU}{d\tau}$, та зробивши заміну, ми отримаємо:

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{C_3}{r \cdot Rb} \cdot \frac{d\theta}{d\tau}, \quad (2.44)$$

Беручи до уваги значення критерія Ребіндера і середніх значень $\bar{t}=0,5t_1+0,5t$, $\bar{\theta}=0,5\theta_1+0,5\theta$; відобразимо рівняння 2.41 і 2.43 у вигляді:

$$T_1 \frac{d\theta}{d\tau} = a_1 \theta - b_1 = t, \quad (2.45)$$

$$T_2 \frac{dt}{d\tau} = a_2 t - b_2 = \theta, \quad (2.46)$$

В рівняннях 2.45 та 2.46 маємо:

$$T_1 = \frac{m_z C_z}{\alpha f} (1 - Rb^{-1}); \quad a_1 = \frac{2 \cdot G_T C_T}{\alpha f} + 1; \quad b_1 = t_1 + \left(\frac{2 \cdot G_z C_z}{\alpha f} - 1 \right) \cdot \theta; \quad T_2 = \frac{m_T C_P}{\alpha f};$$

$$a_2 = \frac{2 \cdot G_T C_P}{\alpha f} + 1; \quad b_2 = \theta_1 + \left(\frac{2 \cdot G_T C_P}{\alpha f} - 1 \right) \cdot t_1$$

Отримаємо розв'язок системи рівнянь 2.20, 2.21 відносно $\theta(\tau)$ і $t(\tau)$.

$$A \frac{d^2\theta}{d\tau^2} + B \frac{d\theta}{d\tau} + C\theta = D_1, \quad (2.47)$$

$$A \frac{d^2t}{d\tau^2} + B \frac{dt}{d\tau} + Ct = D_1, \quad (2.48)$$

де $A=T_1T_2$, $B=a_1T_2+a_2T_1$; $C=a_1a_2-1$; $D_1=b_2+a_2b_1$; $D_2=b_1+a_1b_2$

Розв'язок рівняння (2.47) і (2.48) за початкових умов: $\tau=0$; $\theta=\theta_0$; $t=t_0$;

$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} = 0$ отримаємо у вигляді:

$$\theta(\tau) = \frac{\theta_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1}{C}, \quad (2.49)$$

$$t(\tau) = \frac{t_0 C - D_2}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_2}{C}, \quad (2.50)$$

Використовуючи значення критерія Ребіндера (2.44) і похідну від $\theta(\tau)$ (2.49) отримаємо:

$$\frac{d\theta(\tau)}{d\tau} = \frac{\theta_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)} \cdot (r_1 r_2 e^{r_2 \tau} - r_1 r_2 e^{r_1 \tau}), \quad (2.51)$$

Рівняння мінливості вологості за часом:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{C_Z r_1 r_2}{r_0 \cdot Rb} = \left(\frac{\theta_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)} \right) \cdot (e^{r_2 \tau} - e^{r_1 \tau}), \quad (2.52)$$

Рівняння кінетики сушіння зерна ми можемо отримати інтегрувавши рівняння (2.53) за початкових умов: $\tau=0$; $U=U_0$:

$$U(\tau) = U_0 - \frac{(\theta_0 C - D_1) \cdot C_Z}{C \cdot (r_1 - r_2) \cdot r_0 \cdot Rb} \left[1 - \frac{1}{r_1 - r_2} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) \right] \quad (2.53)$$

З рівняння (2.54) ми можемо отримати рівняння зміни вологості в повітрі за часом:

$$m_T \frac{dd}{d\tau} = G_T (d_1 - d) + m_0 \frac{dU}{d\tau}, \quad (2.54)$$

Підставивши $dU(\tau)/d\tau$ в рівняння (2.54) матимемо:

$$m_T \frac{dd}{d\tau} + G_T d = G_T d_1 + K_2 r_1 r_2 (e^{r_2 \tau} - e^{r_1 \tau}), \quad (2.55)$$

$$\text{де } K_2 = \frac{(\theta_0 C - D_1) \cdot C_Z}{C \cdot r_0 \cdot Rb};$$

За початкових умов результат рівняння: $\tau=0$; $d=d_0$ запишемо в такому вигляді:

$$d(\tau) = C_2 \cdot e^{-K/\tau} + d_1 + \frac{K_2}{G_T} \left(\frac{e^{r_2\tau}}{r_2+1} - \frac{e^{r_1\tau}}{r_1+1} \right), \quad (2.56)$$

Отримані залежності (2.49, 2.50, 2.55, 2.56) враховують зміни параметрів теплоносія та зерна на виході зі сушарки безперервної дії та відображають взаємозв'язки між ними.

На рисунках 2.4–2.7 наведено графічне представлення зміни параметрів теплоносія і зерна на виході з зерносушарки, побудоване на основі рівнянь (2.49, 2.50, 2.55, 2.56).

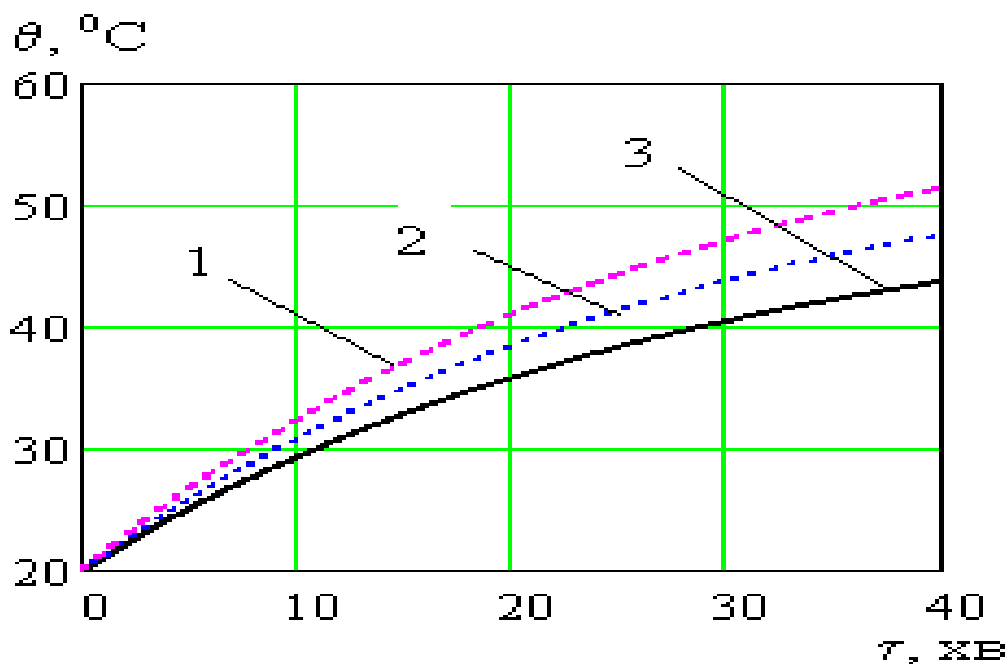


Рис. 2.4. Графік зміни температури зерна 1) $t_{10}=120$ °C, 2) $t_{10}=110$ °C, 3) $t_{10}=100$ °C

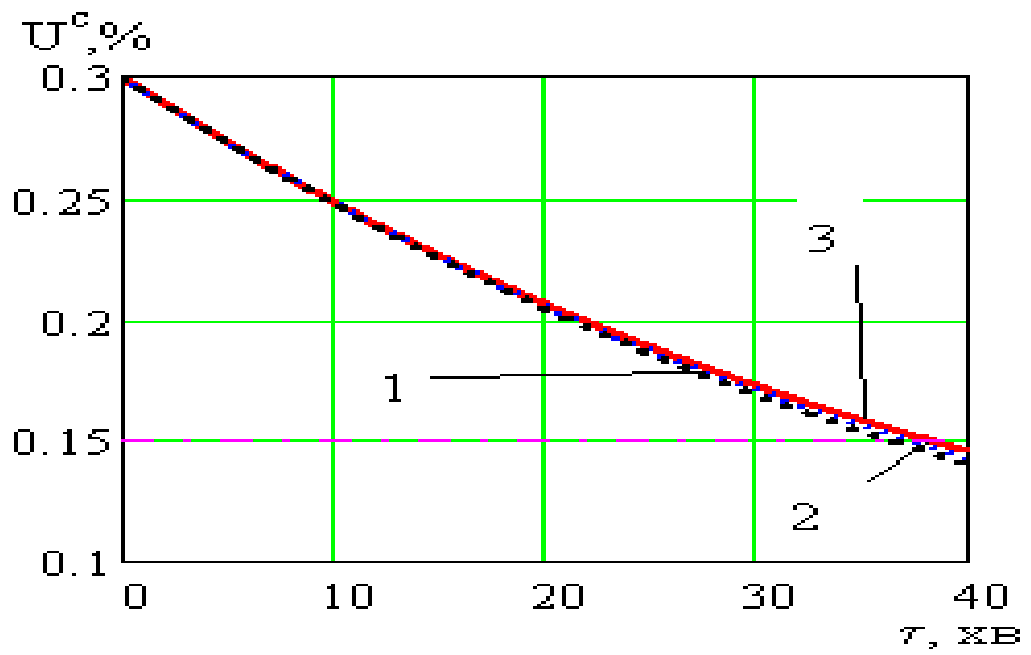


Рис. 2.5. Графік зміни вологовмісту зерна 1) $t_{10}=120$ °C, 2) $t_{10}=110$ °C, 3) $t_{10}=100$ °C

