

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-68.00.00.000 ПЗ

Група АКП-21-1

М'ясоєдов Даніїл

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

М'ясоєдов Даніїл Тарасович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 665.6:681.5

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

«Автоматизація процесу сушіння глини у прямооточній барабанній
сушарці»

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О. В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-21-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Д.Т. М'ясоєдов

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

І. І. Чигур

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я. Чигур

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

доцент А. І. Лагойда

«___» _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

М'ясоєдову Даніїлу Тарасовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизація процесу сушіння глини у прямооточній барабанній сушарці»

керівник роботи Чигур Людмила Ярославівна, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 07 » 05 20 25 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Технологічна схема об'єкту, параметри проходження процесу, стандарти, каталоги, методичні вказівки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ 1. Опис технологічного процесу сушіння глини з точки зору автоматизації. 2. Техніко-економічне обґрунтування обраного напрямку досліджень. 3. Дослідження контуру регулювання температури у сушарці.

4. Розробка проектної документації системи автоматизації сушіння глини.

5. Розробка програми управління процесом

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

Лист 1 - Функціональна схема автоматизації - БР.АКП-68.00.00.000.01

Лист 2 - Принципова схема зовнішніх з'єднань - БР.АКП-68.00.00.000.02

Лист 3 - Модель контуру регулювання у SIMULINK -
БР.АКП-68.00.00.000.03

Лист 4 - Код програми у MATLAB для знаходження параметрів моделі та побудови кривих розгону - БР.АКП-68.00.00.000.04

Лист 5 - Технологічна схема барабанної сушарки - БР.АКП-68.00.00.000.05

Лист 6 - Структурна схема взаємозв'язків технологічних параметрів барабанної сушарки - БР.АКП-68.00.00.000.06

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис технологічного процесу сушіння глини з точки зору автоматизації	10.05.25-15.05.25	
2	Техніко-економічне обґрунтування обраного напрямку досліджень	16.05.25-20.05.25	
3	Дослідження контуру регулювання температури у барабанній сушарці	21.05.25-25.05.25	
4	Розробка проектної документації системи автоматизації сушіння глини	26.05.25-05.06.25	
5	Розробка програми управління процесом	06.06.25-10.06.25	

Студент _____
(підпис)

Д. Т. М'ясоєдов _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Л.Я. Чигур _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 62 сторінок друкованого тексту, 15 рисунків 4 таблиці, 15 переліків посилань на джерела

Тема: «Автоматизація процесу сушіння глини у прямооточній барабанній сушарці».

Об'єкт дослідження: прямооточна барабанна сушарка

Мета проекту: Розробка системи автоматизації для підвищення якості висушеної глини (стабілізація вологості до $7.5\% \pm 0.5\%$), зниження енерговитрат та забезпечення безпеки процесу.

Методи дослідження: Теоретичний аналіз технології сушіння; Системний підхід до аналізу об'єкта керування; Математичне моделювання САР (MATLAB/Simulink); Синтез ПД-регуляторів методом розширених АФХ; Експериментальна валідація динамічних характеристик.

Результати бакалаврської роботи: Синтезовано одноконтурну САР температури в камері змішування; Розроблено архітектуру автоматизації: 4 контури регулювання (витрата палива, температура, вологість, розрідження); Апаратна реалізація на ПЛК Schneider Electric M340; Програмний код у середовищі Unity Pro.

Ключові слова: автоматизація сушіння глини, барабанна сушарка, ПД-регулятор, функція передачі, MATLAB/Simulink, мікропроцесорний контролер, енергоефективність.

ABSTRACT

The bachelor's thesis comprises: 62 pages of printed text, 15 figures, 4 tables, and 15 bibliographic references.

Topic: "Automation of the Clay Drying Process in a Direct-Flow Drum Dryer".

Object of study: Direct-flow drum dryer.

Project goal: Development of an automation system to improve the quality of dried clay (stabilizing moisture content to $7.5\% \pm 0.5\%$), reduce energy consumption, and ensure process safety.

