

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ
ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З.ГЖИЦЬКОГО

ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

на тему: “Автоматизація процесу сушіння гранул амофосу в
сушарках киплячого шару з використанням контролерів Siemens
для ПРАТ "РІВНЕАЗОТ" ”

Виконав: студент гр. Акт-42Сп
Спеціальності 174 – „Автоматизація, комп’ютерно-
інтегровані технології та робототехніка”
(шифр і назва)

Романів Іван Русланович
(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. Лиса О.В.
(Прізвище та ініціали)

Рецензенти: д.т.н., проф. Власовець В.М.
(Прізвище та ініціали)

ЛЬВІВ-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ
ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З.ГЖИЦЬКОГО

ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
Спеціальність 174 – „Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка”

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри _____
д.т.н., проф. А.М. Тригуба
“ ____ ” _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Романів Іван Русланович _____

1. Тема роботи: Автоматизація процесу сушіння гранул амофосу в сушарках
киплячого шару з використанням контролерів Siemens для ПРАТ "РІВНЕАЗОТ"

Керівник роботи Лиса Ольга Володимирівна, к.т.н., доцент.

Затверджені наказом по університету від 25 лютого 2025 року № 123/к-с.

2. Строк подання студентом роботи 16.06.2025 р.

3. Початкові дані до роботи: 1. Технологічна карта процесу сушіння гранул
амофосу в сушарках киплячого шару; 2. Функціональні ознаки процесу сушіння
гранул амофосу в сушарках киплячого шару; 3. ДСТУ, СНіПи.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1. Аналіз технологічного процесу сушіння гранул амофосу в сушарках
киплячого шару як об'єкта керування

2. Розроблення системи автоматичного керування технологічним процесом
сушіння в сушарці киплячого шару

3. Розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання

4. Охорона праці

5. Розрахунок економічної ефективності проекрованої системи автоматизації

Висновки.

Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік презентаційного матеріалу: Тема, автор, керівник роботи. Технологічна карта процесу. Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами сушарки киплячого шару. Спрощена функціональна схема автоматизації сушарки киплячого шару. Структурна схема каскадної системи автоматичного регулювання температури киплячого шару. Вікно функціонального блоку PI Tuner для веденого регулятора. Вікно функціонального блоку PI Tuner для веденого регулятора з налаштованими необхідними параметрами налаштування. Вікно функціонального блоку PI Tuner для ведучого регулятора з необхідними параметрами налаштування. Схема каскадної системи регулювання температури киплячого шару у середовищі Simulink. Перехідний процес зміни температури киплячого шару при зміні витрати сушильного агента через камеру сушарки на 100 м³/год

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	<i>Лиса О.В., доцент кафедри інформаційних технологій</i>		
4	<i>Городецький І.М., доцент кафедри інженерної механіки</i>		

7. Дата видачі завдання 8 вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Написання першого розділу та означення головних завдань роботи</i>	08.09.24-25.12.24	
2	<i>Виконання другого розділу та формування головних показників для розрахунків</i>	26.12.24-01.02.25	
3.	<i>Виконання третього розділу та узагальнення отриманих результатів роботи</i>	02.02.25-11.04.25	
4.	<i>Виконання четвертого розділу та узагальнення вимог охорони праці</i>	12.04.25-21.04.25	
5.	<i>Вартісне оцінення ефективності пропозицій роботи</i>	22.04.25-21.05.25	
6.	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	22.05.25-01.06.25	
7.	<i>Завершення роботи в цілому</i>	02.06.25-16.06.25	

Студент _____ Романів І.Р.
(підпис)

Керівник роботи _____ Лиса О.В.
(підпис)

УДК 631.365.2

Автоматизація процесу сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару з використанням контролерів Siemens для ПРАТ "РІВНЕАЗОТ". Романів І. Р. – Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра інформаційних технологій – Львів, ЛНУВМБ ім. С.З.Гжицького, 2025.

63 с. текст. част., 37 рис., 7 табл., 24 літ. джерел.

Текстова частина включає вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел.

У першому розділі проведено аналіз технологічного процесу сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару. Розроблено матеріальний та тепловий баланс сушарки для сушіння амофосу. Визначено основні фактори, що впливають на протікання процесу, та вибрано номінальні значення параметрів для оптимального його протікання. Складено структурну схему взаємозв'язку між вхідними, збурюючими та вихідними параметрами технологічного процесу.

У другому розділі розроблена спрощена оптимальна функціональна схема системи автоматизації сушарки для сушіння амофосу. Для реалізації функціональної схеми автоматизації вибрано локальні технічні засоби та програмовано-логічний контролер Siemens S7-1200 та модуль розширення для нього SM1234. Розроблено принципову схему зовнішніх з'єднань локальних засобів автоматизації та мікропроцесорного контролера.

У третьому розділі виконано розрахунок та моделювання системи автоматичного регулювання температури в киплячому шарі. Наведено опис схем регулювання, індикації та сигналізації параметрів технологічного процесу.

У четвертому розділі розроблені заходи з охорони праці і навколишнього середовища.

У п'ятому розділі розраховано економічну ефективність від впровадження запропонованої системи автоматизації.

На підставі виконаної роботи зроблено відповідні висновки.

Ключові слова: автоматизація, технічні засоби, контролер, закон регулювання, моделювання, крива розгону, Matlab.

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі бакалавра проведено аналіз технологічного процесу сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару. Розроблено матеріальний та тепловий баланс сушарки для сушіння амофосу. Проведено аналіз структурної схеми взаємозв'язків між технологічними параметрами по окремих каналах регулювання та статичних і динамічних характеристик сушарки. Розроблена спрощена оптимальна функціональна схема системи автоматизації сушарки для сушіння амофосу. Для реалізації функціональної схеми автоматизації вибрано локальні технічні засоби та програмовано-логічний контролер Siemens S7-1200 та модуль розширення для нього SM1234. Розроблено принципову схему зовнішніх з'єднань локальних засобів автоматизації та мікропроцесорного контролера. Виконано розрахунок та моделювання системи автоматичного регулювання температури в киплячому шарі. На основі математичної моделі об'єкта складено структурну модель каскадної системи регулювання температури киплячого шару в середовищі Simulink та оптимальні параметри налаштування регулятора з ПІ-законом регулювання. Наведено опис схем регулювання, індикації та сигналізації параметрів технологічного процесу.

THE SUMMARY

In the bachelor's qualification work, an analysis of the technological process of drying ammophos granules in fluidized bed dryers was carried out. The material and heat balance of the dryer for drying ammophos was developed. An analysis of the structural diagram of the relationships between technological parameters on individual control channels and static and dynamic characteristics of the dryer was carried out. A simplified optimal functional diagram of the automation system of the dryer for drying ammophos was developed. To implement the functional automation diagram, local technical means and a Siemens S7-1200 programmable logic controller and an expansion module for it SM1234 were selected. A schematic diagram of the external connections of local automation means and a microprocessor controller was developed. The calculation and modeling of the automatic temperature control system in the fluidized bed were performed. Based on the mathematical model of the object, a structural model of the cascade fluidized bed temperature control system in the Simulink environment and optimal settings for the controller with a PI-control law were compiled. A description of the control, indication and signaling schemes of technological process parameters is provided.

Зміст

Вступ.....	7
1. Аналіз технологічного процесу сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару як об'єкта керування	9
1.1. Опис технологічного процесу сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару	9
1.2. Матеріальний та тепловий баланси технологічного об'єкта	10
1.3. Визначення та аналіз факторів, що впливають на технологічний процес	14
1.4. Теоретичні основи технологічного процесу в окремих технологічних апаратах і машинах	16
1.5. Складання структурної схеми взаємозв'язку між технологічними параметрами об'єкта	17
2. Розроблення системи автоматичного керування технологічним процесом сушіння в сушарці киплячого шару	19
2.1 Аналіз статичних та динамічних характеристик об'єкта по окремих каналах зв'язку	19
2.2. Синтез оптимальної схеми автоматизації для заданих умов роботи об'єкта.....	21
2.3. Вибір локальних засобів автоматизації	23
2.4. Вибір мікропроцесорних засобів автоматизації	31
2.5. Розробка принципових електричних схем зовнішніх з'єднань мікропроцесорних засобів	36
3. Розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання.....	40
3.1. Складання та розрахунок параметрів математичної моделі об'єкта регулювання	40
3.2. Визначення закону регулювання	48
3.3. Побудова перехідних процесів розрахованої САР	52
3.4. Опис функціональної схеми автоматизації	55
3.5. Специфікація на засоби автоматизації.....	56
4. Охорона праці	59
4.1. Аналіз стану виробничої санітарії і гігієни праці.....	59
4.2. Обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці.....	60
4.3. Пожежна безпека.....	62
5. Розрахунок економічної ефективності проекрованої системи автоматизації.....	64
Висновок.....	66
Список використаних джерел.....	70

ВСТУП

У хімічній промисловості процес сушіння поряд з випаровуванням і випалюванням зазвичай визначає основні техніко-економічні показники всього виробництва, що пов'язано зі значними витратами теплової енергії для проведення даних процесів. Процеси конвективного сушіння широко застосовуються у виробництвах мінеральних солей і добрив, полімерних матеріалів і в інших виробництвах.

Основною метою будь-якого сушильного процесу є досягнення заданого рівня кінцевої вологості матеріалу, яка, в свою чергу, є критично важливим параметром для забезпечення якості кінцевого продукту та стабільності подальших технологічних операцій. Зниження вологості нижче або вище оптимального значення може призвести до значних втрат, дефектів продукції або перевитрати енергоресурсів.

Для сушіння дисперсних матеріалів, зокрема гранульованих речовин, ефективним технічним рішенням є застосування сушарок з псевдозрідженим (киплячим) шаром. Перевагою таких апаратів є висока ефективність тепло- і масообміну, яка досягається завдяки великій площі контакту між частинками матеріалу та сушильним агентом, а також рівномірному розподілу температури й інтенсивному випаровуванню вологи. Це дозволяє досягати високої продуктивності сушіння при мінімальних витратах енергії.

При розробленні системи автоматизації процесу сушіння гранул амофосу необхідно вивчити технологію процесу сушіння, розробити залежності для матеріального і теплового балансу. Необхідно визначити основні параметри які впливають на процес сушіння амофосу, розробити технологічна карта та структурна схема взаємозв'язку між параметрами досліджуваного об'єкта. З врахуванням наведеного вище необхідно розробити функціональну систему автоматизації із застосуванням мікропроцесорного контролера.

Для мікропроцесорного контролера необхідно розробити програму функціонування контурів регулювання та принципову електричну схему з'єднань його з вибраними засобами автоматизації.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень необхідно розробити математичну модель об'єкта і на його основі вибрати закон регулювання автоматичного регулятора та параметри його налаштування.

Сушіння гранул амофосу — один із критичних етапів, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту, енерговитрати та продуктивність підприємства. Традиційні системи керування часто не забезпечують належної адаптації до змін зовнішніх умов і мають обмежені можливості щодо оптимізації витрат. Впровадження сучасних мікропроцесорних систем автоматичного керування дозволяє суттєво підвищити надійність і точність регулювання параметрів сушіння, знизити енергоспоживання та покращити якість продукції. Саме тому розробка ефективної системи автоматизації сушіння в сушарках киплячого шару є актуальною задачею для підприємств хімічної промисловості, зокрема для ПРАТ «РІВНЕАЗОТ».

Метою дипломної роботи є розроблення ефективної системи автоматичного керування процесом сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару з використанням сучасних засобів автоматизації, математичного моделювання та техніко-економічного обґрунтування доцільності її впровадження.

Об'єктом дослідження є технологічний процес сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару на хімічному підприємстві.

Предметом дослідження є система автоматичного керування параметрами сушіння (температурою, вологістю, тиском та витратою теплоносія), її структура, динамічні характеристики, засоби реалізації та вплив на ефективність технологічного процесу.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ГРАНУЛ АМОФОСУ В СУШАРКАХ КИПЛЯЧОГО ШАРУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1. Опис технологічного процесу сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару

Сушінням називають процес видалення вологи з твердих і пастоподібних матеріалів. Сушіння необхідне для підвищення споживчих якостей матеріалів, а також зменшує витрати для транспортування і зберігання готового матеріалу.

Найчастіше використовують механічний та тепловий (термічний) способи видалення вологи з матеріалу. Механічні способи - відтискання, фільтрування, відстоювання, сепарування і центрифугування. Механічні способи сушіння є більш економічними, але теплове сушіння застосовують тому, що тепловий метод потребує менше часу і дозволяє досягти меншої залишкової вологості матеріалу.

Термічний спосіб сушіння включає такі стадії - підведення тепла до висушуваного матеріалу, видалення вологи з поверхні матеріалу, перенесення вологи з його ядра на поверхню, випаровування вологи і видалення випареної вологи з поверхні матеріалу.

Матеріали які підлягають сушінню поділяють на капілярно-пористі, колоїдні і колоїдні капілярно-пористі. Капілярно-пористі матеріали при термічному сушінні майже не деформуються (кристалічні солі, мінерали, тощо), колоїдні матеріали під час сушіння деформуються. До таких відносять більшість продуктів харчової промисловості. Колоїдні капілярно-пористі матеріали мають середні властивостями.

В даному технологічному процесі відбувається сушіння гранул амофосу - проміжного матеріалу при виробництві мінерального добрива.

Після грануляції матеріал необхідно висушити для подачі на пакувальний автомат. Для цього використовують інфрачервоні сушарки, сублімаційні сушарки (висушування матеріалів у замороженому стані в умовах глибокого вакууму) та сушарки псевдо розрідженого (киплячого) шару. З відомих конструкцій таких

сушарок на вітчизняних заводах використовується сушарки фірми «Aeromatic-Fielder» (Швейцарія, GEA Group).

При сушінні в сушарці «Aeromatic-Fielder» потік повітря, засмоктуваного вентилятором у верхню частину каркаса, нагрівається в калорифері до заданої температури, після цього очищається у фільтрі і потрапляє безпосередньо в сушильну камеру, де проходить через резервуар із продуктом знизу вгору, псевдо розріджуючи шар продукту. Далі відпрацьований теплоносієм (вологе повітря) проходить через рукавний фільтр, очищається від дрібних частинок продукту і викидається в атмосферу.

Така сушарка має певні переваги при використанні а саме:

- малий час сушіння матеріалу в залежності від його фізичних властивостей і форми триває від 30 до 60 хв;
- вони споживають менше теплової енергії;
- займають невелику робочу площу.

Перед пакуванням в тару гранули необхідно сушити до залишкової вологості. Пересушені гранули можуть розсипатися при транспортуванні. Недосушені гранули при подальшому пакуванні в упаковки можуть налипати до трубопроводу, що призведе до аварії на виробництві. Також недосушені гранули можуть зліплюватися та перетворюватися в грудки і продукт може втратити товарний вигляд та його буде важче використовувати.

Тому процес сушіння є важливим етапом у виробництві мінерального добрива – амофосу і потребує автоматизації для продуктивного та економічного виробництва.

1.2. Матеріальний та тепловий баланси технологічного об'єкта

Матеріальний баланс

Рівняння матеріального балансу для висушування можуть бути записані незалежно від рівнянь матеріального балансу для сушильного агента (повітря або іншого газу). Схема, представлена на рис. 1.1, необхідна для пояснення складання

рівнянь матеріального балансу сушарки. Під простим сушильним варіантом є варіант, при якому сушильний агент перед надходженням в сушильну камеру нагрівається в зовнішньому калорифері і потім одноразово проходить через сушарку, взаємодіючи при цьому з вологим матеріалом.

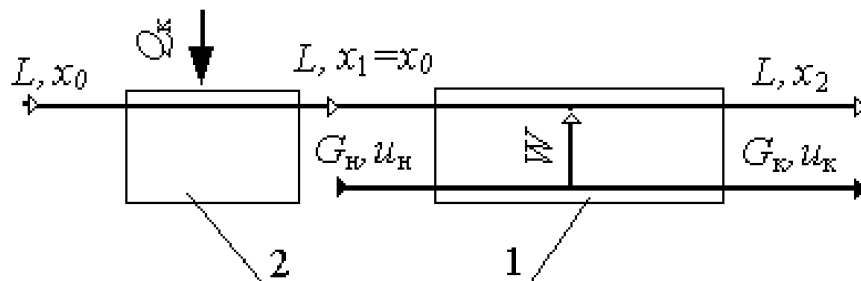


Рис. 1.1. Схема для складання матеріального балансу сушарки: 1-сушарка, 2-калорифер

Введемо такі позначення:

G_H - витрата вологого матеріалу, що надходить в сушарку, кг / с;

G_K - витрата висушеного матеріалу, що виходить із сушарки, кг / с;

W - витрата вологи, що видаляється з вологого матеріалу в сушарці, кг / с;

G - витрата абсолютно сухого матеріалу, кг / с;

u_H і u_K - початкова і кінцева вологість матеріалу, кг вологи / кг вологого матеріалу;

U_H і U_K - початкова і кінцева вологість в розрахунку на масу абсолютно сухого матеріалу, кг вологи / кг сухого матеріалу.