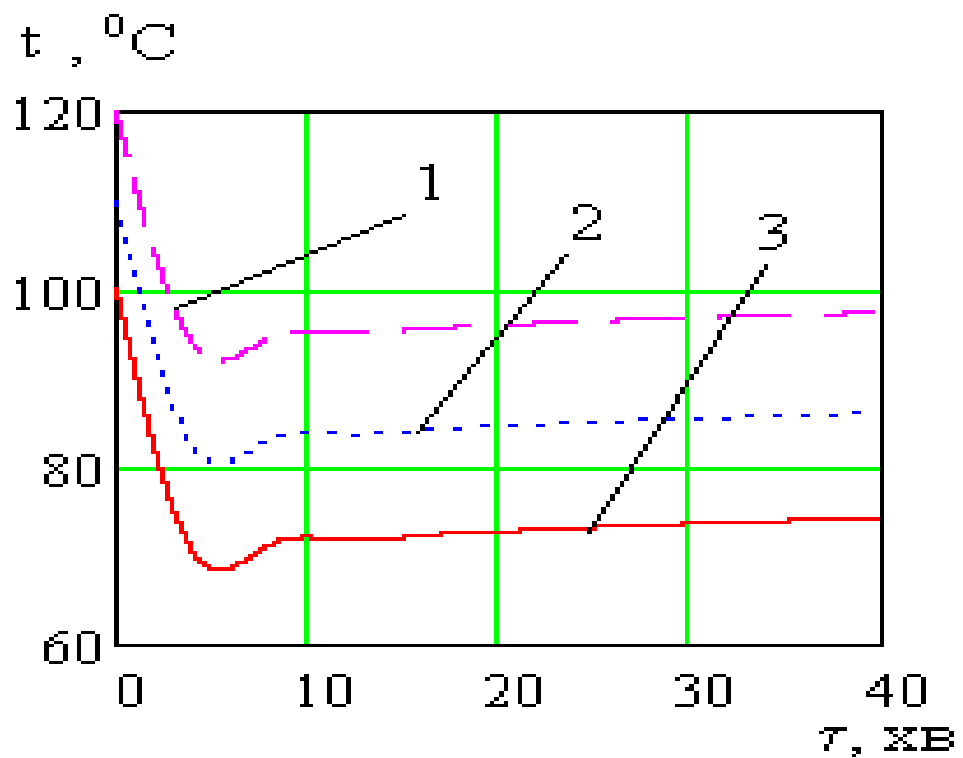


Рис. 2.6. Графік зміни температури теплоносія 1) $t_{10}=120$ °C, 2) $t_{10}=110$ °C, 3) $t_{10}=100$ °C,

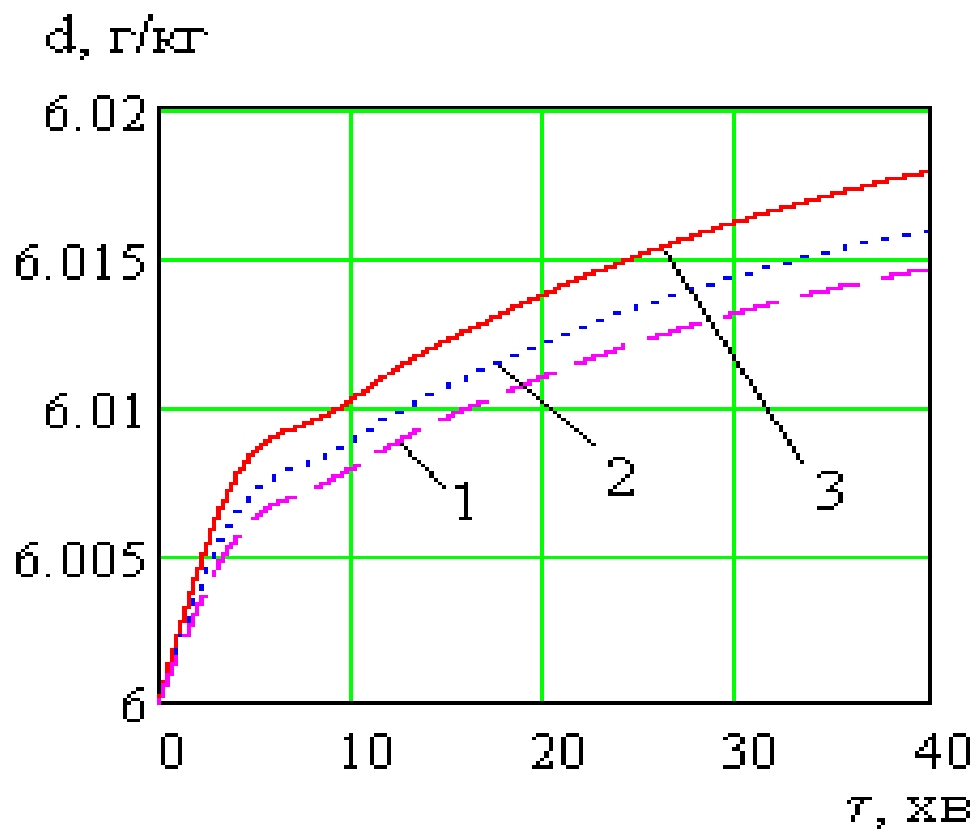


Рис. 2.7. Графік зміни вологості теплоносія 1) $t_{10}=120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2) $t_{10}=110\text{ }^{\circ}\text{C}$,
3) $t_{10}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$

РОЗДІЛ 3

ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ, АНАЛІЗ ЯКОСТІ ФУНКЦІОННУВАННЯ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

3.1. Вибір закону управління

Для вибору закону управління та відповідного контролера важливо враховувати не лише характеристики об'єкта, але й конструктивні особливості самого контролера. Промислові регулятори мають певні похибки при реалізації закону контролю, тому це слід враховувати при підборі всього технічного обладнання системи автоматичного керування.

Для цієї системи управління ми обираємо регулятор безперервної дії.

У сільськогосподарських підприємствах найбільш затребуваними є контролери з такими законами регулювання: 1) ПІД — пропорційно-інтегрально-диференціальний; 2) ПІ — пропорційно-інтегральний; 3) П — пропорційний.

Ефективність компенсації поетапних збурень регулятором оцінюється за величиною динамічного коефіцієнта управління. Для різних типів регуляторів мінімальний час регулювання відрізняється, і його можна визначити описаним нижче методом.

Таблиця 3.1 - Мінімальний час регулювання

Закон регулювання	П	ПІ	ПІД
$t_{p/T}$	6,5	12	7

Мінімальний час регулювання в системі з запізненням дорівнює $t_{pmin} = 2\tau$. З таблиці (3.1) видно, що найкоротший час управління має пропорційний закон (П), але при цьому важливу роль відіграє коефіцієнт посилення K_p . Якщо у П-регулятора цей коефіцієнт невеликий, точність керування буде низькою, а статична похибка — великою. Коли коефіцієнт посилення

дорівнює або перевищує 10, пропорційний контролер відповідає всім вимогам, слід застосовувати пропорційно-інтегральний (ПІ) закон управління.

ПІ-регулятор є найбільш поширеним на підприємствах, оскільки має такі переваги:

- Забезпечує нульову статичну похибку керування;
- Простий у налаштуванні — має лише два параметри: коефіцієнт посилення K_p та інтегральний час T_i ;
- Має низьку чутливість до шумів у вимірювальному каналі.

Пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор описується таким рівнянням:

$$x_{p.o} = K_p \cdot \Delta y + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t \Delta y \cdot dt \quad (3.1)$$

Де $x_{p.o}$ - переміщення регулюючого органу,

K_p – коефіцієнт підсилення регулятора,

Δy - відхилення параметра керування,

T_i – час ізодрому.

Цей вираз включає дві складові:

- Пропорційну - $K_p \cdot \Delta y$,
- Інтегральну - $\frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t \Delta y \cdot dt$.

3.2. Оцінка якості автоматичних систем за стандартними показниками якості

Головна вимога до автоматичної системи керування — забезпечення її стабільної роботи, тобто здатності системи, яка виводиться з рівноваги під впливом зовнішніх збурень, повертатися у початковий стан або набувати нового стабільного положення.

В залежності від сфери застосування використовують різні критерії стійкості систем, кожен із яких має свої переваги та недоліки. До найбільш поширених належать критерії Михайлова, Максвелла, Рауса, Гурвіца,

Найквіста та інші. Наприклад, для оцінки стійкості лінійних систем порядку до п'ятого доцільно застосовувати критерій Гурвіца, тоді як критерій Найквіста вважається більш універсальним.

Для вибору оптимальних параметрів керуючих пристроїв та оцінки стійкості системи доцільно аналізувати амплітудно-фазову частотну характеристику (АФЧХ) автоматичних систем.

Критерій частотної стійкості Найквіста формулюється так: якщо система в розімкненому стані є стійкою, то для забезпечення стійкості у замкненому стані необхідно і достатньо, щоб амплітудно-фазова частотна характеристика розімкненої системи $W(j\omega)W(j\omega)$ при зміні частоти ω від 0 до нескінченності не охоплювала точку з координатами $(-1; j0)$ на комплексній площині. Якщо АФЧХ охоплює цю точку — система нестійка, а проходження АФЧХ точно через цю точку свідчить про те, що система перебуває на межі стійкості.

Тепер проведемо аналіз стійкості системи та визначимо передаточну функцію об'єкта керування (ОК):

$$W_{роз}(p) = \frac{k_{сист}}{(T_1+1)(T_2+1)}; \quad (3.2)$$

$$W_{роз}(p) = \frac{12.7 * e^{-500 * p}}{2400p^2 + 100p + 1} \quad (3.3)$$

Використаємо програмне забезпечення MATLAB і знайдемо $Re(w)$ і $Im(w)$ та побудуємо АФЧХ (рис. 3.1.) На графіку ми можемо бачити, що система стійка, так як годограф не охоплює точку з координатами $(1; j0)$.