Research methods: Theoretical analysis of drying technology; Systems approach to analyzing the control object; Mathematical modeling of the automatic control system (ACS) using MATLAB/Simulink; Synthesis of PID controllers using the extended frequency response characteristics (AFR) method; Experimental validation of dynamic characteristics.

Results of the bachelor's thesis: A single-loop temperature control system (ACS) for the mixing chamber was synthesized. The automation architecture was developed, comprising 4 control loops (fuel flow, temperature, moisture content, vacuum/rarefaction). Hardware implementation based on the Schneider Electric M340 PLC. Program code developed in the Unity Pro environment.

Keywords: clay drying automation, drum dryer, PID controller, transfer function, MATLAB/Simulink, microprocessor controller, energy efficiency

ЗМІСТ

ЗМІСТ	7
ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ГЛИНИ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ	13
1.1 Призначення барабанної сушарки та суть процесу сушіння глини.....	13
1.2 Визначення і аналіз факторів які впливають на технологічний процес	17
1.3 Характеристика продукції, сировини, реагентів та номінальні відхилення	19
1.4 Структурна схема взаємозв'язків технологічних параметрів і об'єкта керування.....	21
Висновки до розділу	22
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ І АНАЛІЗ САК.....	24
2.1 Визначення характеристик об'єкта автоматизації	24
2.2 Розрахунок оптимальних настроювальних параметрів автоматичного ПІ-регулятора.....	28
2.3 Побудова перехідного процесу САР.....	33
Висновки до розділу	37
3 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК	39
3.1 Обґрунтування вибору ФСА	39
3.2 Вибір технічних засобів автоматизації.....	45
3.3 Розробка програми функціонування контролера	48
3.4 Специфікація на засоби автоматизації	51
Висновки до розділу	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	62

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		М'ясоєдов Д.Т			АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ГЛИНИ У ПРЯМОТЕЧІЙНІЙ БАРАБАННІЙ СУШАРЦІ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Чигур Л.Я.				7		
Реценз.		Чигур І.І.				АКП-21-1 ІФНТУНГ		
Н. Контр		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система контролю;

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом;

АСУ – автоматизована система управління.

ФСА – функціональна схема автоматизації

ФЧХ – функціонально частотна характеристика

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сушіння — це теплова операція, яка полягає у видаленні вологи (переважно води) з твердих матеріалів шляхом її фазового переходу у пару (випаровування) та подальшого відведення цих парів від поверхні матеріалу. Під час цього процесу відбувається одночасна передача тепла (енергії, необхідної для випаровування) до матеріалу та масоперенесення (дифузія): переміщення вологи з глибинних шарів матеріалу до його поверхні, звідки вона видаляється. Тривалість сушіння є ключовим параметром і визначається як необхідний час, за який вміст зв'язаної та вільної вологи в матеріалі зменшиться від вихідного (початкового) рівня до заданого кінцевого (технологічного) показника.

Головна мета сушіння — покращити технологічні, експлуатаційні або споживчі властивості матеріалу: знизити об'ємну масу (щільність), підвищити механічну міцність та твердість, зменшити липкість, стабілізувати розміри, продовжити термін придатності (зберігання) та зменшити сприйнятливості до біологічного руйнування. Таким чином, процес сушіння суттєво розширює можливості використання матеріалу на подальших технологічних етапах або в різних галузях промисловості.

Причини необхідності сушіння:

Запобігання псуванню під час зберігання. Висока вологість створює сприятливі умови для біологічних процесів: злежування, розвитку мікроорганізмів (бактерій, плісняви), самозігрівання та гниття, а в холодну пору — кристалізації води та промерзання, що призводить до руйнування структури. Це суттєво погіршує товарні якості матеріалів (зовнішній вигляд, запах, консистенцію) й часто призводить до значних втрат.

Вплив на подальшу технологічну обробку. Напівфабрикати з надлишком вологи можуть ускладнювати процеси подрібнення, пресування, гранулювання, пакування; викликати прилипання до обладнання; сприяти утворенню дефектів

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при термічній обробці (тріщини, деформація) та, як наслідок, знижувати якість та стабільність властивостей кінцевої продукції.