Витрата видаленої вологи визначаємо за рівняннями:

$$W = G_H - G_K; \quad (1.1)$$

$$W = G_H u_H - G_K u_K; \quad (1.2)$$

$$W = G(U_H - U_K); \quad (1.3)$$

$$W = G_H \frac{u_H - u_K}{1 - u_K}. \quad (1.4)$$

Витрата абсолютно сухого матеріалу

$$G = G_H(1 - u_H) = G_K(1 - u_K); \quad (1.5)$$

$$G = \frac{G_H}{1 - U_H} = \frac{G_K}{1 - U_K}. \quad (1.6)$$

Вологість матеріалу в розрахунку на його загальну масу з його вологістю в розрахунку на масу абсолютно сухого матеріалу:

$$U_H = \frac{u_H}{1-u_H}; \quad (1.7)$$

$$U_K = \frac{u_K}{1-u_K}. \quad (1.8)$$

Масова витрати сушильного агенту через сушарку L , (кг/с):

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1}; \quad (1.9)$$

де x_1 і x_2 - вміст вологи в повітрі на вході і на виході із сушарки, кг/кг.

Питома витрата повітря на сушіння l , розраховується:

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_1}. \quad (1.10)$$

Масові витрати вологого повітря на вході і на виході з сушарки відповідно L_1 і L_2 , кг / с,:

$$L_1 = L(1 + x_1) \quad (1.11)$$

$$L_2 = L_1 + W = L(1 + x_2) \quad (1.12)$$

Тепловий баланс

Витрата тепла на сушіння визначається як витрата тепла, що підводиться до сушильного агента в зовнішньому калорифері Q_K , Вт (рис. 1.2),. Витрата тепла розраховується наступним чином.

$$Q_K = L(I_1 - I_0); \quad (1.13)$$

де I_0 і I_1 - ентальпія сушильного агента на вході і виході з калорифера, кДж / кг.

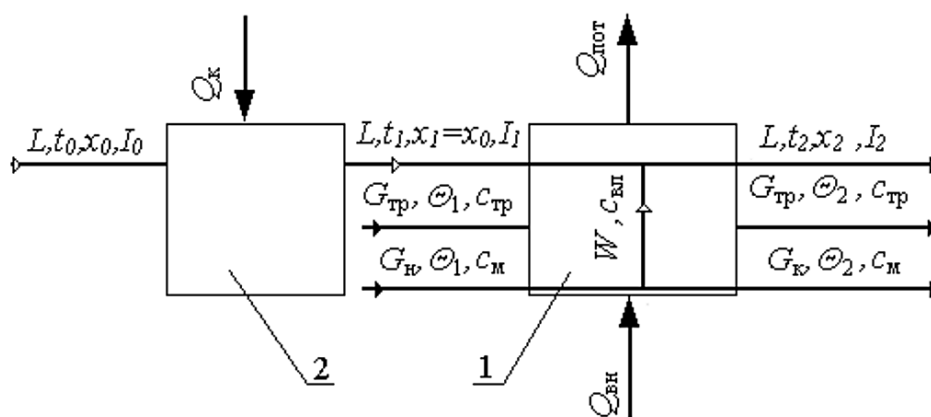


Рис. 1.2. Схема для складання теплового балансу сушарки. 1-сушилка, 2-калорифер

При конвективному сушінні волога з матеріалу випаровується за рахунок відбору тепла від сушильного агента за рахунок його охолодження (зниження

температури) при збільшенні вмісту вологи. За рахунок переходу парів вологи в сушильний агент теплова енергія частково повертається цьому сушильному агенту. І частково вона використовується на підігрівання матеріалу $Q_{\text{мат}}$, та нагріванню транспортних пристроїв сушарки (при їх наявності) $Q_{\text{тр}}$ і у вигляді втрат тепла в навколишнє середовище $Q_{\text{втр}}$. Волога, яка випаровується, передає сушильному агенту свою внутрішню енергію $Q_{\text{вл}}$. Також сушарка може мати внутрішні елементи, які виділяють певну кількість тепла $Q_{\text{вн}}$. Значення згаданих величин $Q_{\text{мат}}$, $Q_{\text{тр}}$ і $Q_{\text{вл}}$, кВт, розраховуються за залежностями:

$$Q_{\text{мат}} = G_{\text{к}} c_{\text{мат}} (\theta_2 - \theta_1); \quad (1.14)$$

$$Q_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} c_{\text{тр}} (\theta_2 - \theta_1); \quad (1.15)$$

$$Q_{\text{вл}} = W c_{\text{вл}} \theta_1; \quad (1.16)$$

де $c_{\text{мат}}$, $c_{\text{тр}}$ і $c_{\text{вл}}$ - питома теплоємність матеріалу, транспортних пристроїв і вологи, кДж / (кг · °С);

θ_1 і θ_2 - температура матеріалу і транспортних пристроїв на вході і на виході з сушарки, °С.

$G_{\text{пр}}$ – витрата транспортних приладів через сушарку, кг/с.

З урахуванням викладеного вище рівняння внутрішнього теплового балансу сушарки записується так:

$$L(I_1 - I_2) = Q_{\text{мат}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{втр}} - Q_{\text{вл}} - Q_{\text{вн}} \quad (1.17)$$

де I_2 – ентальпія сушильного агента на виході із сушарки, кДж/кг.

$$\frac{I_1 - I_2}{x_2 - x_1} = q_{\text{мат}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{втр}} - q_{\text{вл}} - q_{\text{вн}} \quad (1.18)$$

де:

$$q_{\text{мат}} = \frac{G_{\text{к}}}{W} c_{\text{мат}} (\theta_2 - \theta_1); \quad (1.19)$$

$$q_{\text{тр}} = \frac{G_{\text{тр}}}{W} c_{\text{тр}} (\theta_2 - \theta_1); \quad (1.20)$$

$$q_{\text{вл}} = c_{\text{вл}} \theta_1; \quad (1.21)$$

$$q_{\text{втр}} = \frac{Q_{\text{втр}}}{W} \quad (1.22)$$

$$q_{\text{вн}} = \frac{Q_{\text{вн}}}{W}. \quad (1.23)$$

1.3. Визначення та аналіз факторів, що впливають на технологічний процес

Основним завданням сушарки киплячого шару є зменшення вмісту вологи в матеріалі від його початкового значення до необхідного (для різних матеріалів даний вміст вологи різний). Для побудови оптимальної функціональної схеми автоматизації (ФСА) процесу необхідно розглянути і проаналізувати всі фактори, які впливають на процес сушіння.

Основними збуреннями, що впливають на процес сушіння є: зміна витрати, вологість та температура сушильного агента, зміна початкової вологості матеріалу, фізико-хімічні властивості складу частинок твердого матеріалу, а також зміна витрати вологого матеріалу та його початкова температура.

Розглянемо вплив наведених факторів.

Витрата сушильного агента – від цього параметра залежить виникнення і стабільність киплячого шару. Поява киплячого шару визначається тим, що при певній швидкості обтікання частинок матеріалу відбувається їх підвісання в потоці. З врахуванням наведеного сформулюємо умови, які в комплексі визначають межі виникнення і зникнення киплячого шару.

- 1) Умова обтікання вказує на характер взаємодії потоку сушильного агента з твердими частинками матеріалу.
- 2) Умова стиснення характеризує вплив інших частинок на процес обтікання.
- 3) Умова псевдо розрідження характеризує дійсну швидкість здійснення процесу псевдо розрідження.
- 4) Гранична умова – визначає значення поросності для початку киплячого шару. Поросність – це параметр який вказує на проміжки між частинками полідисперсних матеріалів.

Вологість та температура сушильного агента. При конвективному сушінні сушильний агент одночасно є і теплоносієм, і носієм вологи. Відношення цих двох параметрів суттєво впливає на швидкість випаровування і унесення вологи з матеріалу. В загальному чим вища температура сушильного агента, тим менша його вологість і вища швидкість висушування вологого матеріалу, але для більшості

матеріалів які необхідно сушити є максимально допустима температура і перевищення даної температури приведе до виникнення процесів які будуть негативно впливати на процес сушіння. Тому необхідно визначати допустимі співвідношення вологості і температури сушильного агента для ефективного протікання процесу.

На тривалість процесу сушіння значно впливають початкова вологість, хімічний та дисперсний склад матеріалу, а також температура вологого матеріалу.

Витрата сушильного агента необхідно підтримувати в межах від 1700 до 1900 м³/год, при перевищенні даних меж велика частина продукту може видалятися разом з відпрацьованим сушильним агентом за межі сушарки. При недостатньому значенні витрати киплячий шар не буде стійким і сушіння буде відбуватись повільніше і не рівномірно.

Температура киплячого шару має бути в межах 70...90 °С. При зменшенні або збільшенні цієї температури матеріал може або довше сушитися або перегріватися і почати розплавлюватися або розкладатися це приведе до погіршення якості готового продукту.

Перепад тиску на киплячому шарі повинен бути не більше 2500 Па, при збільшенні є ризик винесення великої кількості висушеного матеріалу разом з відпрацьованим сушильним агентом.

Перепад тиску на внутрішніх фільтрах сушарки не повинен перевищувати 800 Па для очищення їх від висушеного продукту.

Технологічна карта процесу наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Технологічна карта процесу

№ п/п	Назва параметру	Одиниця вимірювання	Номінальне значення	Допустимі відхилення
1	Температура киплячого шару	°С	95	±5
2	Витрата сушильного агента	м ³ /год	1800	±100
3	Температура повітря після вологівідділювача	°С	10	±4
4	Перепад тиску на киплячому шарі	Па	<2500	-
5	Перепад тиску на внутрішніх фільтрах	Па	<800	-
6	Продуктивність	кг/цикл	120	-

1.4. Теоретичні основи технологічного процесу в окремих технологічних апаратах і машинах

Для сушіння вологого матеріалу витрачається енергія, яка необхідна для розірвання зв'язків між рідиною (влагою) і висушуваним матеріалом. Зв'язок вологи з матеріалом може бути:

1) механічно зв'язана волога, яка знаходиться в великих капілярах і на зовнішній поверхні матеріалу. Для того щоб видалити таку вологу в процесі термічного сушіння потрібно затратити кількість енергії, яка приблизно рівна теплоті пароутворення рідини;

2) фізико-хімічно зв'язана волога яка міститься в дрібних порах або капілярах. Така волога називається *абсорбційною* вологою. Сюди також відноситься волога за рахунок дифузії в середині кліток матеріалу, вона називається *осмотично зв'язана*.

3) хімічно зв'язана волога яка утримується в матеріалі найбільш міцно і зазвичай не видаляється навіть при нагріванні до температури 120-150 °С. До хімічної відносять *гігрантну* і *кристалізаційну* вологу. При розрахунку сушарки її не враховують.

При сушінні матеріалу протягом певного часу його вологість буде наближатися до певної межі і настання рівноважного стану між його вологістю і вологістю навколишнього середовища. Цьому стану відповідає деяка стійка вологість матеріалу, яка називається рівноважною вологістю і при якій процес сушіння припиняється.

Властивості висушуваного матеріалу прямо впливають на спосіб сушіння для досягнення потрібного вологовмісту і забезпечення необхідної економічності процесу сушіння конкретного матеріалу.

Для сушіння найбільше застосовують *конвективний* метод підведення теплоти. При такому способі сушіння підведення теплоти до продукту для випарювання вологи здійснюється за допомогою сушильного агента, який продувається через шар матеріалу. Сушильним агентом зазвичай є підігріте в калорифері повітря або димові гази. В даному випадку продукт висушуваний безпосередньо контактує з сушильним агентом. Сушильний агент виконує функцію

теплоносія, від нього вологий матеріал отримує теплоту, а також він забирає з собою із зони сушіння випарену вологу із матеріалу. У такий спосіб здійснюється сушіння кускових та дрібнозернистих продуктів.

При *кондуктивному* способі сушіння передача теплоти від сушильного агента до продукту здійснюється через проміжну перегородку. Для такого способу сушіння тепловим агентом є гріюча пара, яка циркулює по трубах або в міжстінному просторі корпусу сушарки. Для сушіння може використовуватися енергія струмів високої частоти (діелектричне сушіння), інфрачервоними променями (радіаційне сушіння).

В харчовій і переробній промисловості сушіння деяких матеріалів здійснюється в замороженому стані під високим вакуумом (сублімація).

Під час конвективного сушіння, сушильний агент віддає тепло матеріалу і водночас забирає молекули рідини з його поверхні.

Як сушильний агент найчастіше використовують нагріте повітря. Для сушіння термостійких, нечутливих до забруднень матеріалів як сушильний агент можуть бути використані димові гази. В особливих випадках як сушильний агент використовують інертні і хімічно пасивні гази і перегріту водяну пару. Основними вимогами, що пред'являються до сушильному агенту, є його доступність і дешевизна, пасивність по відношенню до висушуваного матеріалу і конструкційних матеріалів сушарки.

1.5. Складання структурної схеми взаємозв'язку між технологічними параметрами об'єкта

Структурна схема сушарки киплячого шару зображена на рисунку 1.3.

Вихідні (регульовані) параметри).

$T_{п.п.в}$ — температура повітря після вологовідділювача;

$T_{с.а.}$ – температура сушильного агента;

$T_{к.ш.}$ – температура киплячого шару;

$F_{с.а.}$ – витрата сушильного агента.

Вхідні параметри (матеріальні або енергетичні потоки):

$F_{х.в.}$ – витрата холодної води;

$K_{т.б.}$ – співвідношення відкриття заслінок трубопроводу через теплообмінник та через лінію байпасування;

$F_{п.б.к.с.}$ – витрата повітря через байпас камери сушарки.

Збурюючі фактори, які можна контролювати:

$T_{п.}$ – первинна температура повітря;

$T_{х.в.}$ – температура холодної води;

$T_{пари.}$ – температура пари;

$F_{пари}$ – витрата пари.

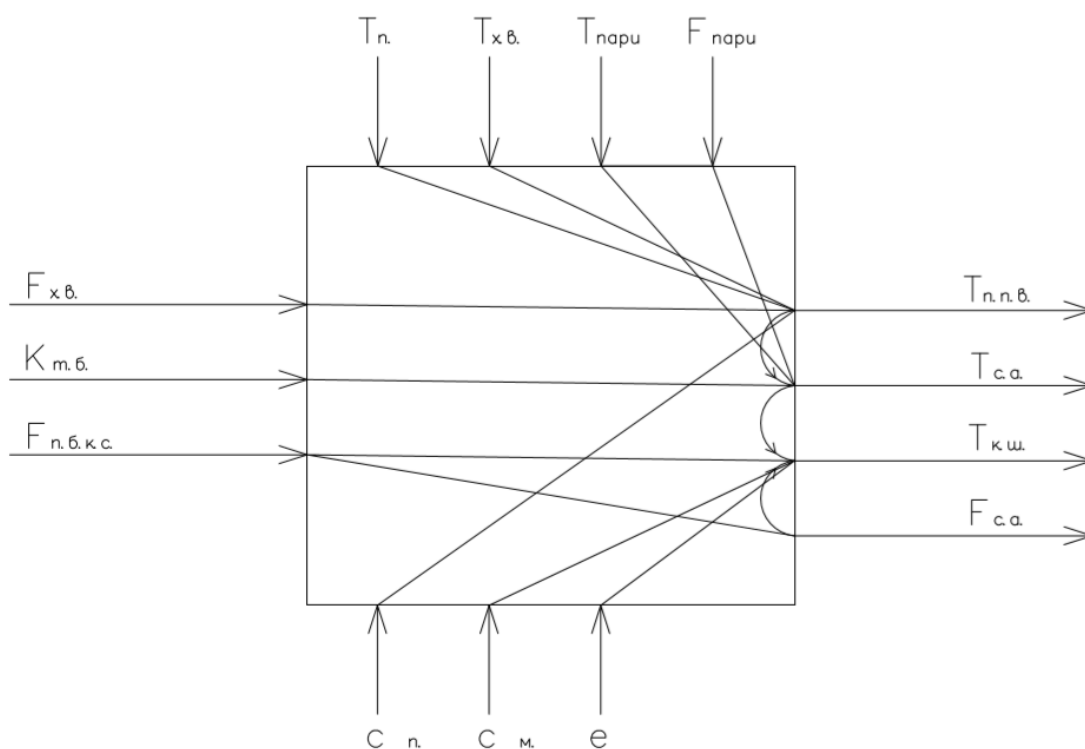


Рис. 1.3. Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами сушарки киплячого шару

Збурюючі фактори, які не можна контролювати:

$c_{п.}$ – питома теплоємність повітря;

$c_{м.}$ – питома теплоємність матеріалу;

e – гранулометричний склад вологого матеріалу.

2. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ В СУШАРЦІ КИПЛЯЧОГО ШАРУ

2.1. Аналіз статичних та динамічних характеристик об'єкта по окремих каналах зв'язку

Основні параметри, які підлягають регулюванню: температура повітря після вологовідділювача, температура сушильного агента, витрата сушильного агента, температура киплячого шару.

Вхідними параметрами, якими вносять регулюючі дії, є: витрата холодної води, співвідношення відкриття заслінок трубопроводу через теплообмінник та через лінію байпасування, відкриття заслінки на трубопроводі байпасування камери сушарки.

Також слід враховувати збурення, що впливають на процес: початкова температура повітря, температура холодної води, температура пари.

Проведемо детальний аналіз статичних і динамічних характеристик об'єкта по окремих каналах зв'язку для оцінювання швидкості і характеру зміни вихідних параметрів при зміні вхідних. Для вибору регулюючих і регульованих координат необхідно оцінити значення динамічних параметрів досліджуваного об'єкта каналами збурення та виконати оцінку динамічних властивостей контурів регулювання. Для цього необхідно:

1) Підтримувати температуру повітря після вологовідділювача. При зміні температури повітря, яке подається в теплообмінник система регулювання змінить витрату холодної води.

2) Підтримувати значення температури сушильного агента. При зміні температури в трубопроводі подачі сушильного агента система регулювання буде змінювати витрату повітря через теплообмінник. Даний контур характеризується малою інерційністю та швидкою зміною вихідного параметра.

3) Підтримувати витрату сушильного агента, що подається під в днище сушарки. При зміні витрати сушильного агента буде змінювати ступінь відкриття

заслінки на трубопроводу і змінюватися витрата сушильного агента. Контур має дуже малу інерційність і швидку зміну вихідного параметр, оскільки витрата є мало інерційним параметром.

4) Підтримувати температуру киплячого шару. При зміні температури в киплячому шарі або зміні температури сушильного агента на виході з сушарки буде змінюватися значення вологості висушуваного продукту.

Вимірюванню підлягають параметри, за значеннями яких проводиться керування процесом, його пуск та зупинка.

Параметри які необхідно вимірювати:

- температура після вологовідділювача;
- температура сушильного агента;
- температура киплячого шару;
- витрата сушильного агента;
- перепад тиску на фільтрах сушарки;
- перепад тиску на киплячому шарі;
- вологість сушильного агента після вологовідділювача;
- вологість сушильного агента на виході з сушарки.

Регулювати підлягають параметри, які впливають на протікання технологічного процесу.

Параметри, які необхідно регулювати:

- температура після вологовідділювача;
- температура сушильного агента;
- температура киплячого шару;
- титрата сушильного агента;

Сигналізації підлягають параметри, відхилення яких може призвести до виходу процесу за межі регламентного режиму та виникненні аварійних ситуацій:

- температура киплячого шару;
- перепад тиску на фільтрах сушарки;
- перепад тиску на киплячому шарі.

Контролю підлягають такі параметри:

- температура після вологовідділювача;
- температура сушильного агента;
- температура киплячого шару;
- витрата сушильного агента;
- перепад тиску на фільтрах сушарки;
- перепад тиску на киплячому шарі;
- вологість сушильного агента після вологовідділювача;
- вологість сушильного агента на виході з сушарки.

При спрацюванні сигналізації персонал повинен вжити відповідні заходи що до ліквідації аварії. Якщо при досягненні параметром процесу значення, що перевищує допустиме, повинна спрацювати система аварійного захисту, яка повертає процес в режим нормального функціонування, а якщо це не є можливим, то автоматично припиняє протікання технологічного процесу. Для уникнення аварійних ситуацій.

Параметри, при відхиленні яких повинен спрацювати захист:

- температура киплячого шару;
- витрата сушильного агента;
- перепад тиску на киплячому шарі.

2.2. Синтез оптимальної спрощеної схеми автоматизації для заданих умов роботи об'єкта

Аналіз існуючих схем автоматизації сушарок киплячого шару показав, що оптимальною можна вважати функціональну схему автоматизації (ФСА), яка зображена на рисунку 2.1.

Дана ФСА забезпечує надійну та безаварійну роботу основного технологічного обладнання та забезпечує оптимальні показники вологості амофосу.

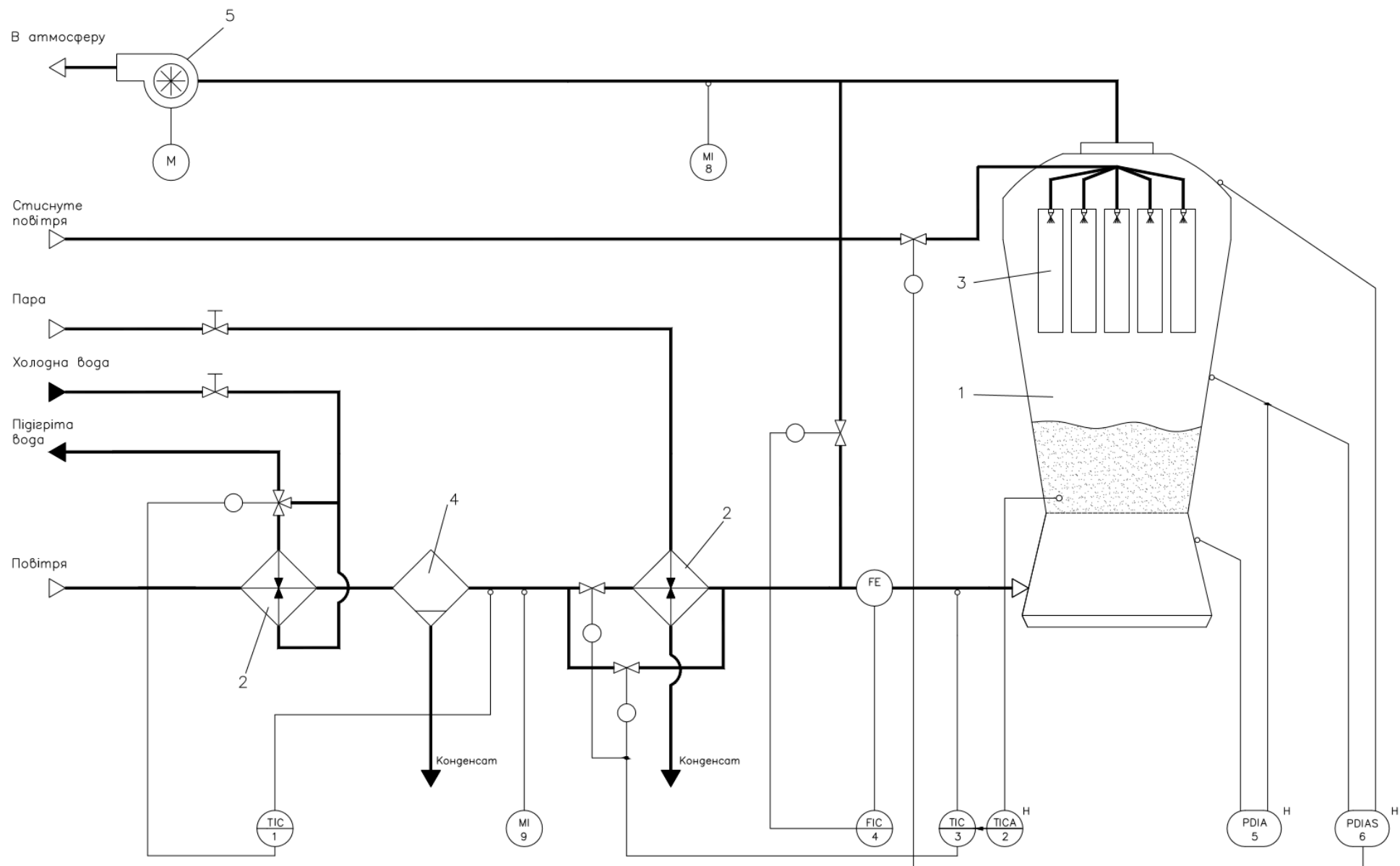


Рис. 2.1. Спрощена функціональна схема автоматизації сушарки киплячого шару

На даній ФСА зображено таке технологічне обладнання

- 1- Сушарка киплячого шару.
- 2- Теплообмінник.
- 3- Внутрішні фільтри сушарки.
- 4- Вологовідділювач.
- 5- Вентилятори.

Системи автоматичного регулювання (САР) містить такі контури регулювання:

- 1- САР температури після вологовідділювача.
- 2- САР температури киплячого шару.
- 3- САР температури сушильного агента.
- 4- САР витрати сушильного агента.

2.3. Вибір локальних засобів автоматизації

Для реалізації даної системи автоматизації вибрано наведені нижче локальні засоби автоматизації.



Рис. 2.2. Клапан Siemens VXF42.50

Триходовий фланцевий сідловий клапан для регулювання потоків тепло- і холодоносія. Його застосовують у водяних контурах установок для підготовки повітря та у водяних контурах установок опалення.

Технічні характеристики:

- Робоче середовище - холодна або гаряча вода.
- Температура середовища: $-25 \div 150$ °С.
- Відносний тиск : 1600 кПа.
- Характеристика потоку: зона 30-100%: рівно відсоткова,
зона 0-30%: лінійна.
- Трубне з'єднання фланцеве.
- Допустимі положення: вертикально або горизонтально.
- Не потребує технічного обслуговування.
- Умовний діаметр 50 мм.
- Довжина штоку: 20 мм.



Рис. 2.3. Електропривід Siemens SAX61.03

Електропривід для управління клапанами з ходом штоку 20 мм.

Технічні характеристики:

- Напруга живлення: 24 В постійного/змінного струму.
- Частота напруги живлення: 50 Гц;
- Електричне підключення: клемна колодка.

- **Управління:**

Керуючий сигнал: 0 – 10 В, 4 - 20 мА, 0-1000 Ом.

- Напруга зворотнього зв'язку: 0 – 10 В.
- Зусилля: 800 Н
- Ручне управління: натиснути і зафіксувати.
- Хід штоку: 20 мм.
- Час ходу штоку: 30 с/ 20 мм.
- Ступінь захисту від води та пилу: IP54.
- Температура експлуатації: $-5 \div 55$ °С.



Рис. 2.4. Поворотна заслінка Siemens VKF46.200

Призначена для перекриття або дроселювання потоків в трубопроводах. Її застосовано для регулювання витрати сушильного агента в камеру сушарки, а також для регулювання температури сушильного агента

Технічні характеристики:

- Робоче середовище: холодна або гаряча вода, морська вода, пом'якшена вода.
- Температура середовища: $-10 \div 120$ °С.
- Відносний тиск : 1600 кПа.
- Трубне з'єднання фланцеве.
- Допустимі положення: вертикально або горизонтально.
- Умовний діаметр: 200 мм.



Рис. 2.5. Електропривід Siemens SAL61.00T40

Застосовано для керування повітряними заслінками в камері змішування потоків сушильного агента та для регулювання витрати сушильного агента в камеру сушарки.

Технічні характеристики:

- Напруга живлення: 24 В постійного/змінного струму.
- Управління: керуючий сигнал: 0 – 10 В, 4 – 20 мА, 0 – 1000 Ом.
- Напруга зворотнього зв'язку: 0 – 10 В.
- Зусилля: 40 Нм
- Напрямок повороту: вибирається перемикачем.
- Ручне управління: затискання і утримання кнопки на корпусі приводу.
- Кут повороту: 90 °
- Час повороту: 90 °/150 с.
- Ступінь захисту від води та пилу: IP54.
- Температура експлуатації: -15 ÷ 55 °С.



Рис. 2.6. Електромагнітний клапан FESTO VZWD-L-M22C-M

Застосовано для подачі стисненого повітря у внутрішні фільтри сушарки для їх продування.

Технічні характеристики:

- Напруга живлення: 24 В постійного/змінного струму.
- Функція клапану: 2/2-розподільювач, нормально закритий.
- Тип повернення: механічна пружина.
- Умовний прохід: 6 мм.
- Температура робочого середовища: $-15 \div 80$ °С.
- Ступінь захисту від води та пилу: IP65.
- Температура експлуатації: $-15 \div 35$ °С.



Рис. 2.7. Цільна захисна гільза TW50

Призначена для встановлення в бокову стінку камери сушарки.

Технічні характеристики:

Глибина занурення : 73 мм.

Діаметр внутрішнього отвору: 7 мм.



Рис. 2.8. Термоперетворювач опору WIKA TR10-B

Встановлюється в бокову стінку камери сушарки в захисну гільзу TW50.

Технічні характеристики:

- Чутливий елемент: НСХ Pt100, трипровідне під'єднання.

- Клас точності AA згідно ДСТУ 6651-2014.
- Робочий діапазон: $0^{\circ}\text{C} \dots +150^{\circ}\text{C}$,
- Перетворювач: вихідний сигнал $4 \dots 20$ мА, трипровідний
- Глибина занурення: 70 мм.
- Діаметр вимірювальної вставки: 6 мм.
- Місце встановлення перетворювача: вимірювальна вставка .
- Допустима температура навколишнього середовища: $-40^{\circ}\text{C} \dots 85^{\circ}\text{C}$.



Sumam™

Рис. 2.9. Давач для вимірювання температури та вологості Siemens

QFM2171

Технічні характеристики:

- Живлення: 24 В постійного/змінного струму.
- Чутливий елемент: NTC 10 кОм .
- Робочий діапазон: $-35^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$, 0 – 100%,.
- Похибка: 5% відносної вологості та 1°C температури.
- Захист: IP65
- Вихідний сигнал: 4-20 мА для температури та вологості.
- Клас захисту: IP 54, III
- Довжина занурення: 90-154 мм
- Діаметр вимірювальної вставки: 15 мм.
- Місце встановлення перетворювача: вимірювальна вставка.
- Допустима температура навколишнього середовища: $-15^{\circ}\text{C} \dots 60^{\circ}\text{C}$.



Рис. 2.10. Термоперетворювачопору з фланцевою гільзою WIKA TR10-D

Призначений для встановлення в корпус системи підготовки сушильного агента в трубопровід його подачі на вході в сушарку.

Технічні характеристики:

- Чутливий елемент: НСХ Pt100, двопровідний.
- Клас точності: АА, згідно ДСТУ 6651-2014.
- Робочий діапазон: $-50^{\circ}\text{C} \dots +250^{\circ}\text{C}$.
- Захист: IP65
- Перетворювач: Т91.20, аналоговий, вихідний сигнал $4 \dots 20 \text{ mA}$, двопровідний.
- Глибина занурення: 100 мм.
- Діаметр вимірювальної вставки: 6 мм.
- Довжина вимірювальної вставки 190 мм.
- Місце встановлення перетворювача: вимірювальна вставка.
- Допустима температура навколишнього середовища: $-40^{\circ}\text{C} \dots 85^{\circ}\text{C}$.



Рис. 2.11. Диференційний манометр з електроконтактами

WIKA модель DPGS42.1x0

Застосовано для вимірювання та сигналізації перепаду тиску на фільтрах у верхній частині сушарки.

- Основна похибка: 3 % від верхньої границі вимірювання.

- Номінальний розмір: 160 мм.
- Діапазон вимірювання: від 0 до 1600 Па.
- Температура вимірюваного середовища від -40 до +100 °С.
- Температура навколишнього середовища від -20 до +60 °С.



Рис. 2.12. Диференційний манометр з електроконтактами

WIKA модель DPGS42.1x0

Застосовано для вимірювання та сигналізації перепаду тиску на киплячому шарі.

Технічні характеристики:

- Основна похибка: 3 % від верхньої границі вимірювання.
- Номінальний розмір: 160 мм.
- Діапазон вимірювання: від 0 до 4000 Па.
- Температура вимірюваного середовища від -40 до +100 °С.
- Температура навколишнього середовища від -20 до +60 °С.



Рис. 2.13. Труба Вентурі спеціального виконання

Призначена для вимірювання витрати в трубопроводі подачі сушильного агента.

Технічні характеристики:

- Умовний тиск: 10 кгс/см².
- Умовний діаметр: 300 мм



*Рис. 2.14. Вимірювальний перетворювач диференціального тиску
Sitrans P Серія DS III*

Застосовано для вимірювання витрати сушильного агента

Технічні характеристики:

- Діапазон вимірювання: від 8.3 до 250 мбар.
- Максимальний допустимий робочий тиск: 160 бар.
- Вихідний сигнал: 4 – 20 мА.
- Нижня границя: 3.84 мА.
- Верхня границя: 20.5 мА.
- З HART-комунікацією
- Витратна характеристика: лінійно зростаюча.
- Зовнішні температурні умови: -20 до +85 °С.
- Параметри вимірюваного середовища: -40 до +100 °С.
- Клас захисту: IP65.
- Індикатор: з цифровим індикатором даних.