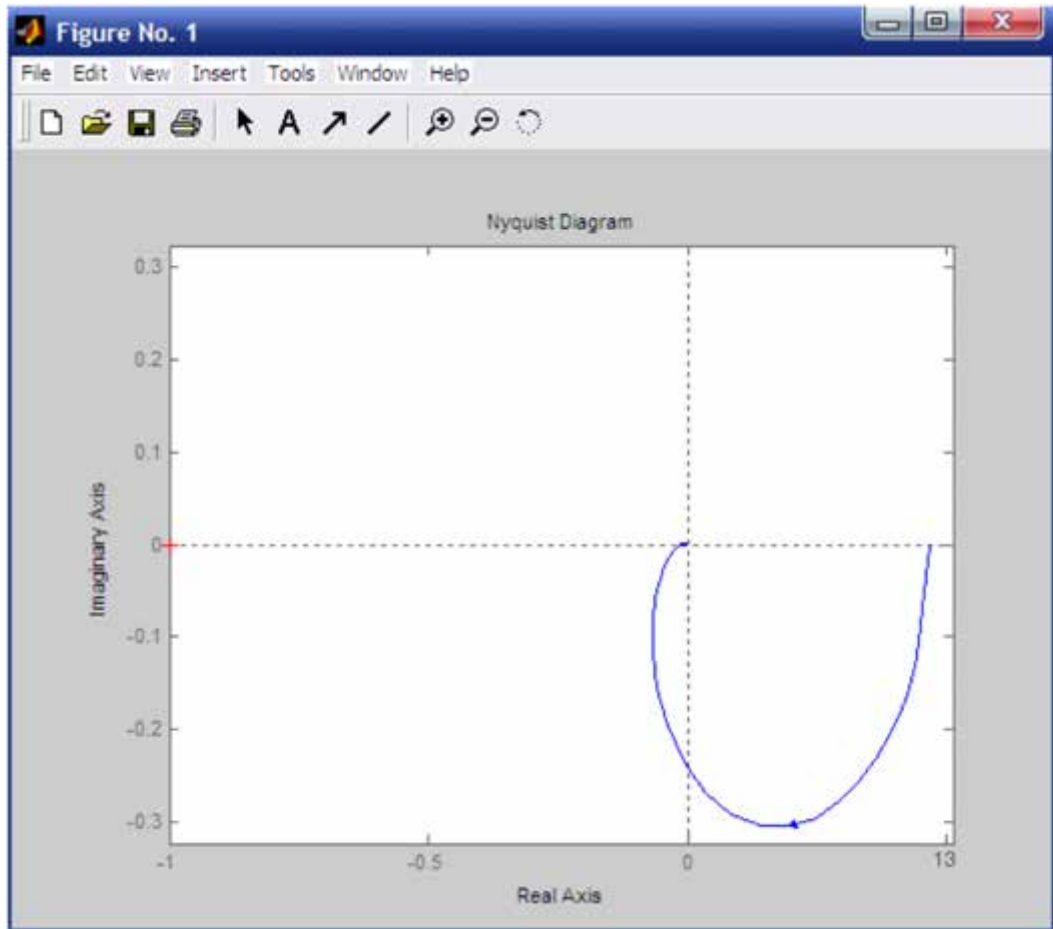


Рис. 3.1. АФЧХ об'єкта керування

Формула коефіцієнта підсилення регулятора виглядає так:

$$W_{\text{рез}}(p) = \frac{k_{\text{сист}}}{k_{\text{ам}} \cdot k_{\text{оу}} \cdot k_{\text{се}}} = 115,4 \quad (3.4)$$

Запас стійкості визначаємо з АФЧХ:

- по фазі 45
- по амплітуді 20;

З таблиці 3.1 вибираємо аперіодичний критерій оптимальності і розраховуємо налаштування регулятора, а саме k_p - коефіцієнт підсилення регулятора, T_i - час ізодрому.

Таблиця 3.2

Регулятор	Типовий перехідний процес		
	Аперіодичний	З 20%-м пере регулюванням	З мінімальним інтегральним критерієм
Статичні об'єкти			
I	$k_{p,I} = \frac{1}{4,5 \cdot k_{об} \cdot T_{об}}$	$k_{p,I} = \frac{1}{1,7 \cdot k_{об} \cdot T_{об}}$	$k_{p,I} = \frac{1}{1,7 \cdot k_{об} \cdot \tau_{об}}$
II	$k_{p,II} = \frac{0,3}{k_{об} \cdot \tau_{об} / T_{об}}$	$k_{p,II} = \frac{0,7}{k_{об} \cdot \tau_{об} / T_{об}}$	$k_{p,II} = \frac{0,9}{k_{об} \cdot \tau_{об} / T_{об}}$
III	$k_{p,III} = \frac{0,6}{k_{об} \cdot \tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 0,6 \cdot T_{об}$	$k_{p,III} = \frac{0,7}{k_{об} \cdot \tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 0,7 \cdot T_{об}$	$k_{p,III} = \frac{1,0}{k_{об} \cdot \tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = T_{об}$
IIIД	$k_{p,IIIД} = \frac{0,95}{k_{об} \cdot \tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 2,4 \cdot \tau_{об}$ $T_{\delta} = 0,4 \cdot \tau_{об}$	$k_{p,IIIД} = \frac{1,2}{k_{об} \cdot \tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 2,0 \cdot \tau_{об}$ $T_{\delta} = 0,4 \cdot \tau_{об}$	$k_{p,IIIД} = \frac{1,4}{k_{об} \cdot \tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 1,3 \cdot \tau_{об}$ $T_{\delta} = 0,5 \cdot \tau_{об}$
Астатичні об'єкти			
II	$k_{p,II} = \frac{0,4}{\tau_{об} / T_{об}}$	$k_{p,II} = \frac{0,7}{\tau_{об} / T_{об}}$	-
III	$k_{p,III} = \frac{0,4}{\tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 6 \cdot \tau_{об}$	$k_{p,III} = \frac{0,7}{\tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 3 \cdot \tau_{об}$	$k_{p,III} = \frac{1,0}{\tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 4 \cdot \tau_{об}$
IIIД	$k_{p,IIIД} = \frac{0,6}{\tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 5 \cdot \tau_{об}$ $T_{\delta} = 0,2 \cdot \tau_{об}$	$k_{p,IIIД} = \frac{1,1}{\tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 2 \cdot \tau_{об}$ $T_{\delta} = 0,4 \cdot \tau_{об}$	$k_{p,IIIД} = \frac{1,4}{\tau_{об} / T_{об}}$ $T_{iz} = 1,6 \cdot \tau_{об}$ $T_{\delta} = 0,5 \cdot \tau_{об}$

$$k_p = \frac{0,6}{12,7 \cdot 500 / 2400} = 0,226 \quad (3.5)$$

$$T_i = 0,6 \cdot 2400 = 1440 \quad (3.6)$$

Побудуємо модель в середовищі MATLAB та уводимо дані:

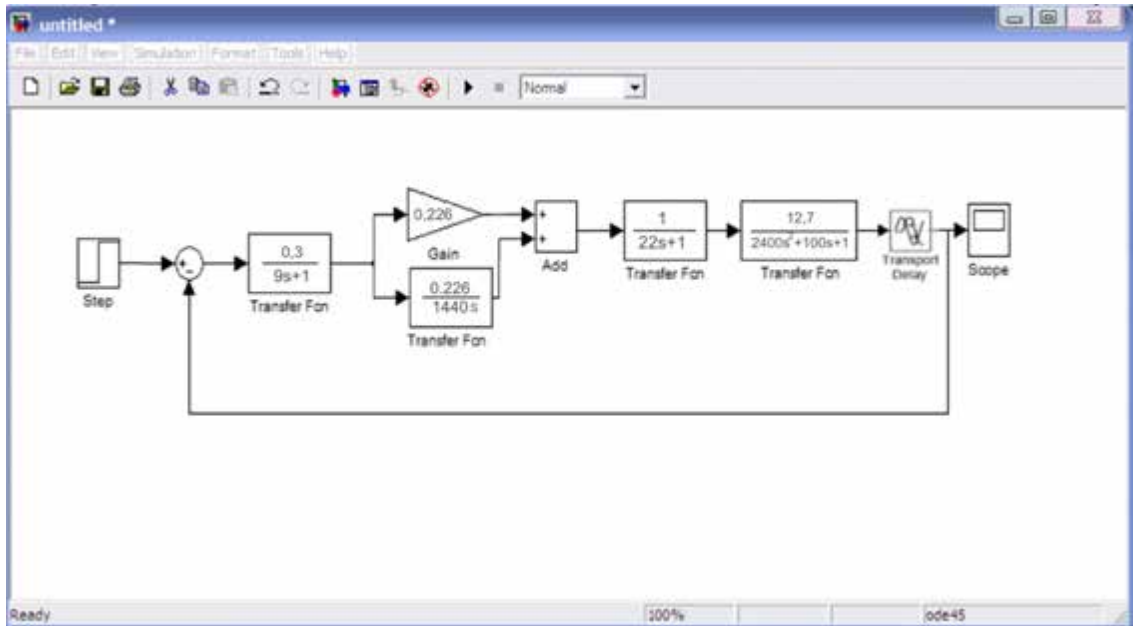


Рис. 3.2. Модель зроблена в середовищі MATLAB

З моделі зробленої у MATLAB ми отримуємо перехідний процес на рис.3.3.