Економія витрат при транспортуванні. Значне зменшення маси та об'єму висушеного матеріалу (особливо для гігроскопічних сипучих матеріалів) дозволяє знизити витрати на паливо, оренду транспортних засобів та оплату за перевезення вантажів, особливо коли їх доставляють на значні відстані.

Конвективне сушіння та барабанні сушарки:

У хімічній та суміжних галузях промисловості (будівельній, керамічній, харчовій) найбільш поширеним є конвективний спосіб сушіння. Його часто реалізують у барабанних сушарках: гарячий повітряний потік або інші теплоносії (перегріта водяна пара, інертні гази, димові гази) безпосередньо контактують з матеріалом, передаючи йому тепло через поверхню. Барабанні сушарки особливо ефективні для безперервної обробки значних обсягів кускових, зернистих і сипучих матеріалів (наприклад, глина, пісок, вапняк, мінеральні добрива, тирса).

Матеріал повільно рухається уздовж довгого обертового циліндра (барабана) переважно завдяки невеликому ($1-5^\circ$) нахилу його осі. Під час обертання сировина захоплюється внутрішніми лопатками або перегородками, піднімається на певну висоту, а потім сипучий "дощик" падає вниз. Це створює зону інтенсивного контакту частинок з гарячим потоком газу. Таким чином забезпечується ефективний тепло- і масообмін: в основному конвекцією від газів до поверхні частинок, а також частково через теплопровідність — від нагрітих стінок барабана і внутрішніх елементів апарату. Для оптимізації процесу та збільшення часу контакту часто встановлюють різні внутрішні насадки (лопатки, перегородки, ячейки), що змінюють траєкторію руху частинок, запобігають їх злипанню та сприяють більш рівномірному прогріву і висушуванню по всьому об'єму.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструкція барабанної сушарки відзначається відносною простотою у виготовленні, міцністю та зручністю в обслуговуванні, що робить її популярним та легко інтегрованим компонентом у безперервні виробничі лінії.

Роль автоматизації в сучасних установках:

Щоб повною мірою використати переваги високоінтенсивних сушильних установок (продуктивність, якість) і мінімізувати ризики, необхідна надійна система автоматичного керування (АСКТП). Наприклад, надмірне або нерівномірне підвищення температури теплоносія, його швидкості або тривалості перебування матеріалу в зоні сушіння може призвести до пересушування, опіку, термічного розкладання, утворення агломератів, тобто дефектів у продукції, а в критичних випадках — до виникнення пожеж, вибухів чи механічних пошкоджень апарату. Це особливо актуально в хімічній технології, де можливе застосування чи утворення легкозаймистих і вибухонебезпечних речовин, а також використання дороговартісної сировини. Автоматизація дозволяє безперервно контролювати критичні параметри процесу (температуру на вході/виході, вологість матеріалу до/після сушіння, тиск, витрату теплоносія, швидкість обертання барабана) в реальному часі, швидко реагувати на відхилення від заданих уставок, оптимізувати енерговитрати (частково рециркуляція теплоносія) та гарантовано забезпечувати безпеку персоналу та обладнання.

Комбінований підхід до видалення вологи:

З метою зниження загальних енерговитрат (оскільки теплове сушіння є дуже енергоємним) зазвичай застосовують комбінований підхід. На початкових етапах використовують менш енерговитратні механічні методи видалення значної частини вільної вологи (наприклад, фільтрування, віджимання, центрифугування, часткове осушення природними способами - вентиляція), а остаточне сушіння (видалення гігроскопічної та хімічно зв'язаної вологи) виконують уже тепловим методом (конвективним, контактним тощо). Такий підхід значно підвищує загальну економічну ефективність процесу сушіння.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мета бакалаврської роботи:

Метою цієї роботи є розробка автоматизованої системи керування (АСКТП) процесом сушіння глини в прямотечійній барабанній сушарці з використанням сучасних методів та засобів автоматизації. Це передбачає послідовне виконання наступних завдань: детальний аналіз технологічного процесу та визначення його ключових керованих параметрів; вибір відповідних датчиків (сенсорів) для контролю цих параметрів та виконавчих механізмів (регулюючих органів) для впливу на процес; розробку функціональної схеми автоматизації; синтез та обґрунтування алгоритмів автоматичного регулювання (наприклад, температури, витрати теплоносія, вологості готового продукту); моделювання та/або розробку програмного забезпечення для контролера; впровадження системи з обов'язковим урахуванням вимог промислової безпеки (включаючи вибухозахист, якщо необхідно) та енергетичної ефективності процесу.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ГЛИНИ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ

1.1 Призначення барабанної сушарки та суть процесу сушіння глини

Барабанна сушарка - призначена для безперервного та рівномірного видалення вологи з сипучих або кускових матеріалів (наприклад, глини), забезпечуючи оптимальні умови теплообміну та контрольований рух продукту вздовж сушильного барабана. Завдяки конструкції з нахиленим циліндричним корпусом і внутрішніми лопатками вона дозволяє підтримувати стабільний час перебування частинок у зоні нагріву, регулювати температуру та швидкість газового потоку, що сприяє однорідному висушуванню й збереженню властивостей матеріалу. Основне завдання такої установки - підвищити продуктивність процесу, зменшити витрати енергії та мінімізувати ризик перегріву або локального пересушування, забезпечуючи високу якість готової продукції та надійність роботи в рамках промислової лінії.

Опис технологічної схеми (Рисунок 1.1)

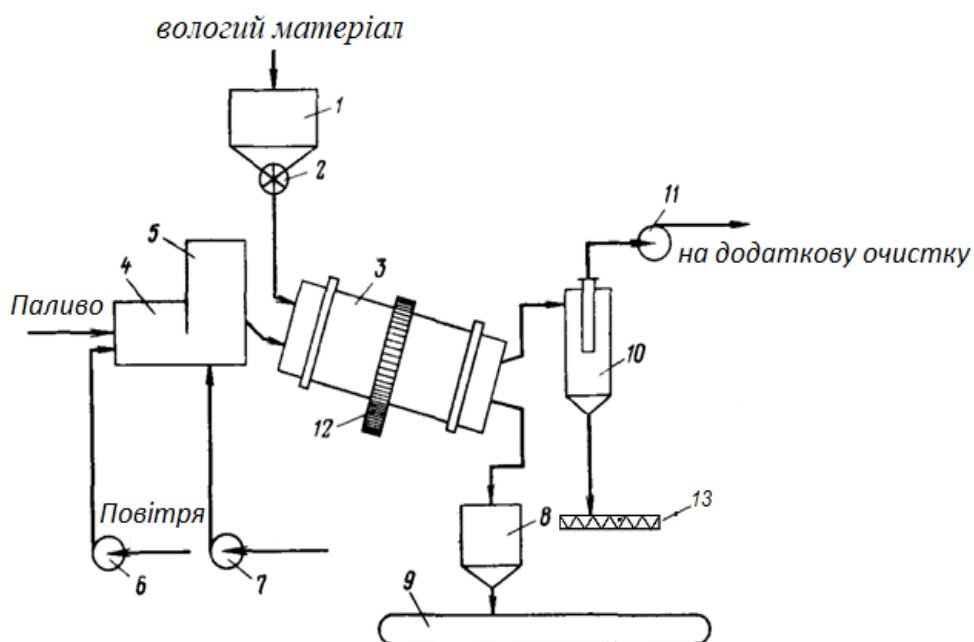


Рисунок 1.1 - Технологічна схема барабанної сушарки

На схемі представлена барабанна сушарка, де паливний газ спалюється в топці (поз. 4), після чого у змішувальній камері (поз. 5) формується сушильний

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

агент — суміш гарячих димових газів та вторинного повітря. Цей агент проходить через внутрішній об'єм барабана (поз. 3), контактує з вологим матеріалом і відводить вологу. Для очищення газового потоку від пилових частинок застосовується циклон (поз. 10), а розрідження в системі забезпечує димосос (поз. 11).