2.4.Вибір мікропроцесорних засобів автоматизації.

Для реалізації даної схеми автоматизації обрано програмовано-логічний контролер Siemens Simatic S7-1200 з двома модулями розширення SM 1234.

Загальний вигляд програмовано-логічного контролера Siemens Simatic S7-1200 наведено на рисунку 2.15.



Рис.2.15. Мікропроцесорний контролер Siemens Simatic S7-1200

Siemens Simatic S7-1200 - це нове сімейство мікроконтролерів для вирішення різних завдань автоматизації малого рівня. Ці контролери мають модульну конструкцію і універсальне призначення. Вони працюють в реальному часі, можуть застосовуватися для побудови відносно простих вузлів локальної автоматики або вузлів комплексних систем автоматичного управління, що підтримують інтенсивний комунікаційний обмін даними через мережі Industrial Ethernet / PROFINET, а також PtP (Point-to-Point) з'єднання.

Програмовані контролери S7-1200 мають компактний пластиковий корпус із ступенем захисту IP20, можуть монтуватися на стандартну 35 мм профільну шину DIN або на монтажну плату і працюють в діапазоні температур навколишнього середовища від 0 до +50 ° С. Вони здатні обслуговувати від 10 до 284 дискретних і від 2 до 51 аналогового каналу вводу-виводу. При однакових з S7-200 конфігураціях вводу-виводу контролер S7-1200 займає на 35% менший монтажний об'єм. До центрального процесора (CPU) контролера S7-1200 можуть бути підключені комунікаційні модулі (CM); сигнальні модулі (SM) і сигнальні плати (SB) вводу-виводу дискретних і аналогових сигналів. Спільно з ними використовуються 4-канальний комутатор Industrial Ethernet (CSM 1277) і модуль блоку живлення (PM 1207).

Функціональні особливості

Всі центральні процесори мають високу продуктивність і забезпечують підтримку широкого набору функцій:

- Програмування на мовах LAD і FBD, що дає змогу реалізувати системи будь-якої складності.
- Висока швидкодія, час виконання логічної операції не перевищує 0.1 мкс.
- Вбудована завантажувана пам'ять об'ємом до 2 Мбайт, що розширюється картою пам'яті ємністю до 24 Мбайт.
- Робоча пам'ять ємністю до 50 Кбайт.
- Незалежна пам'ять ємністю 2 Кбайт для роботи без обслуговування збереження даних при перебоях в живленні контролера.
- Вбудовані дискретні входи універсального призначення, що дозволяють вводити потенційні або імпульсні сигнали.
- Вбудований апаратний годинник реального часу з запасом ходу при перебоях в живленні 240 годин.
- Вбудовані швидкісні лічильники з частотою проходження вхідних сигналів до 100 кГц.
- Вбудовані імпульсні виходи з частотою проходження імпульсів до 100 кГц (тільки в CPU з транзисторними виходами).
- Підтримка функцій ПД регулювання.
- Підтримка функцій управління переміщенням відповідно до вимог стандарту PLCopen.
- Підтримка функцій оновлення операційної системи.
- Парольний захист програми користувача.
- Вільно програмовані порти для обміну даними з іншими пристроями на комунікаційних модулях CM 1241.

Сигнальні модулі SM

Сигнальні модулі (модулі розширення) дозволяють адаптувати контролер до вимог розв'язуваної задачі. Вони дозволяють збільшувати кількість входів і виходів, з якими працює центральний процесор, доповнювати систему введення-виведення

дискретними і аналоговими каналами з необхідними параметрами вхідних і вихідних сигналів. Сигнальні модулі встановлюються праворуч від центрального процесора і можуть підключатися тільки до CPU 1212C і CPU 1214C. Підключення до внутрішньої шини контролера виконується за допомогою висувних штекерів, вмонтованих в кожен модуль SM. Підключення зовнішніх ланцюгів виробляється через знімні термінальні блоки з контактами під гвинт. До складу сигнальних модулів входять 8- і 16-канальні модулі введення і модулі виведення дискретних сигналів, 16- і 32-канальні модулі введення-виведення дискретних сигналів, 4-канальні модулі введення і 2-канальні модулі виведення аналогових сигналів, а також модуль введення -виведення аналогових сигналів з 4 входами і 2 виходами.

Сигнальні плати SB

За своїм призначенням сигнальні плати аналогічні сигнальним модулям. Вони встановлюються в спеціальний відсік на фронтальній панелі центрального процесора і не змінюють розмірів корпусу. Сигнальні плати можуть використовуватися з усіма типами центральних процесорів. Одночасно можна використовувати одну сигнальну плату.

Комутаційні модулі CM 1241

Комунікаційні модулі CM 1241 дозволяють встановлювати PtP з'єднання між контролером S7-1200 і контролерами інших виробників, принтерами, сканерами, модемами, тощо. Модулі мають два виконання з вбудованим послідовним інтерфейсом RS 232 або RS 485. Обидва модуля забезпечують підтримку протоколів ASCII і Modbus RTU (провідне або ведене пристрій). Додатково модуль CM 1241 з інтерфейсом RS 485 забезпечує підтримку протоколу USS. Всі команди для управління обміном даними вбудовані в систему команд контролера. Комунікаційні модулі встановлюються зліва від центрального процесора і підключаються до його внутрішньої шини через вбудовані в кожен модуль з'єднувачі. Вони можуть працювати з усіма типами центральних процесорів.

Типи центрального процесора

У контролері S7-1200 використовується 3 моделі центральних процесорів, що відрізняються продуктивністю, обсягами вбудованої пам'яті, кількістю і видом

вбудованих входів і виходів і іншими показниками. Кожна модель має три модифікації:

- 3 напругою живлення = 24 В, дискретними входами = 24 В і дискретними виходами = 24 В / 0.5А на основі транзисторних ключів.
- 3 напругою живлення = 24 В, дискретними входами = 24 В і дискретними виходами з замикаючими контактами реле і здатністю навантаження до 2 А на контакт.
- 3 напругою живлення ~ 115/230 В, дискретними входами = 24 В і дискретними виходами з замикаючими контактами реле і здатністю навантаження до 2 А на контакт.
- Кожен центральний процесор S7-1200 оснащений вбудованим інтерфейсом Ethernet, який використовується для програмування та діагностики, обміну даними з іншими системами автоматизації, пристроями та системами людино-машинного інтерфейсу. Для одного процесорного модуля можна конфігурувати 16 різних комбінацій для обміну даними. Для організації обміну даними можуть використовуватися транспортні протоколи TCP / IP, ISO на TCP і S7 функції зв'язку (S7 сервер або S7 клієнт). При необхідності в складі контролера може використовуватися найпростіший 4-канальний комутатор Industrial Ethernet типу CSM 1277, виконаний у форматі модулів S7-1200.
- Всі центральні процесори допускають підключення до трьох комунікаційних модулів і установку однієї сигнальної плати (SB) введення-виведення. Додатково до CPU 1212C може підключатися до 2, до CPU 1214C - до 8 сигнальних модулів (SM). Всі типи центральних процесорів оснащені двома аналоговими входами, набором дискретних входів і виходів, а також блоком живлення датчиків з вихідним напругою = 24 В. Підключення зовнішніх ланцюгів виконується через знімні термінальні блоки з контактами під гвинт.

Додаткові компоненти:

Крім модулів центральних процесорів, сигнальних модулів і плат в складі програмованого контролера S7-1200 можуть використовуватися:

- Блок живлення PM 1207 з вхідною напругою $\sim 115/230$ В, вихідним напругою $= 24$ В і номінальним струмом навантаження 2.5 А.
- Некерований комутатор Industrial Ethernet CSM 1277: 4xRJ45, 10/100 Мбіт / с.
- Карти пам'яті SIMATIC Memory Card ємністю 2 або 24 Мбайт для розширення завантажуються пам'яті контролера.
- Імітатори з вбудованими перемикачами для імітації вхідних дискретних сигналів центрального процесора в процесі налагодження програми.

Апаратура людино-машинного інтерфейсу:

Для вирішення завдань оперативного управління і моніторингу в поєднанні з програмованими контролерами S7-1200 рекомендується використовувати базові панелі операторів SIMATIC, оснащені вбудованим інтерфейсом Ethernet.

2.5. Розробка принципових електричних схем зовнішніх з'єднань мікропроцесорних засобів

У даному розділі розглядається принципова електрична схема зовнішніх з'єднань контролера Siemens S7-1214C з модулем розширення SM 1234 для основних технічних засобів автоматизації, що застосовані при автоматизації даного технологічного процесу.

Живлення контролера здійснюється напругою 24 В, яка надходить від блоку живлення.

На рисунках 2.16 -2.21 показано принципові електричні схеми зовнішніх з'єднань контролера з вимірювальними перетворювачами температури за дво- і трипровідними схемами, електроприводом Belimo Siemens SAX81.03, електроприводом Siemens SAL61.00T40, диференціального манометра Wika DGS42.1x0 і вимірювального перетворювача диференціального тиску Sitrans P Серія DS III.

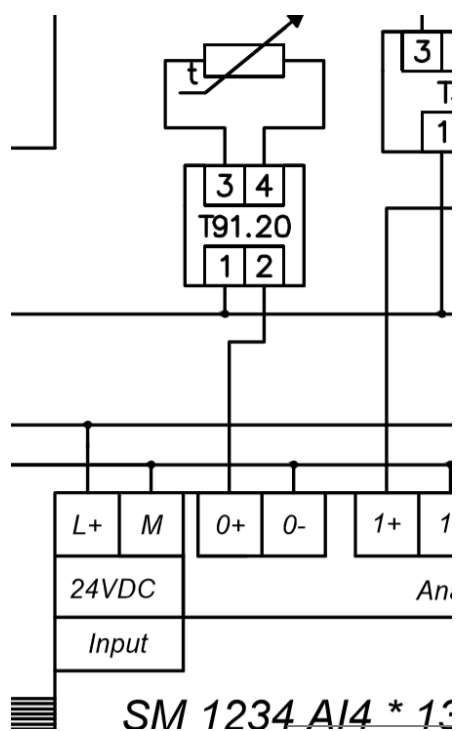


Рис.2.16.Схема під'єднання вимірювального перетворювача температури T91.20

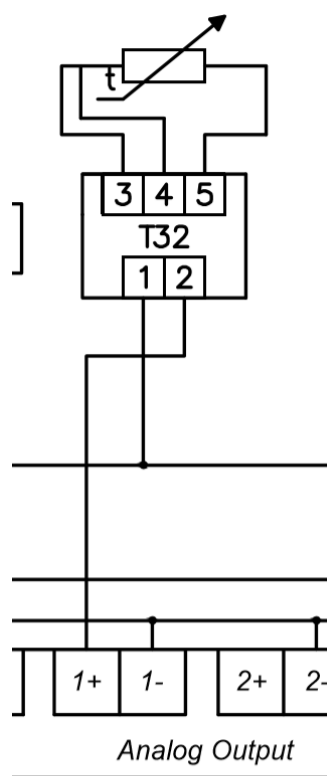


Рис.2.17.Схема під'єднання вимірювального перетворювача температури T32

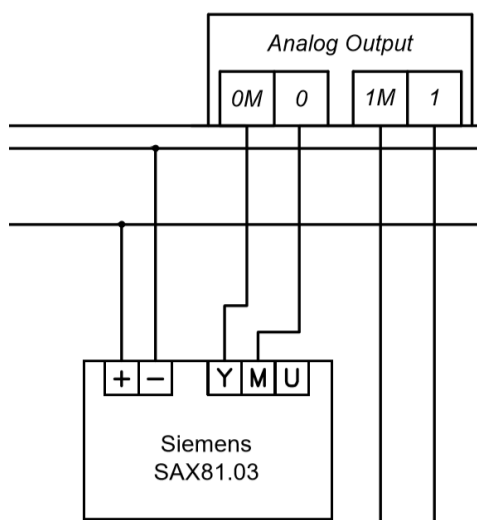


Рис.2.18.Схема під'єднання електроприводу Belimo Siemens SAX81.03

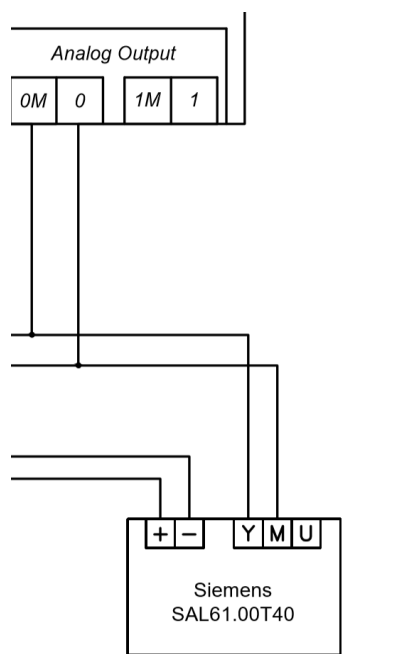


Рис.2.19.Схема під'єднання електроприводу Siemens SAL61.00T40

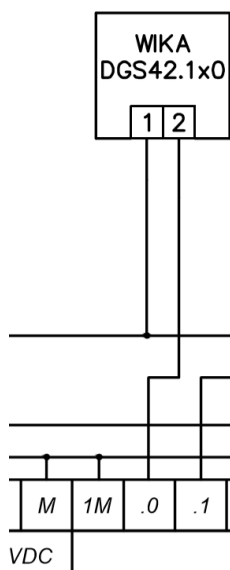


Рис.2.20.Схема під'єднання диференціального манометра WIKA DGS42.1x0

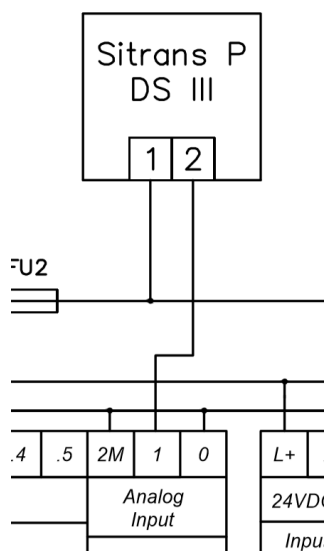


Рис.2.21.Схема під'єднання вимірювального перетворювача диференціального тиску Sitrans P Серія DS III

3. РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1. Складання та розрахунок параметрів математичної моделі об'єкта регулювання

Математичну модель об'єкта регулювання для розрахунків оптимальних параметрів налаштування регулятора знаходимо у вигляді функції передачі.

Для підтримання оптимального значення температури в киплячого шару сушарки доцільно застосувати каскадну систему регулювання.

За експериментальними даними знайдено передавальну функцію каналом збурюючої дії: $W_z = \frac{0.038}{(17.111p+1)^2} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{м}^3/\text{год}}$.

Збуренням є зміна витрати сушильного агента через камеру сушарки на 100 м³/год.

Значення зміни температури в часі для отримання кривої розгону при стрибкоподібній зміні регулюючої дії на 15% ходу регулюючого органу (РО) на лінії подачі сушильного агента наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Значення температури сушильного агента, отримані стрибкоподібною зміною регулюючої дії на 15% ходу РО:

t,c	T°C
0	70.00
2.5	70.29
5.0	70.73
7.5	71.30
10.0	72.41
12.5	74.11
15.0	75.20
17.5	77.60
20.0	78.05
22.5	79.31
25.0	80.93
27.5	81.41
30.0	82.11
32.5	82.32
35.0	82.83
37.5	83.24
40.0	83.63

42.5	83.84
45.0	83.91
47.5	84.01
50.0	84.04
52.5	84.09
55.0	84.01
57.5	84.12
60.0	84.05
62.5	83.98
65.0	84.03
67.5	84.01
70.0	84.03

Перехідний процес (крива розгону) зміни температури сушильного агента отриманий із експериментальних (практичних) даних має вигляд (рисунок 3.1):

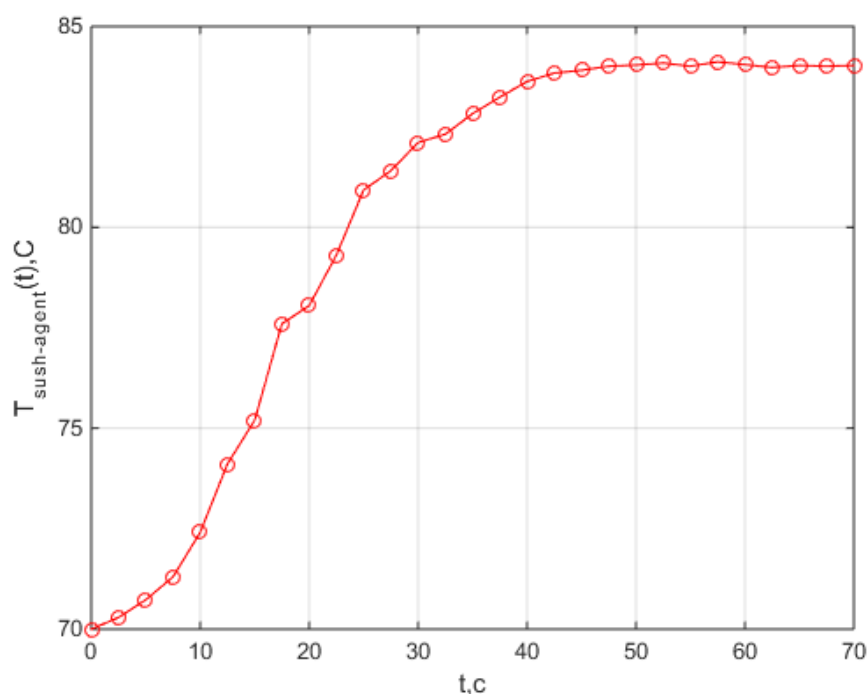


Рис.3.1. Крива розгону температури сушильного агента, отримана стрибкоподібною зміною відкриття РО на 15%

За виглядом кривої розгону, робимо висновок, що дана крива може бути послідовним з'єднанням декількох аперіодичних ланок з різними коефіцієнтами.