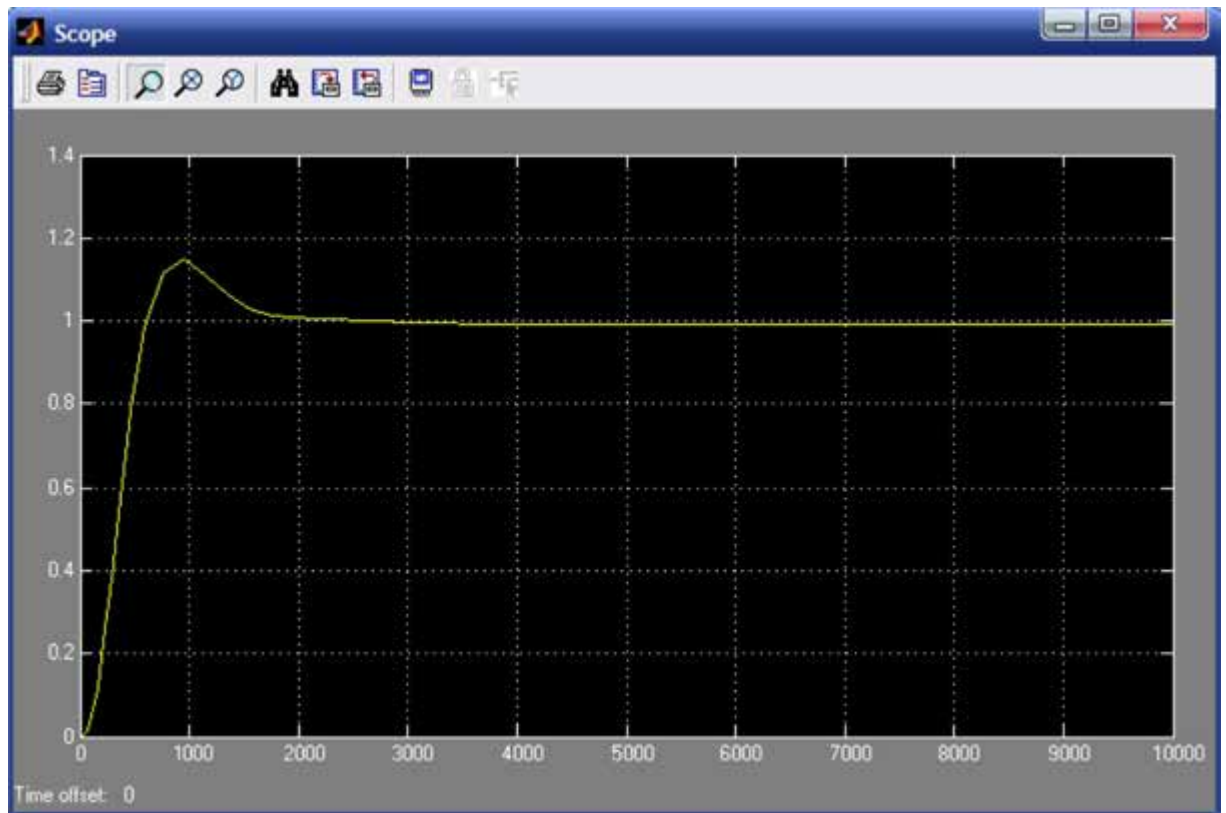


Рис. 3.3. Перехідний процес

- перерегулювання $\frac{h(t)_{max}-h(t)_{уст}}{h(t)_{уст}} * 100\% = 0\%$;

- час регулювання – 1600 с;

- коливальність $n = 1$;

- відсутня статична похибка.

Швидкість моменту оцінюється часом $t_{рег}$, тоді ми робимо висновок, що наша система забезпечує необхідну якість регулювання і працює, вона може бути впроваджена в автоматичних системах контролю вологості зерна в сушарках.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

4.1. Вибір технічних засобів

Контроль температури повітря в шахтній зерносушарці є однією з ключових операцій у післязбиральній обробці зерна. Відсутність надійного обладнання з достатньою точністю вимірювання температури та вологості різних видів зерна може призвести до втрат продукції, зниження якості зерна та помилок у розрахунках під час експлуатації сушарки.

Вибір вимірювальних перетворювачів, що входять до складу регулятора, зазвичай здійснюється у два етапи:

на першому етапі, виходячи з типу контролюваного параметра та умов роботи об'єкта управління, визначається відповідний тип перетворювача;

на другому етапі, після підбору всіх складових регулятора, за каталогами обирається потрібний типорозмір пристрою.

Датчики автоматичних систем керування повинні мати такі характеристики: високу чутливість, лінійність статичних характеристик у часі, швидкість реакції, стійкість до перепадів температури, високу перевантажувальну здатність, а також бути простими у монтажі та обслуговуванні. Надійність і точність датчиків безпосередньо впливають на ефективність роботи системи сушіння та якість кінцевого продукту.

Згідно з технологічними нормами, робочий діапазон вимірювання температури повітря в терміналі складає 18...25°C. Для забезпечення оптимального контролю рекомендовано використовувати температурний датчик TSM-8034M (див. рис. 4.1), який найбільш точно відповідає цьому діапазону.

Крім того, слід враховувати умови експлуатації сушарки, такі як пиловість, вологість навколишнього середовища та можливі механічні вібрації, що можуть впливати на роботу датчиків. Для підвищення надійності системи автоматичного керування рекомендується впроваджувати регулярне технічне обслуговування та калібрування вимірювальних приладів.



Рис. 4.1. Загальний вигляд датчика ТСМ – 8034М

Таблиця 4.1 - Технічні дані датчика ТСМ-8034М

Назва параметру	Значення
Діапазон вимірювання температури	-50...+60°C
Точність вимірювань температури	0.1°C
Градуювання згідно ГОСТу 6651-59	22
Опір при температурі 0°C	100 Ом
Габаритні розміри	108x65x16 мм
Кількість контактів	2 шт

Даний датчик повністю відповідає нашим вимогам, оскільки забезпечує точне вимірювання вологості та температури у необхідному для нас діапазоні. Завдяки високій чутливості та стабільності роботи він дозволяє оперативно

реагувати на зміни параметрів повітря, що є критично важливим для ефективного контролю процесу сушіння зерна.

Вибір регуляторного органу та виконавчого механізму Виконавчий механізм — це пристрій, який здійснює безпосередній механічний рух або обертання керуючого елемента об'єкта управління, тим самим змінюючи його стан і впливаючи на технологічний процес. Надійність та точність роботи виконавчого механізму безпосередньо впливають на якість автоматичного регулювання.

Для сушіння зерна в шахтній зерносушарці в якості приводу буде використаний вентилятор. Вентилятор забезпечує необхідний рух сушильного агента (повітря), регулюючи інтенсивність подачі повітря в камеру сушіння, що дозволяє підтримувати задані параметри температури та вологості. Вибір вентилятора базується на його продуктивності, енергоефективності, а також на можливості інтеграції з системою автоматичного управління для забезпечення безперервного та стабільного процесу сушіння.



Рис. 4.2. Вентилятор

Таблиця 4.2 - Технічні характеристики вентилятора

Модель	Напруга U, В	Потужність P, Вт	Оберти, n, об/хв	Продуктивність м ³ /ч
Вентилятор 400	380	190	1450	4600

Основна мета сушіння сільськогосподарської продукції полягає у зниженні вологості до рівня, що забезпечує довготривале зберігання зерна без втрати його якості. Використання теплого або гарячого повітря під час сушіння зменшує ризик зараження зерна мікроорганізмами, однак водночас значно зростає кількість зерен із механічними ушкодженнями.

Експериментальні дослідження показали, що на якість зерна негативно впливають деякі процеси сушіння, які можуть спричиняти побічні ефекти. Так, сушка зерна звичайним, не нагрітим повітрям триває близько 4–8 днів і при цьому добре зберігаються якісні характеристики, наприклад, у кукурудзи. Однак при тривалому застосуванні такого методу насіння піддається ураженню мікроорганізмами.

Саме тому на елеваторах застосовується комбінований спосіб сушіння — поєднання вентиляції звичайним повітрям та сушіння гарячим. Такий підхід дозволяє одночасно запобігти мікробіологічним ураженням та знизити механічні пошкодження зерна. Спочатку вологість швидко зменшують з 40% до 20% за допомогою гарячого повітря, а потім доводять її до 14% шляхом звичайної вентиляції.

Регулюючий орган є одним із найважливіших елементів системи автоматичного управління, оскільки він безпосередньо впливає на об'єкт контролю і визначає як надійність роботи системи в цілому, так і точність регулювання. В якості регулюючого механізму вентилятора використовується двигун серії АІР 80 В4.

До того ж, для забезпечення ефективної роботи системи сушіння важливо правильно вибрати параметри керування двигуном вентилятора, такі як частота обертання та напруга живлення. Це дозволяє регулювати

інтенсивність подачі повітря та підтримувати оптимальні умови сушіння зерна, мінімізуючи втрати продукції та покращуючи її якість.

Крім того, автоматизація процесу сушіння за допомогою сучасних датчиків температури та вологості, а також використання систем управління з адаптивним регулюванням, дають змогу швидко реагувати на зміни в технологічних параметрах і підтримувати задані умови сушіння. Це знижує ризики перегріву або недосушування зерна, що позитивно впливає на збереження поживних властивостей та життєздатності насіння.

Важливо також враховувати екологічні аспекти роботи сушарок: використання енергоефективних приводів і вентиляторів сприяє зниженню енергоспоживання, а контроль за вихлопними газами допомагає мінімізувати шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Таким чином, комплексний підхід до вибору регулюючого органу, оснащення його сучасними системами контролю та дотримання технологічних норм гарантує ефективну і надійну роботу зерносушарки, що є ключовим фактором у збереженні якості зерна та економічній вигоді підприємства.