Основні складові лінії

- Бункер сирого матеріалу — накопичує глину перед подачею.
- Живильник вологого матеріалу — дозовано подає сировину в процес.
- Стрічковий конвеєр з високотемпературною стрічкою (~200 °С) — транспортує частково суху сировину чи готовий продукт.
- Гвинтовий конвеєр — забезпечує переміщення матеріалу між різними вузлами.
- Теплогенератор (топка + змішувальна камера) — формує сушильний агент потрібної температури.
- Сушильний барабан (1,5 × 8 м) — основний апарат для теплового сушіння.
- Система газоочищення — зазвичай циклон та, при необхідності, додаткові очисні пристрої.
- Дуттеві і тягові установки: відцентровий вентилятор для подачі повітря та димосос для забезпечення тяги й розрідження.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

апарат. Далі готовий продукт відводиться стрічковим транспортером (поз. 13).

- Відпрацьовані гази та пи́л виводяться через систему пиловідділення (циклон поз. 8 або інші фільтри) та димосос (поз. 9). Вентилятор (поз. 1) зазвичай розташовується після циклона, щоб ротор менше зношувався частинками продукту. Поряд із циклоном також може розміщуватися пристрій для періодичного видалення накопиченого сухого матеріалу (ще один шлюзовий затвор або гвинтовий конвеєр).

Компоненти схеми (згідно з рисунку 1.2)

1. Вентилятор для організації руху дуття або відбору газів
2. Топка, де утворюється гарячий газовий потік
3. Запалювальна труба (розпалювальний пальник)
4. Циліндричний похилий сушильний барабан
5. Живильник-дозатор для рівномірного завантаження матеріалу
6. Охолоджувальна або перехідна лінія (наприклад, охолоджувальна стрічка чи інша система охолодження)
7. Шлюзовий затвор або гвинтовий конвеєр, що запобігає підсосу повітря і регулює вивантаження
8. Циклон або інша система газоочищення від пи́лу
9. Димосос для створення розрідження й відведення газів
10. Мокрий скрубєр (за потреби додаткового очищення газів)
11. Ємність для промивної води або інших рідин (у разі наявності охолодження чи промивання)
12. Насос для циркуляції рідини у мокрих системах очищення чи охолодження
13. Стрічковий транспортер для вивантаженого продукту

Принцип роботи:

1. Завантаження: глина у бункері подається живильником-дозатором у вищу точку барабана.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Сушіння в барабані: контакт між частинками глини й гарячим сушильним агентом забезпечується за рахунок обертання барабана та внутрішніх лопаток, що підіймають і розкидають матеріал. Завдяки нахилу барабана матеріал поступово рухається до виходу.
3. Контроль температури: через змішувальну камеру регулюється температура сушильного агенту, підмішуючи зовнішнє повітря, щоб не перевищувати допустимі значення для даного матеріалу.
4. Відведення вологи: вологі гази разом із дрібними частинками направляються до системи газоочищення (циклон, мокрий скрубєр), де відокремлюється пил, після чого димосос підтримує необхідну тягу.
5. Вивантаження: висушений матеріал виходить через шлюзовий затвор або аналогічний пристрій, який запобігає підсосу повітря й забезпечує герметичність, та транспортується далі стрічковим транспортером.

1.2 Визначення і аналіз факторів які впливають на технологічний процес

Мета керування процесом сушіння глини полягає в отриманні кінцевого продукту з необхідними якісними показниками за заданої продуктивності. Головним критерієм оцінки ефективності виступає параметр, що прямо впливає на якість сушеного матеріалу (зокрема, остаточна вологість глини) або на обсяг виготовленої продукції.