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)^n},$$

де k - коефіцієнт передачі аперіодичної ланки, T - стала часу, τ час запізнення, n – кількість аперіодичних ланок.

Знаходимо параметри передавальної функції об'єкта регулювання за допомогою функції *fminsearch* :

```
clc; clear all;
te=0:2.5:70;
yek=[70 70.29 70.73 71.30 72.41 74.11 75.2 77.6 78.05 79.31 80.93 81.41
82.11 82.32 82.83 83.24 83.63 83.84 83.91 84.01 84.04 84.09 84.01 84.12
84.05 83.98 84.03 84.01 84.03 ];
yn=70;
dy=84-yn;
dx=15;
hek=(yek-yn)/dy;
t_i=0:70;
hek_i=interp1(te,hek,t_i);
```

```
x0=[10 10];
x=fminsearch('funk',x0);
T1=x(1);
T2=x(2);
k=dy/dx;

% побудова кривої розгону за розрахованими k і T
W1=tf(1, [T1 1]);
W2=tf(1, [T2 1]);
W=W1*W2*W2*W2;
hroz=step(W,t_i);

y=hroz*dx*k+yn;
ye=hek_i*dx*k+yn;
del=max(abs(y'-ye))/dy*100;
sig=sqrt(sum((y'-ye).^2)./length(t_i))

% порівняння кривої розгону знайденої числовими методами і
% експериментальної
figure(1);plot(t_i,y,'k',te,yek,'o');grid;
xlabel('t,c');ylabel('T_s_a,C');

function s=funk(x)

te=0:2.5:70;
yek=[70 70.29 70.73 71.30 72.41 74.11 75.2 77.6 78.05 79.31 80.93 81.41
82.11 82.32 82.83 83.24 83.63 83.84 83.91 84.01 84.04 84.09 84.01 84.12
84.05 83.98 84.03 84.01 84.03 ];

yn=70;
dy=84-yn;
```

```

hek=(yek-yn)/dy;
t_i=0:0.5:70;
hek_i=interp1(te,hek,t_i);
T1=x(1); T2=x(2);
W1=tf(1, [T1 1]);
W2=tf(1, [T2 1]);
W=W1*W2*W2*W2;
hroz=step(W,t_i);
s=sum((hroz'-hek_i).^2);
end

```

Результатом виконання програми є знаходження значення параметрів та графік порівняння експериментальної і апроксимованої кривих розгону (рисунок 3.2):

$T1 = 7.4994$

$T2 = 3.9084$

$k = 0.9333$

$del = 2.9573.$

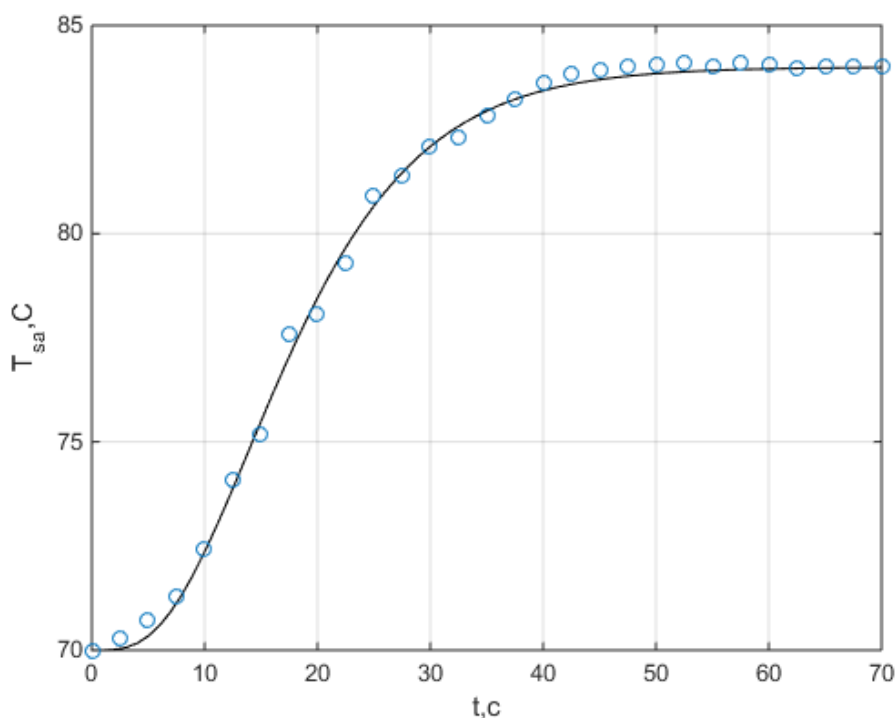


Рис.3.2. Порівняння перехідних процесів зміни температури сушильного агента при стрибкоподібній зміні відкриття РО на 15% : «o» - експериментальна крива розгону; «-» - апроксимована крива

Точність апроксимації для об'єктів із самовирівнюванням вважається задовільною, якщо зведена похибка δ не перевищує 4%.

Максимальна зведена похибка $\delta = 2.9573\%$. Оскільки вона не перевищує 4%, то робимо висновок, що знайдена модель адекватна заданій експериментальній кривій розгону.

Отже, передавальна функція об'єкта регулювання має вигляд:

$$W(p) = \frac{0.9333}{(7.4994p + 1)(3.9084p + 1)^3}$$

Дані для кривої розгону зміни температури киплячого шару при стрибкоподібній зміні регулюючої дії на 15% ходу РО наведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

**Зміни температури киплячого шару при стрибкоподібній зміні
регулюючої дії на 15% ходу РО**

t,с	T°C
0	55.00
10	55.06
20	55.07
30	56.01
40	57.81
50	60.11
60	62.15
70	63.32
95	64.05
110	64.41
125	64.80
145	64.92
160	65.03
175	64.99
190	65.01

Перехідний процес зміни температури киплячого шару за експериментальними даними наведено на рисунку 3.3.

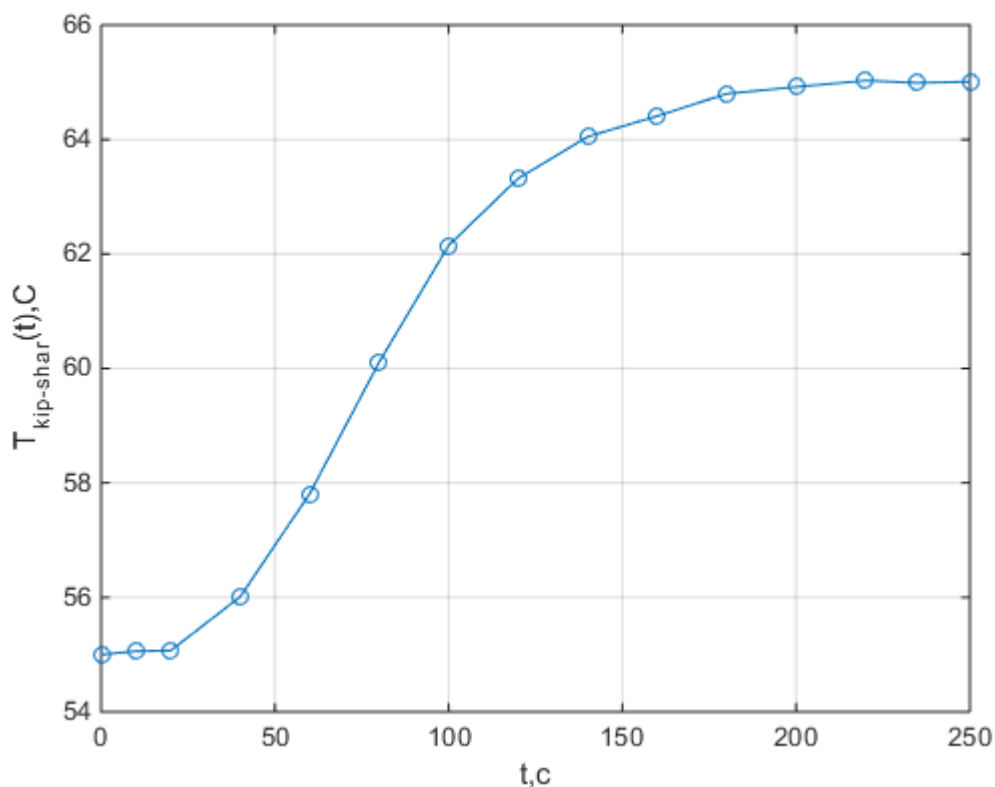


Рис.3.3 . Крива розгону зміни температури киплячого шару при стрибкоподібній зміні відкриття РО на 15%

За виглядом кривої розгону, можемо припустити, що дана крива може бути послідовним з'єднанням декількох аперіодичних ланок з різними коефіцієнтами.

$$W(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{(Tp + 1)^3}$$

де k - коефіцієнт передачі аперіодичної ланки, T - стала часу, τ час запізнення, n – кількість аперіодичних ланок.

Знаходимо параметри функції передачі об'єкта регулювання за допомогою функції `fminsearch` :

```
clc; clear all;
te=[0 10 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 235 250];
yek=[55 55.06 55.07 56.01 57.81 60.11 62.15 63.32 64.05 64.41 64.80
64.92 65.03 64.99 65.01];
yn=55;
dy=65-yn;
```

```

dx=15;
hek=(yek-yn)/dy;
t_i=0:250;
hek_i=interp1(te,hek,t_i);

x0=[10 10 10];
x=fminsearch('funkks',x0);
T1=x(1);
T2=x(2);
T3=x(2);
k=dy/dx;
tau=15;
[n d]=pade(tau,10);

% побудова кривої розгону за розрахованими k і T
W1=tf(1, [T1 1]);
W2=tf(1, [T2 1]);
W3=tf(1, [T3 1]);
Wzap1=tf(n,d);
W=W1*W2*W3*Wzap1;
hroz=step(W,t_i);

y=hroz*dx*k+yn;
ye=hek_i*dx*k+yn;
del=max(abs(y'-ye))/dy*100;
sig=sqrt(sum((y'-ye).^2)./length(t_i))

% порівняння кривої розгону знайденої числовими методами і
% експериментальної
figure(1);plot(t_i,y,'k',te,yek,'o');grid;
xlabel('t,c');ylabel('T_k_s_h,C');

```

```

function s=funk(x)

te=[0 10 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 235 250];
yek=[55 55.06 55.07 56.01 57.81 60.11 62.15 63.32 64.05 64.41 64.80
64.92 65.03 64.99 65.01];

yn=55;
dy=65-yn;

hek=(yek-yn)/dy;
t_i=0:0.5:250;
hek_i=interp1(te,hek,t_i);
    T1=x(1); T2=x(2); T3=x(3); tau=15;
[n d]=pade(tau,10);
    W1=tf(1, [T1 1]);
    W2=tf(1, [T2 1]);
    W3=tf(1, [T3 1]);
    Wzap1=tf(n,d);
    W=W1*W2*W3*Wzap1;
    hroz=step(W,t_i);
    s=sum((hroz'-hek_i).^2);
end

```

Результатом виконання програми є значення параметрів та графік порівняння кривих розгону (рисунок 3.4):

T = 23.5557

k = 0.6667

tau=15

del = 2.7095.

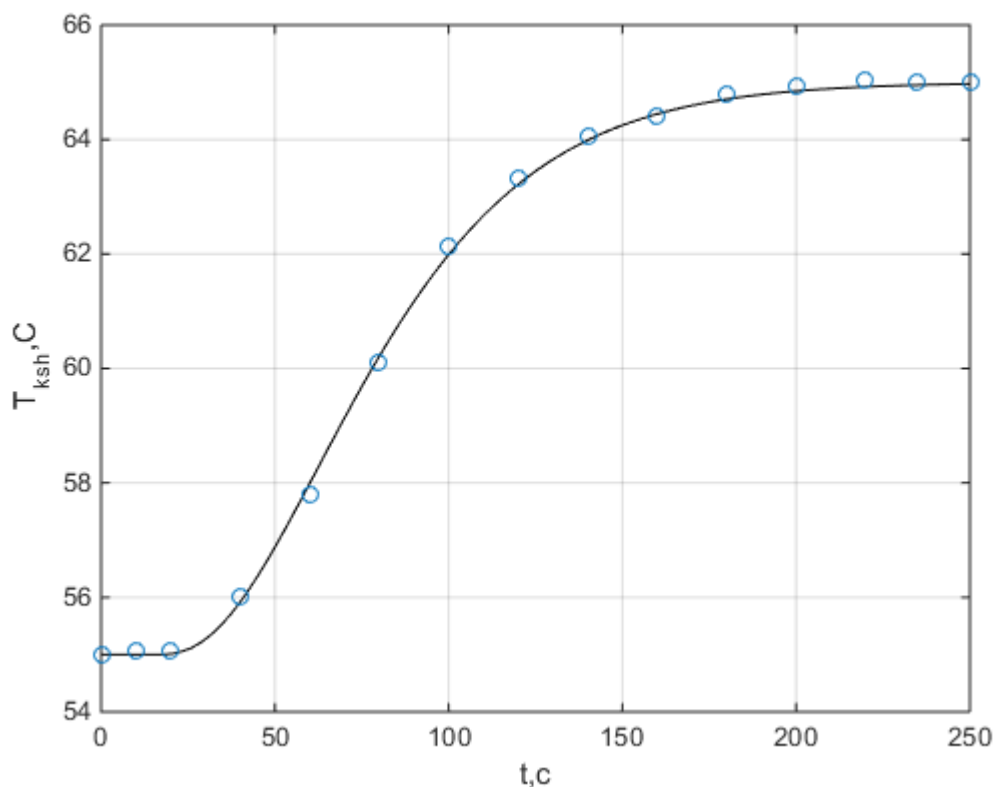


Рис.3.4. Порівняння перехідних процесів зміни температури киплячого шару при стрибкоподібній зміні відкриття РО на 15% : «о» - експериментальна крива розгону; «-» - апроксимована крива

Точність апроксимації для об'єктів із самовирівнюванням вважається задовільною, якщо зведена похибка δ не перевищує 4%.

Максимальна зведена похибка $\delta = 2.9573\%$ і не перевищує 4%, то робимо висновок, що отримана модель відповідає (є адекватною) заданій експериментальній кривій розгону.

Отже, функція передачі об'єкта має вигляд:

$$W(p) = \frac{0.6667 \cdot e^{-15p}}{(23.5557p + 1)^3}.$$

3.2. Визначення закону регулювання

При виборі закону регулювання не буде проводитися розрахунок П – та ПД – законів регулювання оскільки вони мають статичну похибку, що для сушарки киплячого шару є недопустимим. При регулюванні температури недоцільно також

застосовувати регулятор з ПД – законом регулювання тому, що диференціальна складова (Д – складова) збільшує похибку і час регулювання. Тому буде виконано розрахунок параметрів налаштування ПІ-регулятора.

Розрахунок параметрів налаштування ПІ-регулятора (веденого і ведучого)

Для розрахунку каскадної системи регулювання застосовано інтерактивне середовище Simulink.

Структурна схема каскадної САР температури киплячого шару наведена на рисунку 3.5.