Таблиця 4.3 - Технічні характеристики двигуна АИР 80 В4

Потужність P, кВт	Напруга U, В	Клас захисту	Кількість обертів, n, об/хв	cosφ	Сила струму I _n , А	ККД η, %	Момент інерції J, кг·м ²
1,5	380	IP54	1500	0,87	3,36	87,5	0,00349



Рис. 4.3. Двигун АІР 80 В4

Передатна функція двигуна.

$$W_{\text{ем}}(s) = \frac{1}{22s+1} \quad (4.1)$$

Для керування електродвигуном в вентиляційній установці використовуємо перетворювач частоти фірми Шнейдер Електрик ATV 312HD11N4 (рис. 4.4, табл. 4.4.).



Рис. 4.4. Зовнішній вигляд перетворювача частоти фірми Шнейдер Електрик ATV312HD11N4

Таблиця 4.4 - Технічні характеристики перетворювача частоти

ATV312HD11N4

Вхідна та вихідна напруги перетворювача	380 В
Діапазон вихідної частоти	0 – 500 Гц
Діапазон швидкості	50
Перехідний перевантажувальний момент	170 - 200% номінального моменту двигуна
Закон керування двигуном	Скалярний, Векторний, Квадратичний та Енергозберігаючий режим
Потужність двигуна	11 кВт
Максимальний лінійний струм	63.5 А
Повна потужність	22 кВА
Максимальний лінійний струм к.з.	22 кА
Потужність, що розсіюється при номінальному навантаженні	477 Вт
Компенсація ковзання	Автоматична та настроювання

Основні характеристики:

- Паралельне підключення обладнання — у разі відключення одного механізму інші продовжують роботу;
- Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс стандарту RS-485 із підтримкою протоколу Modbus;
- При перевантаженнях або аварійних ситуаціях активується гальмівний переривник, який забезпечує плавне зупинення, що значно подовжує термін служби обладнання;
- Зниження енергетичних коливань і стрибків напруги;
- Корекція навантажувальної характеристики для запобігання перегріву двигуна;
- Відсутність електромагнітних завад від приводу;
- Робочі плати захищені спеціальною ізоляцією, що оберігає частотний перетворювач від вологи, пилу та інших шкідливих впливів;

- Частотний перетворювач працює з особливими параметрами, що забезпечує високий рівень шумозаглушення;

- Модель оснащена вентилятором для ефективного охолодження системи.

Відповідно до вимог кваліфікаційної роботи для регулювання вибираємо програмований логічний контролер виробництва Schneider Electric. При виборі ПЛК слід враховувати кількість входів і виходів, наявність аналогових інтерфейсів, підтримку необхідних протоколів для управління частотним перетворювачем, а також можливість розширення і заміни модулів. Враховуючи ці вимоги, обираємо модульний контролер Modicon M238 (див. рис. 4.5).

Цей регулятор програмується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення SoMachine. Цей універсальний інженерний програмний пакет сумісний з усіма апаратними платформами MachineStruxure і забезпечує підтримку всього життєвого циклу машини — від розробки програмного коду і експлуатації до діагностики та технічного обслуговування.

SoMachine виступає як єдине середовище розробки прикладних програм для ПЛК, а також для створення користувацьких інтерфейсів панелей оператора. Програма має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, розроблений спеціально для швидкого навчання користувачів, які раніше не працювали з цим продуктом. Вона підтримує п'ять стандартних мов програмування за стандартом IEC 61131-3: IL (Instruction List — список інструкцій), LD (Ladder Diagram — релейні схеми), SFC (Sequential Function Chart — послідовні функціональні схеми), ST (Structured Text — структурований текст), FBD (Function Block Diagram — функціональні блок-схеми), а також додаткову мову CFC (Continuous Function Chart — безперервні функціональні схеми).

Присутність спеціалізованих інструментів, таких як можливість створення вбудованої візуалізації, вбудований симулятор програм, підтримка точок зупину та внесення змін у реальному часі, значно полегшує й прискорює процес налагодження і тестування додатків. Особливою перевагою є можливість віддаленого мережевого підключення до контролера, що спрощує

технічне обслуговування обладнання та дозволяє уникнути необхідності виїзду інженера на об'єкт у разі виникнення непередбачуваних ситуацій. Це суттєво скорочує час відновлення працездатності системи та знижує матеріальні витрати на сервісне обслуговування.

Для підключення аналогових датчиків у системі використовується додатковий модуль розширення TM2AMM6HT (див. рис. 4.6), який інтегрується з програмованим логічним контролером, має спільну шину даних і живлення, що забезпечує зручність і гнучкість підключення.



Рис. 4.5. Загальний вигляд модульного програмованого логічного контролеру Modicon M238 фірми Schneider Electric



Рис. 4.6. Зовнішній вигляд модуля TM2AMM6HT

Maximum number of expansions	7	7
Power supply	24 VDC	24 VDC
Serial link	1	2
CANopen master	—	1
Inputs	14/24 VDC, 8/100 kHz	14/24 VDC, 8/100 kHz
Outputs	10 trans; 0.5 A, 4/100 kHz	10 trans; 0.5 A, 4/100 kHz
References	TM238LDD24DT	TM238LFDC24DT

Рис. 4.7. Узагальнені технічні характеристики програмованого логічного контролера Modicon M238 фірми Schneider Electric

4.2. Вибір пускової апаратури

Нам потрібно розрахувати електричні струми, які споживають електричні пристрої:

$$\text{AIP 80 B4: } U_n=380 \text{ В, } P=1.51 \text{ кВт, } I_{\text{п}}=6.0 \text{ А, } I_n=3.6 \text{ А.}$$

Нам підходить електромагнітний пускач Schneider Electric LC1D12B7, який зображений на (рис. 4.8).



Рис. 4.8. Електромагнітний пускач Schneider Electric LC1D12B7

Таблиця 4.5 – Характеристики Електромагнітний пускач
Schneider Electric LC1D12B7

Тип	контактор LC1D
Серія	серія TeSys D
Напруга ізоляції (Ue), В	690
Кількість полюсів	3P
Конфігурація контактів полюсів	3NO
Додаткові контакти миттєвої дії	1 Н.О. + 1 Н.З.
Монтаж	DIN-рейка
Температура робоча, оС	від -5 до +60
Робоча напруга, АС (змін. струм), В	24
Струм переключення АС-1, А	25
Номінальна напруга котушки АС, В	24
Номінальна напруга котушки DC (пост. струм), В	-
Комутаєма потужність АС-1	-
Індуктивний струм навантаження	-
Резистивний струм навантаження	-
Комутаєма потужність АС-3, кВт	5,5
Струм переключення АС-3, А	12
Виробник	Schneider Electric (Франція)

Електромагнітний пускач КМ1 ми вибрали за:

- за струмом $I_{п.ном.} \geq I_{част.}$;
- за напругою 380 В;

- за конструкцією і виконанням.

Для захисту двигуна ми вибрали теплове реле КК1 за:

- за струмом;
- за напругою 380 В;
- за конструкцією і виконанням.

Тепловое реле на пускач 7 – 10 А (рис. 4.9.):

- $I_{НОМ} = 7..10 \text{ А}$;
- $U_{НОМ} = 380 \text{ В}$.



Рис. 4.9. Тепловое реле на пускач Schneider Electric LRD14 7 - 10А

Автоматичний вимикач QF1 ми вибрали за такими показниками:

- $I_{НОМ} > I_M + I_{FU} + I_{PC} + I_{HL} + I_{GU}$.

Відповідно до принципової схеми, для захисту електродвигунів від струмів короткого замикання використовуються автоматичні вимикачі.

Для цієї мети обираємо автоматичний вимикач QF (рис. 4.10) виробництва Schneider Electric, типу Acti9 iK60N на 16А з розрахунковою короткочасною відключною здатністю 6 кА. Його технічні характеристики наведені у таблиці 4.5.



Рис. 4.10. Зовнішній вигляд автоматичного вимикача Acti9 iK60N

Таблиця 4.5 - Технічні характеристики автоматичного вимикача Acti9 iK60N

Номінальний струм	16 А
Відключаюча здатність	6 кА
Механічний ресурс	20 000
Електричний ресурс	10 000
Перетин підключаемого дрота	1-16 мм ²
Ширина модуля	18 мм
Монтаж	на шину TH35(DIN)

4.3. Вибір кабелів і проводів

У щиті керування монтажні роботи зробимо використовуючи провід одного типу. Його ми вибираємо за найбільшим струмом. Найбільший допустимий струм який пройде по проводі №1 . $I_{ном.} = 10A$

Для цього повинна виконуватися умова:

$$I_{тр.доп.} \geq I_{роз.}, \text{ де. } I_{роз.} = 10A$$

Вибираємо провід за двома, такими, основними параметрами:

1. Площа поперечного перерізу,
2. По способу прокладання. За цими параметрами ми вибрали мідний провід ПВ-1 1.0.

Площа перерізу цього проводу: $S = 1 \text{ мм}^2$, $I_{\text{тр}} < 10 \text{ А}$

За схемою підключень ми будемо застосовувати наступні провoda і кабеля:

1. Кабель від щита управління

- $I_{\text{тр.доп}} \geq I_{\text{ном}}$;
- $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$;
- Кількість жил — 4.

За каталогом ми вибираємо провід ПВС 4x1.0, $S = 1 \text{ мм}^2$ – площа поперечного перерізу, $I_{\text{тр.доп.}} \leq 14\text{А}$.

2. Кабель живлення двигуна АИР 80 В4.

- $I_{\text{н.}} = 3.6\text{А}$;
- $I_{\text{тр.доп}} \geq I_{\text{ном}} = 7.2$;
- $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$;
- кількість жил — 3.