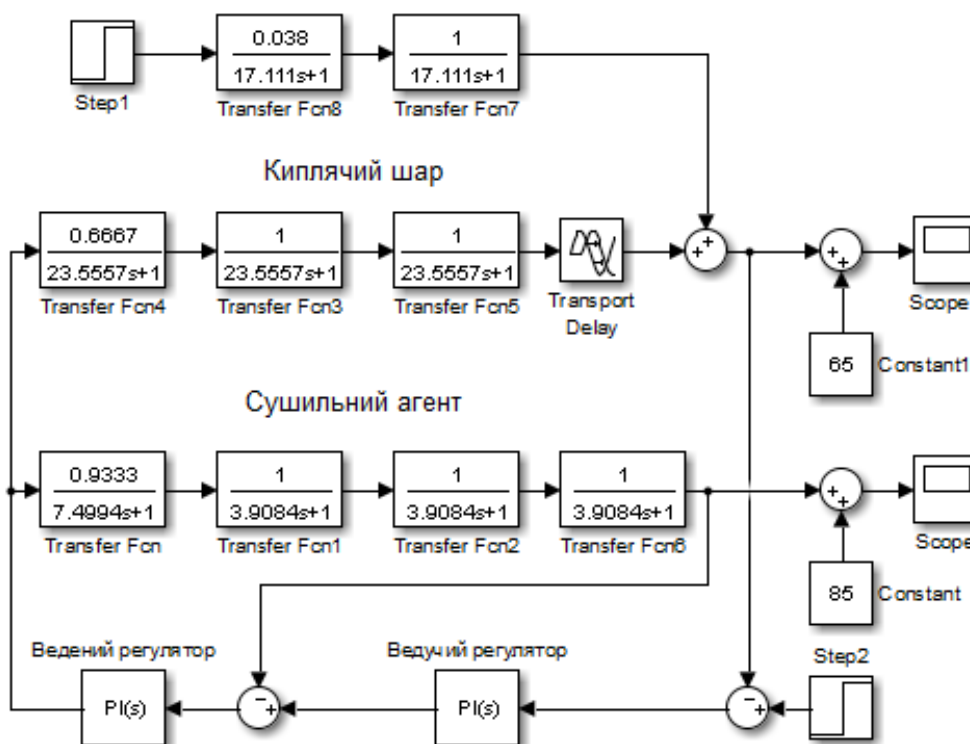


Рис.3.5. Структурна схема каскадної системи автоматичного регулювання температури киплячого шару

В функціональному блоці веденого ПІ – регулятора визначимо параметри налаштування у вигляді (рисунку 3.6):

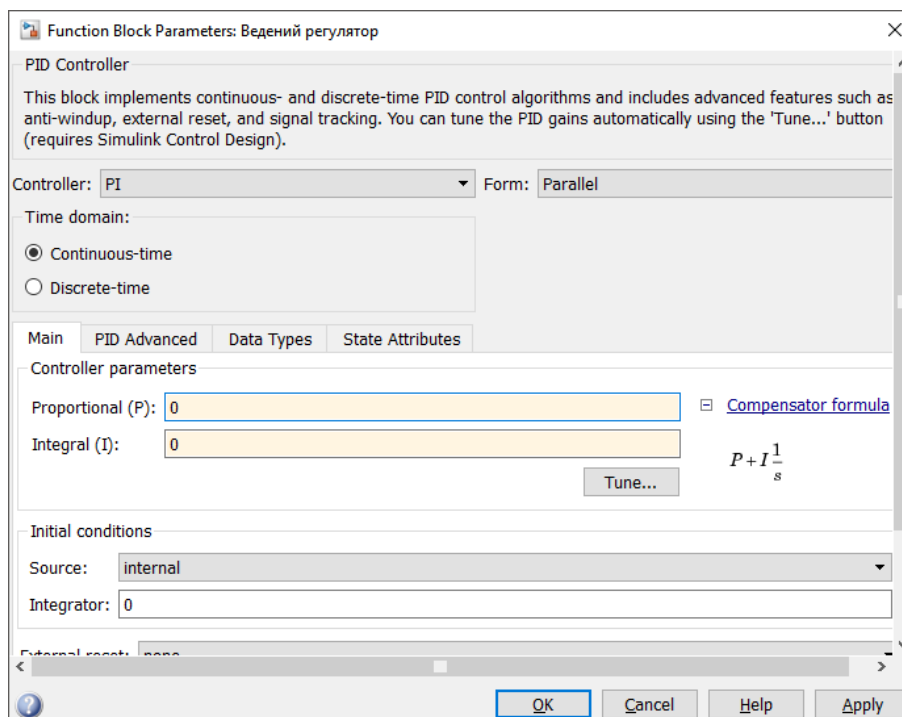


Рис.3.6. Вікно функціонального блоку PI Controller для веденого регулятора

Після цього збережемо і запустимо автоматичний пошук параметрів налаштування за допомогою кнопки “Tune...” (рисунок 3.7):

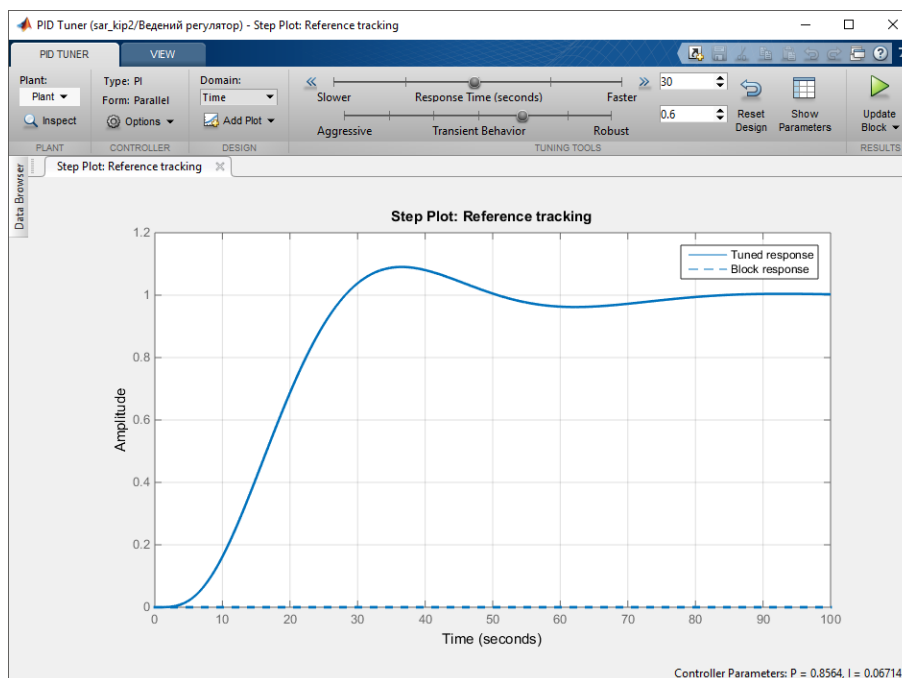


Рис.3.7. Вікно функціонального блоку PI Tuner для веденого регулятора

За допомогою повзунків Response Time і Transient Behavior налаштуємо необхідний час регулювання і стійкість системи за амплітудою (рисунок 3.8).

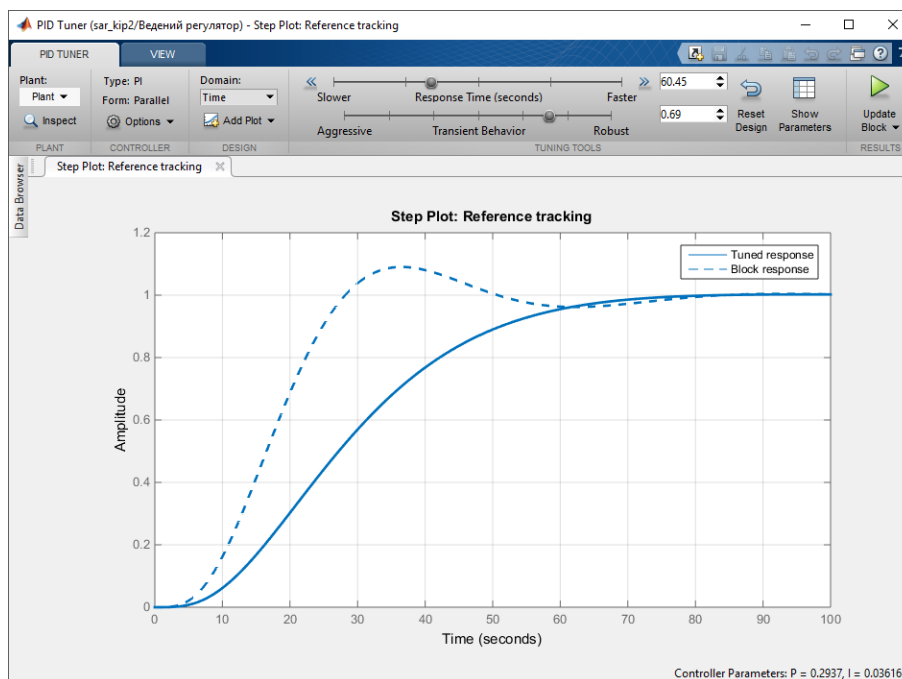


Рис.3.8. Вікно функціонального блоку PI Tuner для веденого регулятора з налаштованими необхідними параметрами налаштування

Результатом пошуку є така передавальна функція веденого ПІ – регулятора:

$$W_{AP1}(p) = 0.2937 + \frac{0.03616}{p}$$

Натискаємо кнопку Update Block і закриваємо вікно PI Tuner. Процес знаходження передавальної функції веденого ПІ – регулятора завершено.

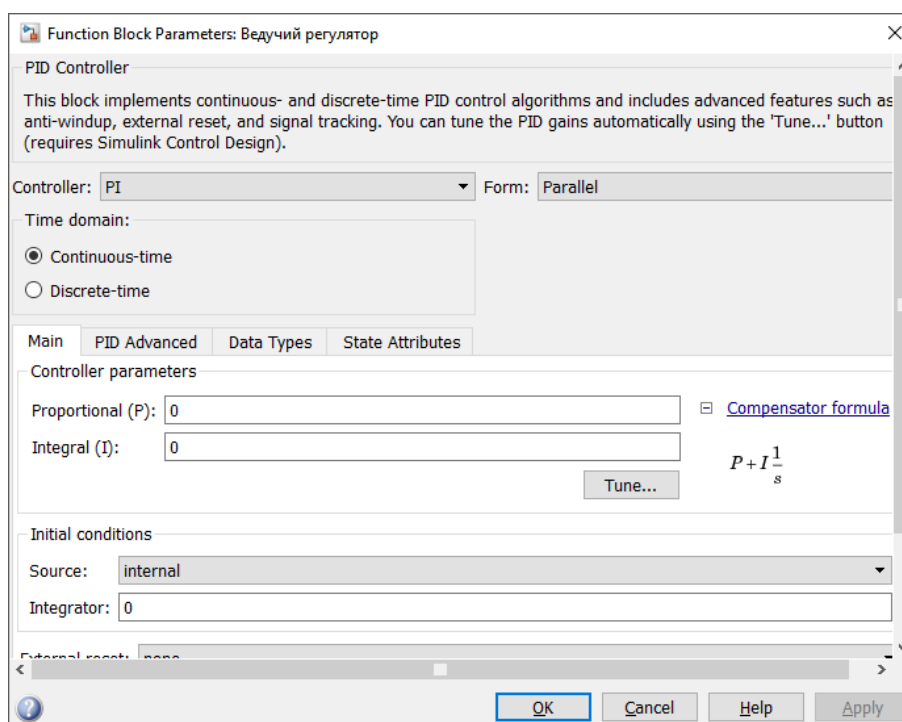


Рис.3.9. Вікно функціонального блоку PI Controller для ведучого регулятора

За аналогією заходимо в функціональний блок ведучого ПІ – регулятора і визначаємо його параметри налаштування (рисунки 3.9 і 3.10):

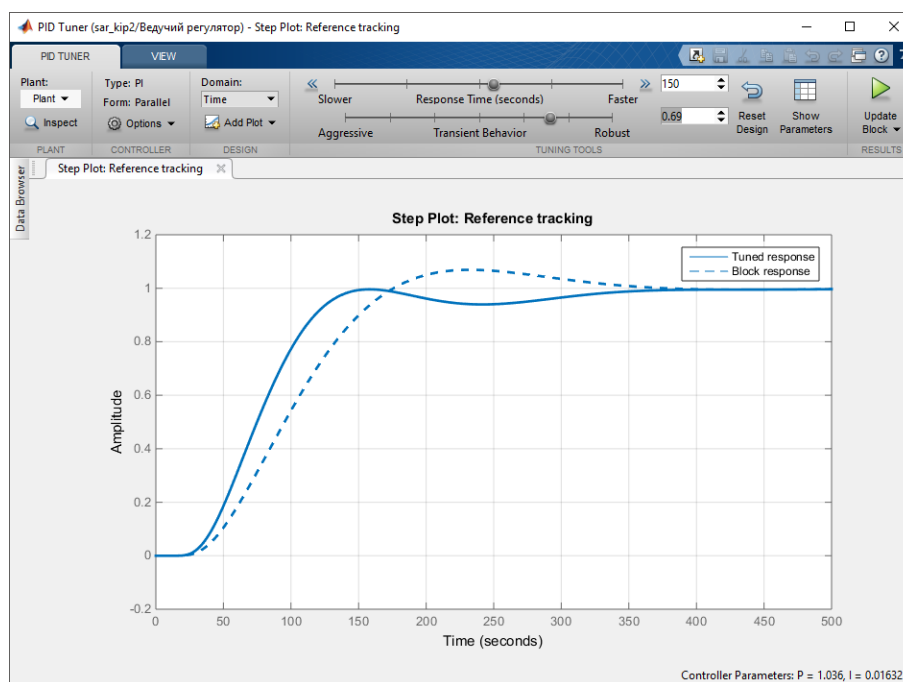


Рис.3.10. Вікно функціонального блоку PI Tuner для ведучого регулятора з необхідними параметрами налаштування

Результатом є отримання такої передавальної функції ведучого ПІ – регулятора:

$$W_{AP2}(p) = 1.036 + \frac{0.01632}{p}.$$

3.3. Побудова перехідних процесів розрахованої САР

Схема каскадної системи регулювання температури киплячого шару у середовищі Simulink із отриманими параметрами налаштування ПІ-регуляторів та з каналом збурення наведена на рисунку 3.11.

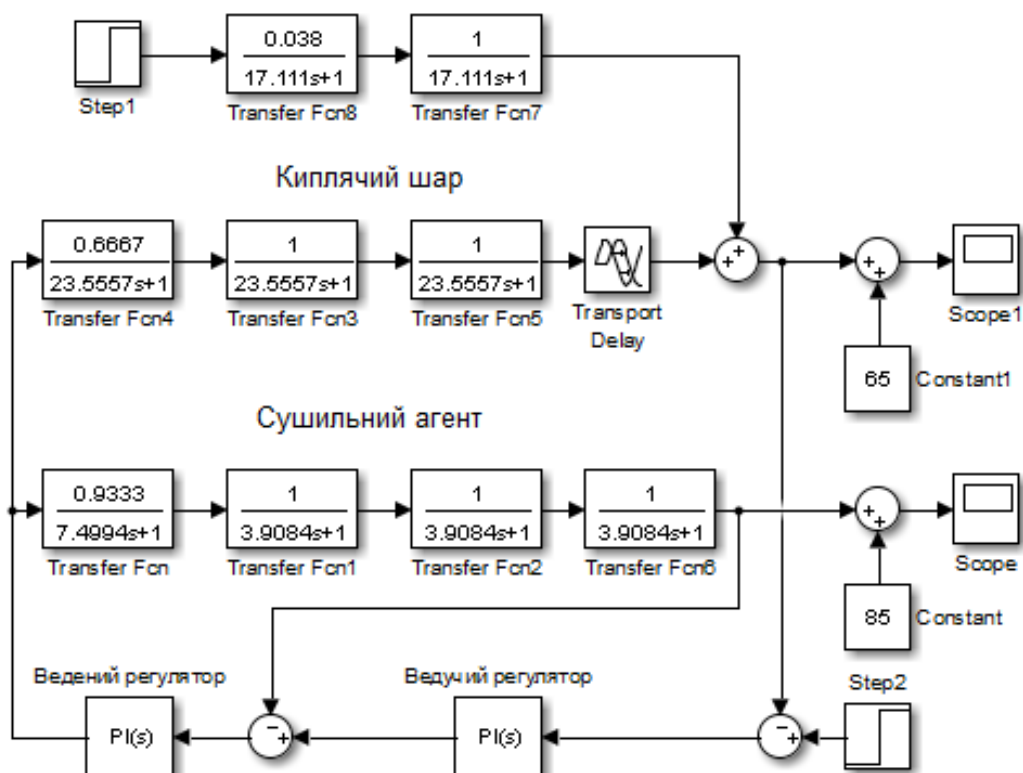


Рис.3.11. Схема каскадної системи регулювання температури киплячого шару у середовищі Simulink

Змодельємо перехідний процес у САР при стрибкоподібній зміні витрати сушильного агента через камеру сушарки на $100 \text{ м}^3/\text{год}$ (рисунок 3.12):

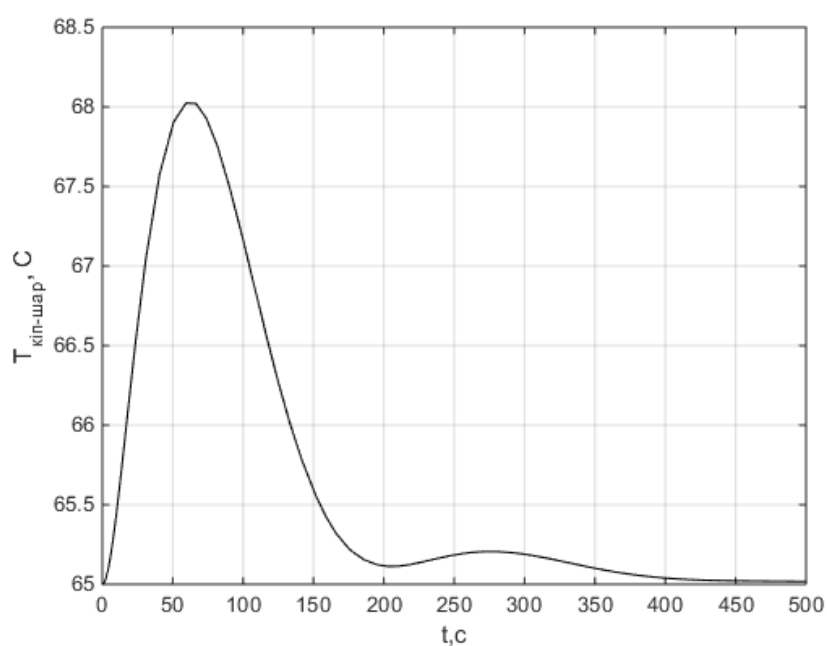


Рис. 3.12. Перехідний процес зміни температури киплячого шару при зміні витрати сушильного агента через камеру сушарки на $100 \text{ м}^3/\text{год}$

З отриманого перехідного процесу визначаємо:

- максимальне динамічне відхилення: $A_1 = 3.02 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- час регулювання: $t_p = 155 \text{ с}$ при допустимій похибці регулювання $\Delta=0.5$

$^{\circ}\text{C}$.