За каталогом ми вибираємо провід ПВС 3x1.0, $S = 1 \text{ мм}^2$ – площа поперечного перерізу, $I_{\text{тр.доп.}} \leq 4\text{А}$

3. Кабель до датчика РК1:

- $I_{\text{тр.доп.}} \geq I_{\text{ном}} = 3 \text{ А}$;
- $U_{\text{ном}} = 12 \text{ В}$;
- Кількість жил – 2 .

За каталогом ми вибираємо провід ПВС 2x0.5, $S = 0,5 \text{ мм}^2$ – площа поперечного перерізу, $I_{\text{тр.доп}} \leq 2 \text{ А}$.

РОЗДІЛ 5

СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1. Розробка електричної принципової схеми

Принципова електрична схема — це проектний документ, який відображає основний принцип функціонування електричної системи та взаємозв'язки її компонентів.

При розробці принципової електричної схеми (рис. 5.1) було враховано вимоги відповідних нормативних актів і стандартів, що регламентують безпеку, надійність та ефективність роботи системи.

Електрична принципова схема системи автоматичного керування температурним режимом шахтної зерносушарки, побудована на основі технічних засобів компанії Schneider Electric, складається з двох основних частин: силової, яка відповідає за живлення і безпосереднє управління виконавчими механізмами, та керуючої частини, в основі якої лежить програмований логічний контролер із відповідними модулями розширення. Така структура забезпечує надійне, гнучке та ефективне управління процесом сушіння зерна з урахуванням всіх технічних та експлуатаційних вимог.

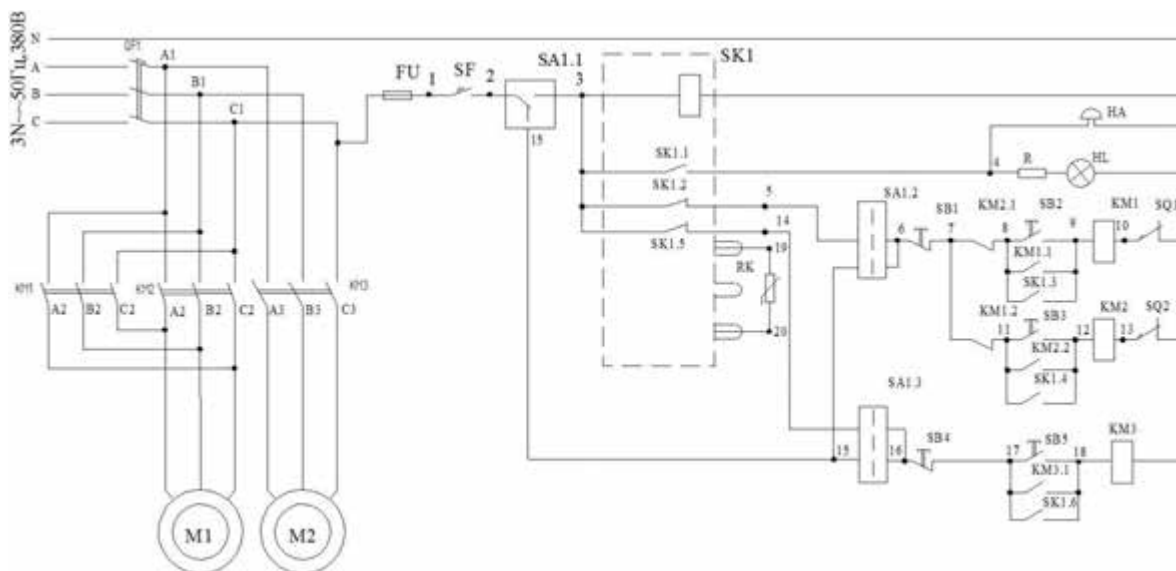


Рис. 5.1. Схема електрична принципова

5.2. Розробка схеми з'єднань

Відповідно до ГОСТ 2.702-75 «Правила виконання електричних схем», схеми підключень — це схеми, які ілюструють способи з'єднання складових частин установки або виробу. Вони створюються на основі основних схем електропостачання і застосовуються переважно під час монтажних та налагоджувальних робіт.

Схема з'єднань формується з дотриманням таких основних правил:

схема підключень розробляється для пульта управління, де розташовані всі розподільчі пристрої;

всі елементи, розміщені на задній панелі щита управління відповідно до вимог ГОСТ 2.702-75;

дотримуються технічні характеристики маркування кабелів і ліній зв'язку, за допомогою яких всі елементи з'єднуються між собою відповідно до ГОСТ 2.710-81 «Буквено-цифрові позначення в електричних схемах».

При розробці схеми використовувався адресний метод, що відповідає таким вимогам:

Панель управління зображена в одній площині, на якій показана передня панель із розміщеним автоматичним вимикачем QF1 та сигнальною лампою HL1. Ліва бічна панель містить клемну колодку XT, необхідну для ізоляції елементів, розташованих на передній і задній панелях пульта управління.

Виходи клем кожного елемента позначені колами з внутрішніми заводськими маркуваннями; якщо маркування відсутнє, застосовуються умовні номери з відповідними пояснювальними ярликами.

Адресний метод є найпоширенішим і характеризується тим, що лінії зв'язку між окремими компонентами, встановленими на платі або щиті дистанційного керування, безпосередньо не показуються. Натомість на схемі вказується цифрова або буквено-цифрова адреса компонента чи пристрою, що відповідає його положенню згідно з принциповою схемою або порядковим номером, у точках підключення проводів кожного елемента.

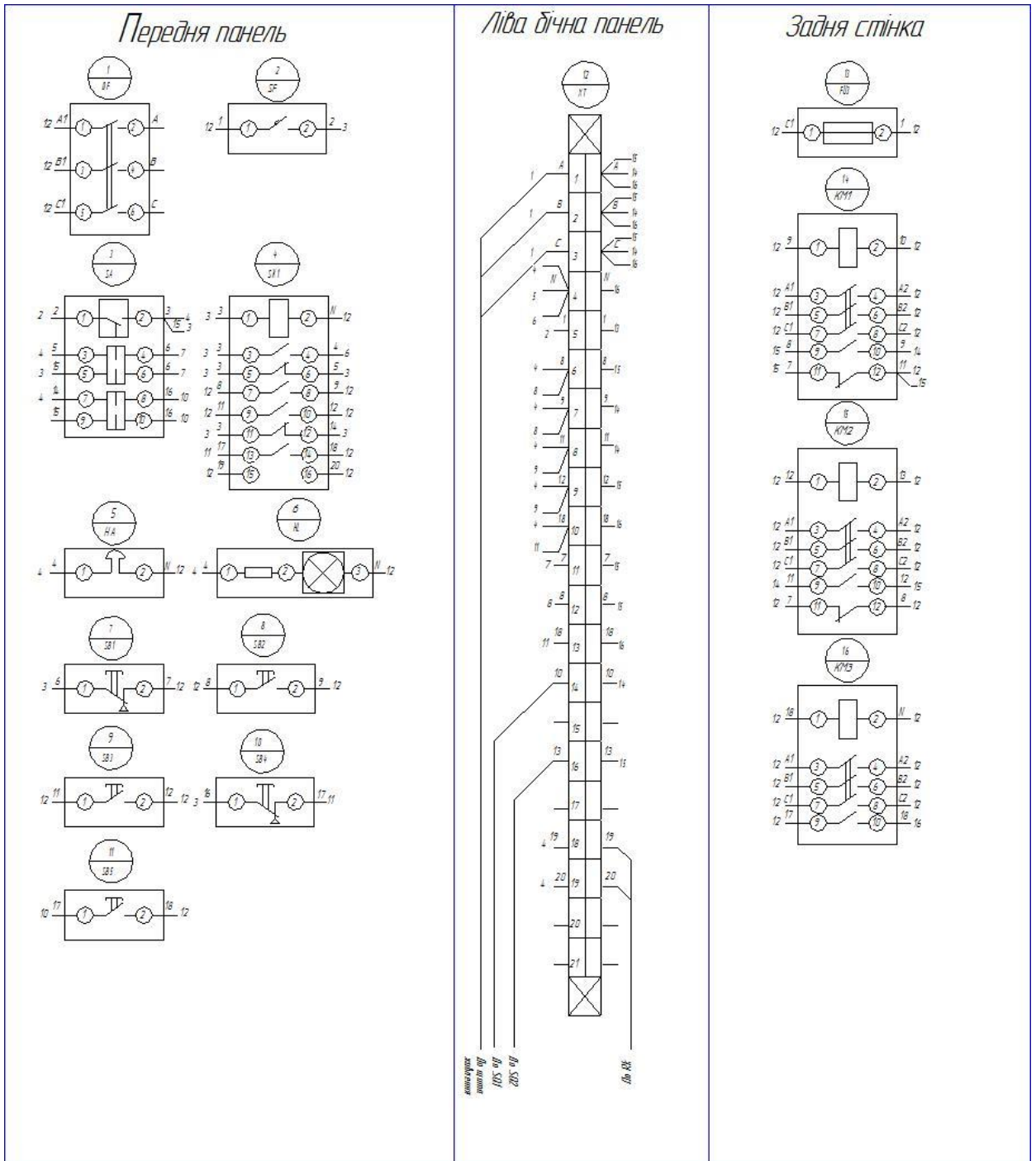


Рис. 5.2. Схема електрична з'єднань (адресний спосіб виконання)

5.3. Розробка схеми підключення

Відповідно до ГОСТ 2.702-75, схеми підключень відображають зовнішні з'єднання між пристроями, екранами, панелями та іншими елементами. Вони складаються на основі основних схем живлення, технічних характеристик обладнання та креслень виробничих приміщень з технологічним оснащенням і трубопроводами. Такі схеми застосовуються під час монтажу електропроводки, що подає живлення до панелей, консолей, установок, пристроїв і апаратів.

У практиці використовують два основні типи схем з'єднань: графічні та табличні, причому графічні зустрічаються частіше. На цих схемах стандартними графічними символами позначаються: первинні перетворювачі, позащитові пристрої та засоби автоматизації, сполучні й подовжувальні коробки, вільні коробки на кінцях термопар, зовнішня електропроводка та кабелі, обладнання для підключення, елементи для розгалуження, а також комутаційні затискачі, розташовані поза монтажними дошками.

Шафи, панелі, окремі прилади й пристрої зображуються у вигляді прямокутників або кіл, усередині яких розміщені відповідні написи.

З'єднання одного функціонального призначення на схемах показуються суцільними лініями, а в місцях приєднання виконавчих механізмів та інших пристроїв проводи розгалужуються для точнішого позначення.

Схеми підключень виконуються без дотримання масштабу, у зручному для користувача вигляді.

Також варто зазначити, що при розробці схем підключень особлива увага приділяється чіткості та зручності їхнього використання на етапах монтажу, налагодження та обслуговування обладнання. Це дозволяє зменшити ймовірність помилок при підключенні та скоротити час на виконання робіт.

Для підвищення надійності системи часто застосовують кольорове маркування кабелів та чіткі позначення контактів, що значно спрощує ідентифікацію ліній під час експлуатації. Крім того, у складних системах

можуть використовуватися спеціальні блоки комутації і роз'єми, які стандартизують підключення та забезпечують швидку заміну елементів.

У сучасних проєктах часто застосовують автоматизовані системи розробки схем (САЕ-системи), які дозволяють не лише створювати точні і зрозумілі схеми, але й інтегрувати їх у загальну систему проєктування, включаючи створення специфікацій і документації, що значно підвищує ефективність роботи інженерів.

Таким чином, правильно розроблена і виконана схема підключень є невід'ємною частиною якісного проєкту, що гарантує безпечну, надійну і ефективну роботу електрообладнання в експлуатації.

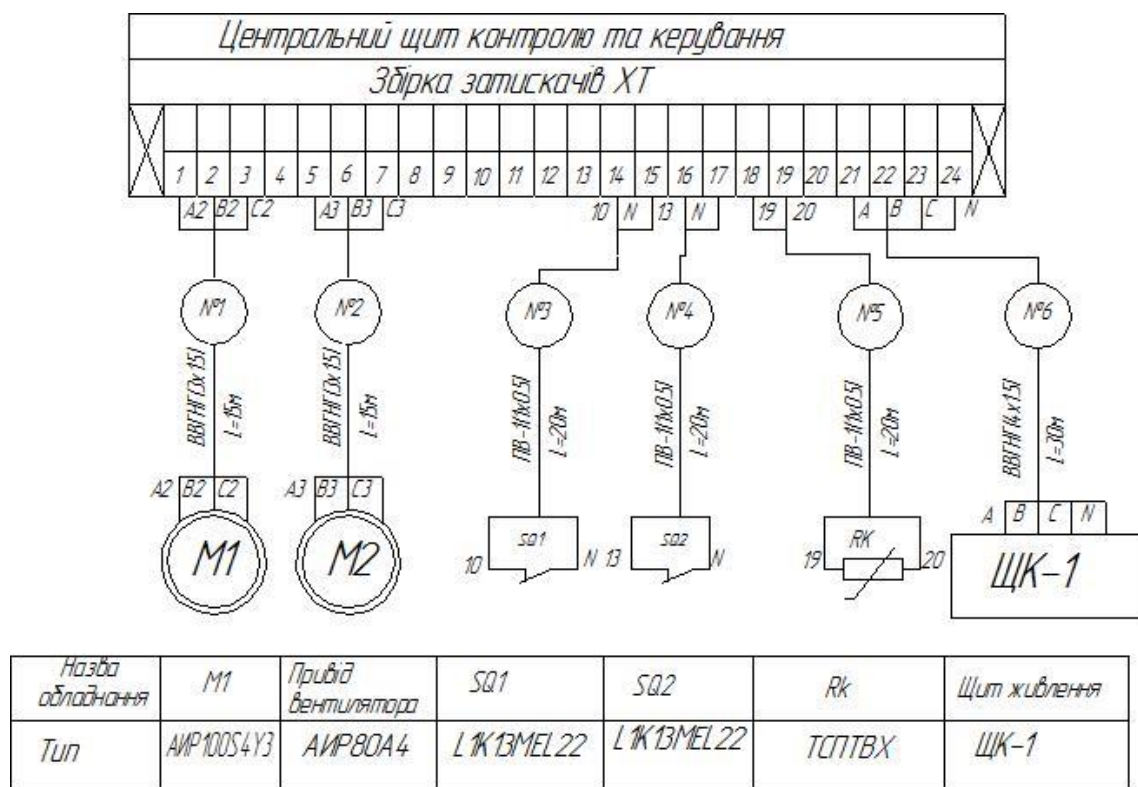


Рис. 5.3. Схема електрична підключень

5.4. Розробка загального вигляду щита управління

Щити та панелі автоматичних систем призначені для розміщення обладнання, що забезпечує керування технологічними процесами, контрольно-вимірвальні прилади, системи сигналізації, регульовальні клапани, захисні та блокувальні пристрої тощо. На лицьових сторонах таких щитів і панелей можуть бути нанесені мнемонічні схеми, пояснювальні

написи, а також встановлені освітлювальні прилади для зручності експлуатації.

Вибір конструкції щита чи панелі залежить від кількості та типу встановленого обладнання, а також від плану розміщення. Панель управління виступає як інтерфейс між оператором, об'єктом керування та системою управління, виконуючи функції диспетчерського пункту.

Розміри панелі визначаються на основі загальної площі обладнання, розміщеного на задній панелі щита та на його дверцятах. Для визначення типу і габаритів щита розраховується площа монтажу пристроїв, які будуть у ньому встановлені. Розмір секцій обладнання враховує не лише загальні габарити пристроїв, але й додатковий простір, необхідний для підключення проводів, розміщення маркувань на їх кінцях, а також для зручності технічного обслуговування і ремонту обладнання.

Також при проектуванні щитів і панелей слід враховувати умови експлуатації, такі як температура, вологість, запиленість, а також можливість доступу для технічного обслуговування. Важливо передбачити достатній запас простору для майбутнього розширення системи, що дозволить без проблем додавати нові пристрої або модулі без необхідності повної заміни конструкції.

Крім того, необхідно забезпечити надійне заземлення та захист від електромагнітних завад, що підвищує стійкість і безпеку роботи обладнання. Вентиляція і охолодження щитів мають бути організовані так, щоб підтримувати оптимальний температурний режим, запобігаючи перегріву електронних компонентів.

Використання стандартизованих компонентів і уніфікованих монтажних систем допомагає спростити монтаж, обслуговування і ремонт щитів, а також знижує час на навчання персоналу. Наявність зручного інтерфейсу і зрозумілої маркування значно полегшує роботу операторів та інженерів, підвищуючи загальну ефективність системи автоматизації.

Визначаємо необхідну монтажну зону ящика управління, яка необхідна для розміщення обладнання захисту та управління:

$$84 * 54 + 75 * 60 + 82 * 99 + 125 * 84.5 + 44 * 90 = 3.168 * 10^4,$$

Заздалегідь виберемо щит ЩМУ-1-1 зображений на (рис. 5.1) з його габаритами: 1300/800/250.

Розрахуємо корпусну монтажну зону ящика керування:

$$S_y = (1300 - 2 \times 50) \times (800 - 2 \times 50) = 8.4 \times 10^5 \text{ мм}^2.$$

Отже, щит вибрано правильно, оскільки $S \leq S_y$.



Рис. 5.4. Щит автоматизації ЩМУ-1-1

5.5. Забезпечення захисту від пожежі

Пожежна безпека на об'єктах із захищеним ґрунтом має забезпечуватися шляхом впровадження організаційних, технічних та інших необхідних заходів відповідно до вимог ДНАОП 0.01-1.01-95 та ГОСТ 12.1.004-91 «Пожежна безпека. Загальні вимоги». На дверях або стінах приміщень обов'язково повинні бути розміщені відповідні знаки безпеки, а також вказані категорії

приміщень за рівнем вибухо- та пожежонебезпеки згідно з ВБН-СГіП-46-3-94 «Перелік будівель і приміщень підприємств Міністерства сільського господарства та продовольства України з визначенням їх категорії за вибухопожежною небезпекою», а також відповідні класи зон відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ). На ділянках, відведених для зберігання тари, інвентарю, а також розміщення техніки, механізмів та агрегатів, мають бути забезпечені необхідні засоби пожежогасіння відповідно до додатку №3 ДНАОП 0.01-1.01-95 та ГОСТ 12.4.009-83 «Пожежна техніка для захисту об'єктів. Основні види. Розміщення та обслуговування».

Крім того, необхідно забезпечити регулярне проведення інструктажів та навчань персоналу щодо правил пожежної безпеки, правильного користування засобами пожежогасіння та дій у разі виникнення пожежі. Важливо підтримувати в належному стані всі системи пожежної сигналізації та автоматичного пожежогасіння, проводити їх періодичне технічне обслуговування та перевірки.

Також слід передбачити створення та підтримання чітких маршрутів евакуації з чітким маркуванням, а на об'єкті має бути розроблений план дій при пожежі, який регулярно оновлюється та доводиться до відома всіх працівників.