З перехідного процесу на рисунку 3.12 видно, що застосування каскадної САР з ПІ-регулятором забезпечує вимоги до якості перехідного процесу.

Змоделюємо перехідний процес у САР при стрибкоподібній зміні завдання регулятору температури киплячого шару на $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Перехідний процес наведено на рисунку 3.13.

Аналіз перехідного процесу показує, що застосування вибраної САР забезпечує вимоги до якості процесу регулювання з такими показниками:

- максимальне динамічне відхилення: $A_1 = 0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- час регулювання : $t_p = 152 \text{ с}$. при допустимій похибці регулювання $\Delta=0.5$

$^{\circ}\text{C}$.

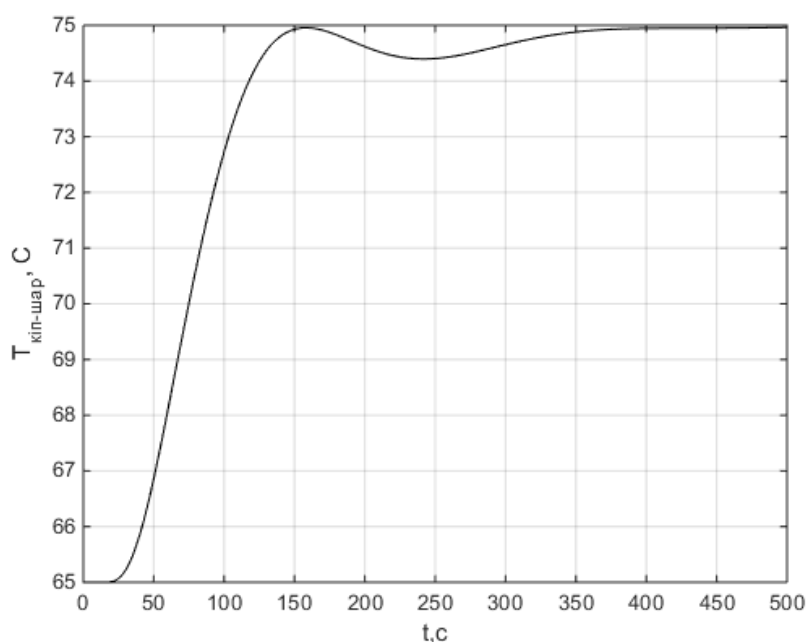


Рис.3.13. Перехідний процес зміни температури киплячого шару при зміні завдання регулятору температури киплячого шару на $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$

3.4. Опис функціональної схеми автоматизації

З врахуванням вибраних технічних засобів автоматизації розроблено загальну ФСА.

ФСА є одним з основних проєктних документів, що визначають функціональну структуру і обсяг автоматизації технологічного процесу.

На підставі ФСА складають специфікації приладів та технічних засобів автоматизації.

Нижче наводимо опис схем регулювання, індикації та сигналізації параметрів технологічного процесу.

Контур регулювання вологості повітря після вологовідділювача з корекцією по температурі

Сигнали від вимірювального перетворювача (поз. 1-1) поступає на вхід контролера. Контролер формує вихідний аналоговий сигнал, який поступає на виконавчий механізм (поз. 1-2) і змінює ступінь відкриття триходового клапана, (поз. 1-3), встановленого на трубопроводі подачі холодної води.

Контур каскадного регулювання температури киплячого шару в сушарці

Сигнал від термоперетворювача опору (поз. 2-1) поступає на вхід нормуючого перетворювача температури (поз. 2-2) з вихідним сигналом 4-20 мА, який поступає на вхід контролера. Сигнал від термоперетворювача опору (поз. 3-1) поступає на вхід нормуючого перетворювача температури (поз. 3-2) вихідний сигнал якого значенням 4-20 мА надходить на вхід контролера. Контролер формує вихідний аналоговий сигнал, що поступає на електричні виконавчі механізми (поз. 3-3 та 3-5) які встановлені в системі змішування потоків сушильного агента. Контролер формує також дискретний сигнал для сигналізації при перевищенні температури киплячого шару за допустиму межу.

Контур регулювання витрати сушильного агента

Сигнал перепаду тиску з перетворювача (поз. 4-1) поступає на диференційний манометр (поз. 4-2) з уніфікованим вихідним струмовим сигналом 4-20 мА. Далі цей сигнал поступає на вхід контролера. В контролері формується вихідний аналоговий

сигнал. Він поступає на електричний виконавчий механізм (поз. 4-3) який змінює положення заслінки, встановленої в трубопроводі байпасу.

Контур індикації та сигналізації перепаду тиску на киплячому шарі

Сигнали про значення перепаду тисків відбираються з під днища сушарки та її середини і поступають на вхід електроконтактного диференційного манометра (поз. 5-1). При перевищенні максимально допустимого перепаду тиску диференційний манометр формує дискретний сигнал, який подається в контролер. При перевищенні допустимого перепаду тиску контролер формує дискретний сигнал, що поступає на магнітний пускач (поз. 5-2).

Контур індикації та сигналізації перепаду тиску на фільтрах сушарки

Сигнали про значення перепаду тисків відбираються з середини та з виходу сушарки і поступають на електроконтактний диференційний манометр (поз. 6-1), При перевищенні максимально допустимого перепаду тиску на виході манометра формується дискретний сигнал, який подається в контролер. При перевищенні допустимого перепаду тиску формується дискретний сигнал, що поступає на відсічний клапан стиснутого повітря (поз. 6-2).

Контур індикації та сигналізації перепаду тиску на киплячому шарі

Сигнали про значення перепаду тисків відбираються з під днища сушарки та з середини і поступають на електроконтактний диференційний манометр (поз. 5-1), При перевищенні максимального допустимого перепаду тиску на виході манометра формується дискретний сигнал, який надходить в контролер. При перевищенні допустимого перепаду тиску формує дискретний сигнал, що поступає Контролер у разі перевищення заданої межі перепаду тиску формується дискретний сигнал, що подається на магнітний пускач (поз. 5-2).

3.5. Специфікація на засоби автоматизації

Специфікація на засоби автоматизації наведена в таблиці 3.3

Таблиця 3.3

Специфікація на засоби автоматизації

№ п/п	№ позиції	Назва параметра	Назва засобу та коротка технічна характеристика	Тип	К-ть
1	2	3	4	5	6
1	3-1	Температура сушильного агента	Термоперетворювач опору. Діапазон вимірювання темпе-ратури: від -50 до +250 °С. Номінальна статична характе-ристика Pt100. Довжина монтажно́ї частини 100 мм. Клас допуску АА.	WIKA TR10-D	1
2	2-1	Температура киплячого шару	Термоперетворювач опору. Діапазон вимірювання темпе-ратури: від 0 до +150 °С. Номінальна статична характе-ристика Pt100. Довжина монтаж-ної частини 70 мм. Клас допуску АА.	WIKA TR10-B	1
3	2-1 7-1	Відносна вологість та температура після волого-відділювача та на виході з сушарки	Вимірювальний перетворювач температури та вологості Чутливий елемент: NTC 10 кОм Вихідний сигнал: 4-20 мА для температури та вологості	Siemens QFM2171	1
4	2-2		Перетворювач температури з уніфікованим вихідним сигналом 4...20 мА. НСХ Pt100. Діапазон перетворень: від 0 до 100 °С. Основна похибка 0,5 %.	WIKA T32	1
5	3-2		Перетворювач температури з уніфікованим вихідним сигналом 4...20 мА. НСХ Pt100. Діапазон перетворень: від 0 до 200 °С. Основна похибка 0,5 %.	WIKA T91.20	1
6	5-1 6-1	Перепад тиску на киплячому шарі Перепад тиску на фільтрах сушарки	Диференційний манометр з електроконтактами. Діапазон вимірювання: 0÷4 кПа. Основна похибка: 3% від верхньої межі вимірювання Максимальна температура вимірюваного середовища 100°С.	WIKA DPGS43.1x0	2
7	4-2	Витрата сушильного агента	Давач тиску з мікропроцесорною обробкою сигналу. Вихідний сигнал: 4-20мА Інтервал вимірювання від 8.3 до 250 мбар .	Sitrans P DS III	1

8	4-1	Витрата сушильного агента	Труба Вентурі спеціального виконання. Умовний діаметр $D_y=300$ мм. Умовний тиск $P_y=10$ кгс/см ² .		1
9	1-3		Електропривід для управління сідловини клапанами. Напруга живлення 24 В постійного/змінного струму. Керуючий сигнал 4 – 20мА. Хід штоку 20 мм. Час ходу штоку 30 с/ 20 мм.		1
10	1-4	Витрата холодної води	Триходовий сідловий клапан. Температура середовища: $-25 \div 150$ °С. Умовний тиск 1600 кПа. Умовний діаметр 50 мм.	Siemens VXF42.50	1
11	3-3 3-5 4-3		Електропривід для управління повітряними заслінками. Напруга живлення 24В постійного струму. Керуючий сигнал: 4 – 20 мА; Кут повороту 90°. Час повороту 90°/150 с	Siemens SAL61.00 T60	3
15	4-4 3-6 3-4	Витрата сушильного агента Температура сушильного агента	Поворотна заслінка для перекриття або дроселювання потоків в трубопроводах. Температура середовища: $-10 \div 120$ °С. Умовний тиск 1600 кПа. Умовний діаметр 300 мм.	Siemens VKF46.200	2
19	5-2		Прилад плавного пуску двигуна. Напруга ізоляції: 1000 В. Номінальний струм 63 А. Номінальна потужність 30 кВт.	Siemens SIRIUS 3RW3037-1BB04	1
21			Мікропроцесорний контролер	Siemens S7-1214C DC/DC/DC	1
22			Модуль розширення	Siemens SM1234	2

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз стану виробничої санітарії і гігієни праці

Аналіз стану виробничої санітарії і гігієни праці на підприємстві ПРАТ "РІВНЕАЗОТ", зокрема на дільниці сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару, свідчить про наявність ряду особливостей і проблем, характерних для хімічного виробництва з високим рівнем технологічного навантаження. На цій ділянці працівники зазнають впливу підвищеної температури, запиленості повітря, шуму та хімічних випарів, що є типовими ризиками для виробництва мінеральних добрив. Основним джерелом запилення є аерозолі, які утворюються в процесі сушіння гранул амофосу, коли частинки пилу можуть потрапляти в робочу зону через нещільності або в процесі обслуговування обладнання.

Вентиляційна система є критично важливим елементом для підтримання допустимих параметрів мікроклімату, однак у ряді випадків вона працює неефективно або потребує модернізації. Існуючі системи загальнообмінної вентиляції не завжди забезпечують необхідне видалення пилу, через що можливе перевищення гранично допустимих концентрацій у повітрі робочої зони. Крім того, недостатній рівень локальної витяжної вентиляції безпосередньо у місцях завантаження або обслуговування сушарок створює додаткову загрозу для здоров'я працівників.

Гігієна праці частково підтримується завдяки обов'язковій видачі засобів індивідуального захисту — протипилових респіраторів, захисного одягу, рукавиць та окулярів. Проте, як свідчать окремі спостереження, ці засоби не завжди використовуються правильно або регулярно, що знижує ефективність профілактичних заходів. Наявні санітарно-побутові умови (роздягальні, душові, кімнати відпочинку) переважно відповідають нормативним вимогам, однак потребують періодичної модернізації для забезпечення повного комфорту працівників.

Особливу увагу слід приділити рівню шуму та вібрації від сушильного обладнання, який може перевищувати допустимі значення. Це вимагає проведення регулярного моніторингу акустичного фону та застосування шумозахисних

матеріалів або організаційних заходів з обмеження часу перебування персоналу в небезпечних зонах. Підвищення температури повітря у робочій зоні також потребує корекції графіків змін, особливо в літній період, коли температура в приміщенні сушарки може значно зростати.

Медичні огляди проводяться регулярно відповідно до вимог чинного законодавства, однак варто посилити контроль за динамікою змін стану здоров'я працівників, які тривалий час працюють в умовах хімічного впливу. Важливим напрямом також є профілактична робота з інформування працівників щодо правил особистої гігієни, правильного використання ЗІЗ та реагування на симптоми професійних захворювань.

Загалом, незважаючи на наявні позитивні практики, існує необхідність у комплексному перегляді підходів до виробничої санітарії та гігієни праці на дільниці сушіння амофосу, зокрема в контексті впровадження сучасних автоматизованих систем керування на базі контролерів Siemens, які здатні не лише покращити технологічні параметри, а й знизити ступінь участі людини в небезпечних операціях. Це сприятиме як підвищенню безпеки праці, так і поліпшенню умов праці загалом.

4.2. Обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці

З метою зниження виробничих ризиків, підвищення рівня безпеки праці та покращення умов праці на дільниці сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару ПРАТ "РІВНЕАЗОТ", доцільно впровадити комплекс організаційно-технічних заходів, що охоплюють як модернізацію технологічного обладнання, так і вдосконалення системи управління охороною праці.

У першу чергу, необхідно забезпечити технічну модернізацію сушильних установок шляхом впровадження автоматизованої системи керування на базі контролерів Siemens. Це дозволить не лише оптимізувати температурні та вологісні режими процесу сушіння, а й значно зменшити безпосередню участь людини у технологічному процесі, мінімізуючи її перебування в небезпечній зоні. Крім того, автоматизація сприятиме зменшенню аварійних ситуацій, пов'язаних з перегріванням, викидами пилу або відмовами обладнання.

Одним із ключових технічних рішень має стати встановлення високоефективної локальної витяжної вентиляції у зонах підвищеної запиленості. Застосування фільтраційно-вентиляційних установок із багатоступеневою очисткою дозволить суттєво зменшити концентрацію шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Доцільно також передбачити інтеграцію датчиків контролю запиленості та температури, які працюватимуть у реальному часі та передаватимуть сигнали на систему керування.

Організаційно важливим є впровадження системи періодичного інструктажу працівників з охорони праці, з акцентом на ризики, пов'язані з хімічними речовинами, пилом, шумом та підвищеними температурами. Працівники повинні проходити навчання правильному використанню засобів індивідуального захисту, в тому числі респіраторів, захисного одягу, рукавиць, захисних окулярів і засобів захисту слуху.

Рекомендовано запровадити систему ротації персоналу з метою обмеження часу перебування у шкідливих умовах, особливо у високотемпературних зонах. Також варто переглянути графіки роботи в літній період, щоб запобігти перегріванню організму.

Необхідно здійснити модернізацію побутових приміщень — душових, роздягалень, кімнат відпочинку — з урахуванням санітарно-гігієнічних норм і створення комфортних умов для працівників після зміни. Рекомендується встановлення систем кондиціонування в приміщеннях для персоналу.