Впровадження комплексного підходу до пожежної безпеки сприятиме мінімізації ризиків виникнення пожежі, збереженню майна і життів, а також забезпечить відповідність вимогам чинного законодавства та нормативних актів.

РОЗДІЛ 6

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Економічна ефективність автоматизації оцінюється за ступенем зниження витрат живої праці на виготовлення одиниці продукції. Впровадження автоматизації у виробництво сільськогосподарської продукції зазвичай призводить до зростання капітальних інвестицій, проте суттєво зменшує експлуатаційні витрати на одиницю продукції. Таким чином, ефективність автоматизації проявляється у загальному зниженні собівартості продукції.

Основним показником ефективності капіталовкладень в автоматизацію є консолідовані витрати, які включають як річні експлуатаційні витрати, так і річну частку капіталовкладень. Розрахунок консолідованих витрат здійснюється за формулою:

$$K_3 = K_{ТО} + K_d + K_p + K_{щ}, \quad (6.1)$$

де: $K_{ТО} = 21\,166$ грн. – вартість технологічного обладнання;

$K_d = 200$ грн. – вартість датчиків температури та вологості;

$K_p = 600$ грн. – контр по»;

$K_{щ} = 600$ грн. – вартість щита керування.

Отже:

$$K_3 = 21\,166 + 200 + 600 + 600 = 22\,566 \text{ грн.}$$

Торгівельно-транспортні витрати будуть становити:

$$K_{ТТ} = 0,11 * K_3, \quad (6.2)$$

$$K_{ТТ} = 0,11 * 22\,566 = 2\,482,26 \text{ грн.}$$

Витрати на монтаж технічних засобів становлять:

$$KM=0,17 \cdot K3, \quad (6.3)$$

$$KM=0,17 \cdot 22566=3836,22 \text{ грн.}$$

Витрати на прокладання проводок:

$$KPP=KPP1 \cdot L, \quad (6.4)$$

де: $KPP1 = 16$ грн/м – вартість проводки та їх монтажу;

$L = 360$ м – довжина проводки.

$$KPP=16 \cdot 360=5760 \text{ грн.}$$

Інші капітальні витрати будуть становити 2% від суми капітальних вкладень:

$$KKB=0,02 \cdot 22566=451,32 \text{ грн.}$$

Капітальні витрати визначаємо за формулою:

$$K=K3+KTT+KM+KPP+KKB, \quad (6.5)$$

$$K=22566+2482,26 + 3 836,22+5760+451,32=35 095,8 \text{ грн.}$$

Визначивши суму капіталовкладень, можна знайти відрахування на амортизацію

$$C_a = 0,142 * K, \quad (6.6)$$

$$C_a = 0,142 * 35\,095,8 = 4\,983,60 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт будуть становити:

$$C_{ПР} = 0,18 * K, \quad (6.7)$$

$$C_a = 0,18 * 35\,095,8 = 6\,317,24 \text{ грн.}$$

Витрати на енергоресурси будуть становити :

$$C_e = P \cdot \Gamma \cdot 1,9. \quad C_e = P * \Gamma * 1,9, \quad (6.8)$$

де $P = 0,95$ кВт - потужність автоматизації;

$\Gamma = 153 \cdot 24 = 3\,672$ год. - кількість годин роботи (Зерносушарка працює 153 днів на рік).

Отже:

$$C_e = 0,95 * 3\,672 * 1,9 = 6\,627 \text{ грн.}$$

Витрати на оплату праці робочим, що зв'язаний з експлуатацією системи автоматизації складає:

$$C_z = 1 * 60 * 8 * 153 = 73\,440 \text{ грн,} \quad (6.9)$$

де: 1 – кількість операторів;

60 грн/год. – ставка оператора;

8 - години роботи на добу;

153 - кількість днів роботи на рік.

З цього ми отримали що річні експлуатаційні витрати будуть становити:

$$C = 4\,878,26 + 6\,183,8 + 6\,627 + 73\,440 = 91\,128 \text{ грн.}$$

Обчислення основних показників економічної ефективності.

Розраховавши річні експлуатаційні затрати і капітальні витрати можна знайти зведені витрати:

$$B_{зв} = C + E_n * K, \quad (6.10)$$

$$B_{зв} = 73\,440 + 0,15 * 35\,095,8 = 78\,704,37 \text{ грн.}$$

Після цього чистий прибуток можна визначити за формулою:

$$\Delta C_{пр} = \Delta C_з + \Delta C_в, \quad (6.11)$$

$\Delta C_в$ – прибуток за економію електричної енергії;

$$\Delta C_з = C_з - (1,2 * \Gamma * 1,6), \quad (6.12)$$

$$\Delta C_з = 73\,440 - (1,2 * 3\,672 * 1,6) = 66\,390 \text{ грн.}$$

$$\Delta C_в = C_e - (P * \Gamma * 1,6 * \Delta \Pi), \quad (6.13)$$

$$\Delta C_в = 6\,627 - (0,95 * 3\,672 * 1,6 * 0,4) = 4\,394,42 \text{ грн.}$$

$\Delta \Pi = 40\%$ - економія часу енергоспоживання при автоматизації.

$$\Delta C_{пр} = 66\,390 + 4\,394,42 = 70\,784,42 \text{ грн.}$$

Термін за який окупиться установка визначається за формулою:

$$T_{окуп} = K / \Delta C_{пр} \quad (6.14)$$

$$T_{окуп} = 34\,354,48 / 70\,784,42 = 0,485 \approx 5 \text{ місяці.}$$

Робимо висновок, що з вище приведених розрахунків бачимо, що чистий дохід становить 70 784,42 грн. а сама установка по-кріє витрати на себе за 5 місяців. Тому, висновок, що рекомендується автоматизувати сушарку.

ВИСНОВОК

У цій кваліфікаційній роботі було здійснено розробку та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи управління температурою повітря у шахтній сушарці з використанням технічних засобів компанії Schneider Electric. Проведено ґрунтовний аналіз наукової літератури та сучасних підходів до автоматизації складських приміщень і сортувальних ділянок, що дозволило обрати оптимальний закон керування для розроблюваної системи.

Розроблено детальну імітаційну модель функціонування системи автоматичного регулювання (САР) температури повітря в сушильному терміналі. Враховуючи технологічні особливості процесу сушіння та характеристики технічних засобів, для управління було застосовано пропорційно-інтегральний (ПІ) закон регулювання, який забезпечує ефективний баланс між швидкістю реакції системи та її стійкістю.

У ході дослідження розроблена система управління, реалізована на базі регулятора Schneider Electric, пройшла комплексний аналіз показників якості та стійкості роботи. Отримані результати підтвердили відповідність системи вимогам, що висуваються до подібних систем, що свідчить про її практичну застосовність та надійність у реальних виробничих умовах.

Крім того, було проведено економічний аналіз, який показав високу ефективність впровадження автоматизованої системи: розрахунковий термін окупності склав лише 5 місяців, що робить проект вигідним з точки зору інвестицій та експлуатаційних витрат. Такий результат підкреслює не лише технічну, а й економічну доцільність реалізації розробленої системи в промислових умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Котов Б.І. Нагрівання зерна в протитечійному режимі із штучним гальмуванням гравітаційного руху / Котов Б.І., Кіфяк В.В., Лісецький В.О.//Науковий вісник Ніжинського агротехнічного інституту. – 2009, С.199-204.
2. Лісецький В.О. Підвищення ефективності сушіння зерна в сушарках періодичної дії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.11 “Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва”/ В.О. Лісецький; УААН. Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". — Глеваха, 2004. — 23 с.
3. Мартиненко І.І., Лисенко В.П., Тищенко Л.П., Болбот І.М., Олійник П.В. Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК: Підручник – К., 2008. – 330с.
4. Ключев А.С. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. - М.: Энергоиздат. 1989 г.
5. Б.Л. Головінський, Ю.В. Шуруб «Теорія автоматичного управління. Аналіз стійкості та якості роботи систем автоматичного управління». Київ – 2011.
6. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом. Навчальний посібник. Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук. Кременчук Видавець ПП Щербатих О. В. 2013 – 199 с
7. Сенсорні панелі Weintek MT8071iE Електронні дані. - Режим доступу: <https://refit.prom.ua/ua/p521087815-sensornye-paneli-weintek.html> (дата звернення 17.10.2023 р.). – Назва з екрана.
8. TIA Portal – инновационная среда разработки комплексных проектов автоматизации. - Режим доступу: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:66c777ed-45bd-48e2-aaa4-fd43a97971a4/02-TIA-Portal-V16.pdf> (дата звернення 27.10.2023 р.). – Назва з екрана.

9. Тепло–масообменные аппараты и установки //Под ред. Б. А. Левченко.
– Харьков: ХГПУ, 1999. – 387 с.
10. А. С. Гинзбург. Основы теории и техники сушіння пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 527 с.
11. П. Д. Лебедев Теплообменные, сушильные и холодильные установки.
– М.: Энергия, 1972.– 320с.
12. А. С. Гинзбург. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности.– М.: Агропромиздат, 1985.–336с.
13. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии.– М.: Химия, 1968.– 847с.
14. Чернобыльский И. И., Тананайко Ю. М. Сушильные установки химической промышленности.– К.: Техніка, 1969.–279с.
15. Атаманюк В. М. Зовнішній тепломасообмін під час фільтраційного сушіння //Промышленная теплотехника.- 2006, Т.28,- №5, - С.47-54.
16. Кіндзера Д. П., Ханик Я. М., Атаманюк В. М. Гідродинамічні особливості при сушінні дисперсних матеріалів у щільному шарі //Науковий вісник УкрДЛТУ: Збірник наук.-техн. праць.- Львів: 2003.- Вип.13.1.- С.126-133.