З метою моніторингу стану здоров'я працівників доцільно посилити контроль за регулярністю проходження медичних оглядів, а також впровадити систему моніторингу основних біомаркерів, які можуть свідчити про вплив шкідливих факторів виробничого середовища. Особливу увагу слід приділяти захворюванням дихальної системи та слуху.

Таким чином, реалізація комплексу організаційно-технічних заходів дозволить не лише знизити вплив шкідливих виробничих чинників на працівників, а й забезпечити відповідність умов праці сучасним стандартам охорони праці та безпеки на виробництві. Автоматизація процесів з використанням Siemens-контролерів

відіграє ключову роль у зменшенні техногенного навантаження на людину, підвищуючи загальний рівень безпеки технологічного процесу.

4.3. Пожежна безпека

Процес сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару на підприємстві ПРАТ "РІВНЕАЗОТ" пов'язаний з підвищеною пожежонебезпекою через наявність високих температур, пилоподібних матеріалів і можливість утворення вибухонебезпечних аерозольних сумішей. Тому забезпечення пожежної безпеки є критично важливим аспектом експлуатації сушильного обладнання та організації всього виробничого процесу.

Один із основних ризиків – це накопичення амофосного пилу в сушарці або навколо неї. При певних умовах цей пил може стати джерелом займання або навіть вибуху, особливо в місцях з недостатньою вентиляцією чи за наявності іскри від електрообладнання або тертя металевих частин. Тому важливим заходом є регулярне очищення обладнання, технологічних трубопроводів та приміщень від пилу, а також забезпечення герметичності сушильної системи, щоб уникнути витоку пилу назовні.

З технічного боку першочерговим є забезпечення вибухозахищеного виконання електрообладнання, що використовується у зоні сушіння. Усі електричні установки, включаючи датчики, клапани, електроприводи та пульти керування, повинні відповідати вимогам до роботи у вибухонебезпечному середовищі. Особливо це стосується електродвигунів вентиляторів і систем подачі сировини.

Система автоматизованого контролю на базі контролерів Siemens може бути інтегрована з модулями пожежної сигналізації та автоматичного вимкнення обладнання у випадку перевищення допустимих температур або виявлення диму. Рекомендується встановлення датчиків полум'я та температури, які безпосередньо передають сигнал у PLC для ініціювання аварійного відключення технологічного процесу та запуску систем пожежогасіння.

Протипожежний захист має також включати сучасну систему виявлення та гасіння пожежі. На об'єкті повинні бути змонтовані автоматичні установки порошкового або газового пожежогасіння, які є ефективними в умовах високої

температури та запиленості. У місцях ручного управління процесом необхідно встановити щити з первинними засобами пожежогасіння – вогнегасниками (порошковими, вуглекислотними), пожежними рукавами, пісочницями тощо.

Організаційні заходи повинні включати систематичне проведення протипожежних інструктажів для працівників, навчання правильному поведженню в умовах виникнення пожежі, евакуації та використанню засобів пожежогасіння. На території дільниці сушіння мають бути чітко позначені евакуаційні виходи, які повинні залишатися вільними та доступними в будь-який час. План евакуації з будівлі повинен бути розміщений у видимих місцях, а освітлення аварійних виходів – автономним.

З метою профілактики також необхідно здійснювати регулярний контроль стану електропроводки, запобігати перегріванню електрощитового обладнання, уникати перевантаження мереж та іскріння контактів. Всі роботи, пов'язані з вогнем (зварювання, шліфування тощо), мають виконуватись лише за наявності відповідних нарядів-допусків із суворим дотриманням вимог пожежної безпеки.

У підсумку, забезпечення пожежної безпеки на дільниці сушіння амофосу передбачає не лише технічні, але й організаційні та навчальні заходи. Інтеграція автоматизованої системи керування з пожежною сигналізацією, правильний вибір матеріалів та обладнання, чітка організація дій персоналу у разі пожежі – все це є основою надійного функціонування технологічного процесу та захисту працівників і обладнання від вогню.

5. ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ПРОЕКТОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Впровадження автоматизованої системи керування процесом сушіння гранул амофосу на ПРАТ «РІВНЕАЗОТ» дозволяє значно підвищити енергоефективність, зменшити втрати сировини, підвищити якість продукції та безпеку праці. Економічна доцільність такого впровадження підтверджується як якісним аналізом, так і кількісними розрахунками витрат та очікуваної окупності.

Таблиця 5.1.

Вартість основного обладнання

№	Найменування обладнання	Тип	К-ть	Орієнт. ціна за од. (€)	Сума (€)
1	Термоперетворювач опору (-50...+250 °C)	WIKA TR10-D	1	120	120
2	Термоперетворювач опору (0...+150 °C)	WIKA TR10-B	1	110	110
3	Датчик температури та вологості	Siemens QFM2171	1	250	250
4	Перетворювач температури (0...100 °C)	WIKA T32	1	140	140
5	Перетворювач температури (0...200 °C)	WIKA T91.20	1	130	130
6	Диференційний манометр	WIKA DPGS43.1x0	2	180	360
7	Датчик тиску	Siemens Sitrans P DS III	1	400	400
8	Труба Вентурі	-	1	700	700
9	Електропривід клапана	-	1	350	350
10	Триходовий клапан	Siemens VXF42.50	1	420	420
11	Електропривід заслінки	Siemens SAL61.00	3	280	840
12	Поворотна заслінка	Siemens VKF46.200	2	500	1000
13	Пристрій плавного пуску	Siemens SIRIUS 3RW3037	1	380	380
14	Програмований контролер	Siemens S7-1214C	1	450	450
15	Модулі розширення	Siemens SM1234	2	200	400
	Разом (обладнання)				6 050

Вартість встановлення та пусконаладження

- Вартість монтажних робіт: ~1 000 €
- Вартість прокладання кабелів, кріплень, роз'ємів: ~500 €
- Пусконаладжувальні роботи та програмування: ~1 200 €
- Навчання персоналу: ~250 €

Разом (роботи та налагодження): 2 950 €

Таблиця 5.2.

Загальні капітальні витрати на впровадження

Категорія	Вартість (€)
Обладнання	6 050
Монтаж, налагодження, навчання	2 950
Разом	9 000

Таблиця 5.3.

Очікувана економія після автоматизації

Параметр	Розрахунок	Сума (€ / рік)
Економія енергоносіїв (20% зниження витрат)	~700 €/міс.	8 400
Зменшення браку продукції (на 3%)	~400 €/міс.	4 800
Зменшення витрат на обслуговування	~100 €/міс.	1 200
Загальна річна економія		14 400

Окупність проекту

$$\text{Термін окупності} = \frac{\text{Загальні витрати}}{\text{Річна економія}} = \frac{9\,000}{14\,400} \approx 0,63 \text{ року}$$

Термін окупності впровадженої системи автоматизації становить приблизно 7–8 місяців. Після цього проєкт починає приносити чисту економічну вигоду.

Додаткові вигоди, які не мають прямого грошового вираження

- Покращення умов праці та зниження ризику помилок оператора.
- Зменшення простоїв обладнання завдяки діагностиці.
- Вищий рівень безпеки технологічного процесу.
- Вища стабільність якості продукції, що підвищує конкурентоспроможність.

Отже, проєкт автоматизації сушіння гранул амофосу є не лише технологічно доцільним, але й економічно вигідним, із швидким терміном окупності та значною довготривалою користю для підприємства.

ВИСНОВКИ

Під час виконання роботи було проведено аналіз технологічного процесу сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару. Аналіз включав в себе опис технологічної схеми процесу сушіння з врахуванням переваг та недоліків сушарки з киплячим шаром. Розроблено матеріальний та тепловий баланс сушарки для сушіння амофосу. На основі аналізу технологічного процесу як об'єкта керування визначено основні фактори, що впливають на протікання процесу, та вибрано номінальні значення параметрів для оптимального його протікання. З урахуванням основних факторів складена технологічна карта процесу сушіння амофосу.

Виконано аналіз процесу сушіння в сушарці киплячого шару як об'єкта керування. Складено структурну схему взаємозв'язку між вхідними, збурюючими та вихідними параметрами технологічного процесу.

Основним завданням сушарки киплячого шару є зменшення вмісту вологи в матеріалі від його початкового значення до необхідного (для різних матеріалів даний вміст вологи різний). Основними збуреннями, що впливають на процес сушіння є: зміна витрати, вологість та температура сушильного агенту, зміна початкової вологості матеріалу, фізико-хімічні властивості складу частинок твердого матеріалу, а також зміна витрати вологого матеріалу та його початкова температура.

У процесі сушіння гранул амофосу в сушарках киплячого шару важливе значення має регулювання температурних та витратних параметрів, які безпосередньо впливають на якість готової продукції, енергоефективність і стабільність процесу. Основними вихідними параметрами, що підлягають контролю й регулюванню, є температура повітря після вологовідділювача, температура сушильного агенту, температура киплячого шару, а також витрата сушильного агенту. Саме ці величини дають змогу забезпечити потрібні умови для ефективного тепло- і масообміну під час сушіння.

Разом із цим, процес суттєво залежить від вхідних енергетичних і матеріальних потоків. Так, витрата холодної води впливає на охолодження або попередню підготовку повітря, що надходить до системи. Регулювання співвідношення

відкриття заслінок між теплообмінником та байпасною лінією дає змогу гнучко керувати температурним режимом повітря, що подається в сушарку. Крім того, витрата повітря через байпас камери сушарки відіграє роль у формуванні остаточного об'єму сушильного агента.

Серед збуджуючих, але контрольованих факторів — температура первинного повітря, яка залежить від погодних умов або технічного стану компресорного обладнання; температура холодної води, що може змінюватися залежно від зовнішнього середовища чи стану системи охолодження; температура пари і її витрата, які, у свою чергу, залежать від стабільності роботи парогенераторної установки. Усі ці параметри не завжди є незалежними — зміна одного може спричинити ланцюгову реакцію в технологічній системі, що потребує складної автоматизованої координації для забезпечення сталого режиму сушіння.

З врахуванням наведеного розроблена спрощена оптимальна функціональна схема системи автоматизації сушарки для сушіння амофосу. Для реалізації функціональної схеми автоматизації вибрано локальні технічні засоби та програмовано-логічний контролер Siemens S7-1200 та модуль розширення для нього SM1234. У процесі автоматизації сушіння гранул амофосу застосовується комплекс спеціалізованих технічних засобів, які забезпечують точне вимірювання, регулювання та керування ключовими параметрами. Температура сушильного агента контролюється за допомогою термоперетворювача опору з номінальною статичною характеристикою Pt100, класу точності AA, довжиною монтажної частини 100 мм і діапазоном вимірювання від -50 до $+250$ °C. Аналогічний термоперетворювач, але з коротшою монтажною частиною (70 мм) та діапазоном 0 – 150 °C, використовується для контролю температури киплячого шару.

Для визначення відносної вологості та температури повітря після волого-відділювача і на виході з сушарки застосовуються комбіновані вимірювальні перетворювачі з NTC 10 кОм, які мають уніфікований вихідний сигнал 4 – 20 мА. Вони доповнюються окремими температурними перетворювачами з тією ж характеристикою Pt100 та аналогічним вихідним сигналом, розрахованими на діапазони 0 – 100 °C та 0 – 200 °C із основною похибкою $0,5$ %.

Для вимірювання перепаду тиску як на киплячому шарі, так і на фільтрах сушарки застосовуються електроконтактні диференційні манометри з діапазоном до 4 кПа і допустимою температурою середовища до 100 °С. Похибка таких приладів становить до 3% від верхньої межі вимірювання, що є допустимим для умов сушильного процесу.

Витрата сушильного агента визначається на основі комплексного підходу: використовується давач тиску з мікропроцесорною обробкою сигналу, вихідним інтервалом 4–20 мА та діапазоном тиску від 8,3 до 250 мбар, а також труба Вентурі ($D_y=300$ мм, $P_y=10$ кгс/см²), яка створює необхідні умови для точного обчислення витрати за різницею тиску.

Керування потоками повітря та води здійснюється за допомогою електроприводів: поворотних заслінок (температура середовища до 120 °С, тиск до 1600 кПа, діаметр 300 мм) із кутом повороту до 90°, часом повороту 150 с, які керуються уніфікованим аналоговим сигналом 4–20 мА; електроприводів сідлових клапанів із ходом штоку 20 мм та живленням 24 В; триходового сідлового клапана (діаметр 50 мм, тиск 1600 кПа), який призначений для регулювання витрати холодної води в межах температурного діапазону від -25 до +150 °С. Усі ці елементи є базовими складовими системи автоматичного керування й дозволяють реалізувати точне підтримання технологічних режимів у реальному часі, враховуючи як контрольовані параметри, так і збурення з боку теплоносіїв або змін навколишнього середовища. Розроблено принципову схему зовнішніх з'єднань локальних засобів автоматизації та мікропроцесорного контролера.

Виконано розрахунок та моделювання системи автоматичного регулювання температури в киплячому шарі. За експериментальними кривими розгону знайдено передавальні функції досліджуваного об'єкта регулювання за допомогою функції `fminsearch` середовища Matlab.

На основі математичної моделі об'єкта складено структурну модель каскадної системи регулювання температури киплячого шару в середовищі Simulink та оптимальні параметри налаштування регулятора з ПІ-законом регулювання.

Результати аналізу перехідних процесів із застосуванням ПІ-регулятора з оптимальними параметрами налаштування забезпечують необхідні показники якості перехідного процесу. Наведено опис схем регулювання, індикації та сигналізації параметрів технологічного процесу. Наведено специфікацію на технічні засоби автоматизації, що застосовані для реалізації даної ФСА.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація виробничих процесів: навч. посібник / Фединець В.О., Васильківський І.С., Николин Г.А.-Львів: СПОЛОМ, 2023.-192 с.
2. Автоматизація виробничих процесів/ Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський О.К., Ляшук О.Л. - Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011.-344 с.
3. Безвесільна О.М.. Толочко Т.О. "Технічні засоби автоматизації: навчальний посібник". – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.
4. Батрак В. Г., Стукало В. М. Автоматизація технологічних процесів: навч. посібник. – Київ: Каравела, 2016. – 320 с.
5. Воробйова О.М. Технічні засоби автоматизації: навч. посіб. / Воробйова О.М., Флейта Ю.В. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2018. – 208 с.
6. Дрозд, В.Т., Семенов, І.М. Основи автоматизації технологічних процесів. — Київ: Вища школа, 2019. — 368 с.
7. Єрмоленко, С.А., Мірошніченко, О.М. Прилади і засоби автоматизації: навчальний посібник. — Київ: Ліра-К, 2018. — 192 с.
8. Закон України "Про охорону праці" від 14.10.1992 № 2694-ХІІ. – [Електронний ресурс]. – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
9. Колесніков О.В. *Контролери і системи автоматизації*. – К.: Ліра-К, 2021. – 352 с.
10. Лавриненко, П.М., Зінченко, В.П. Основи автоматизованого управління технологічними процесами. — Харків: НТУ "ХПІ", 2020. — 290 с.
11. Леонтьєв О. Є. "Теорія автоматичного керування: навчальний посібник". – Суми: Сумський державний університет, 2024.
12. Михайлов Г. П. Автоматичне регулювання та керування: підручник. – Київ: Каравела, 2019. – 328 с.
13. Наказ МНС № 1417 від 30.12.2014 "Правила пожежної безпеки в Україні". – [Електронний ресурс]. – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0136-1>
14. ПАТ «Рівнеазот». Загальна технологічна схема виробництва суперфосфату. — Технічна документація підприємства, 2023.
15. Пат. UA 123456. Спосіб сушіння гранульованого амофосу у псевдозрідженому шарі. / Іваненко В.М. – Опубл. 2020.
16. Пархоменко І. В. Автоматизовані системи управління технологічними процесами. – Харків: ХНАМГ, 2020. – 234 с.
17. Пономаренко М. П., Назаренко А. О. Основи проектування автоматизованих систем керування. – К.: Либідь, 2020. – 244 с.
18. Сидоренко В. В. Основи автоматизації технологічних процесів. – Львів: Новий світ–2000, 2021. – 276 с.
19. Тесленко В. М. Основи автоматизації технологічних процесів: навчальний посібник. – К.: Ліра-К, 2021. – 340 с.

20. Тимченко С. М. Теоретичні основи автоматизованого керування технологічними процесами: навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 290 с.
21. Трофименко, С.В., Кучерявий, О.В. Системи автоматичного керування: підручник. — Львів: ЛНУ, 2021. — 356 с.
22. Endress+Hauser. Інструкція з експлуатації витратомірів Venturi. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.endress.com>
23. MathWorks. MATLAB & Simulink Documentation. – [Електронний ресурс]. – <https://www.mathworks.com/help>
24. Siemens. Технічний каталог та документація на датчики температури Pt100. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://support.industry.siemens.com>