Ефективність конвективного сушіння оцінюють за показником вологості матеріалу на виході з сушарки. Кінцева вологість визначається двома складовими: кількістю вологи, яку “приносить” волога сировина, і обсягом вологи, що видалається в ході сушіння. Перша частина залежить від витрати вологого матеріалу та його початкового вмісту вологи, друга—від умов і параметрів самого процесу.

Інтенсивність сушіння характеризується швидкістю видалення вологи: спочатку вона висока, але у міру наближення матеріалу до рівноважного стану

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкість знижується і поступово наближається до нуля. Така динаміка свідчить про складність реального процесу, в якому враховуються численні взаємопов'язані фактори.

Найбільший вплив здійснюють властивості самого матеріалу: його внутрішня структура визначає, наскільки швидко волога переміщується всередині та виходить назовні; теплофізичні характеристики (теплоємність, теплопровідність) — як ефективно тепло поглинається та передається всередині; а також розмір і форма частинок, стан поверхні та змінювання вологості під час сушіння. З-поміж цих чинників саме внутрішня структура зазвичай відіграє ключову роль у швидкості й рівномірності зневоднення.

Не менш важливі параметри сушильного агента: температура, відносна вологість або парціальний тиск водяної пари, швидкість руху газу відносно матеріалу та робочий тиск у системі. Оптимальний підбір цих величин дозволяє підтримувати необхідний градієнт температури та концентрації пари, що сприяє інтенсивному, але безпечному сушінню.

Склад рідини, яка відділяється від матеріалу, теж може впливати: домішки змінюють її в'язкість, теплопровідність та інші теплофізичні властивості, а також взаємодію з поверхнею твердого скелета глини. Це безпосередньо впливає на швидкість міграції вологи від внутрішніх шарів до поверхні та далі в газове середовище.

З огляду на вищесказане, інтенсифікація процесу досягається за допомогою підвищення температури і швидкості потоку сушильного агента (у межах, допустимих для матеріалу), зменшення початкової вологості сировини та, якщо технологічні умови дозволяють, дробленням або подрібненням матеріалу для полегшення виходу вологи. Додатково можуть застосовуватися енергетичні поля чи інші прискорювачі масо- та теплообміну. Проте слід враховувати, що зростання інтенсивності часто супроводжується підвищеними енергетичними витратами та ризиками створення дефектів у продукті, тому

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

важливим завданням є пошук економічно обґрунтованих і безпечних режимів сушіння.

1.3 Характеристика продукції, сировини, реагентів та номінальні відхилення

Сушіння глини проводиться в прямотечійній барабанній сушарці з використанням гарячих газів, що утворюються при спалюванні природного газу в топці. Ці гази виступають як сушильний агент і проходять крізь обертовий барабан, забезпечуючи необхідне теплообмінне середовище для видалення вологи з матеріалу.

Технічні параметри сушарки для обробки глини:

1. Продуктивність за вологим матеріалом: 15 т/год.
2. Нахил барабана щодо горизонту: 2,62°.
3. Об'єм внутрішнього простору барабана: 30,5 м³.
4. Температурний режим глини: на вході близько 10 °С, на виході досягає приблизно 80 °С.
5. Температура сушильного агента на вході в барабан: 800 °С.
6. Температура газів на виході з барабана: близько 100 °С.
7. Початкова вологість глини: 22 % за масою.
8. Кінцева вологість глини після сушіння: 7,5 % за масою.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Технологічна карта процесу

№	Назва параметру	Одиниця вимірювання	Номінальне значення	Допустимі відхилення
1	Витрата палива	м ³ /Год.	150	5
2	Витрата первинного повітря	м ³ /Год.	1250	30
3	Витрата вторинного повітря	м ³ /Год.	1500	50
4	Температура сушильного агенту на вході в сушарку	°С	800	50
5	Температура сушильного агенту в сушарці	°С	550	20
6	Розрідження в змішувальній камері	Па	-60	10
7	Вологість сухого матеріалу	%	7.5	0.2

1.4 Структурна схема взаємо зв'язків технологічних параметрів і об'єкта керування

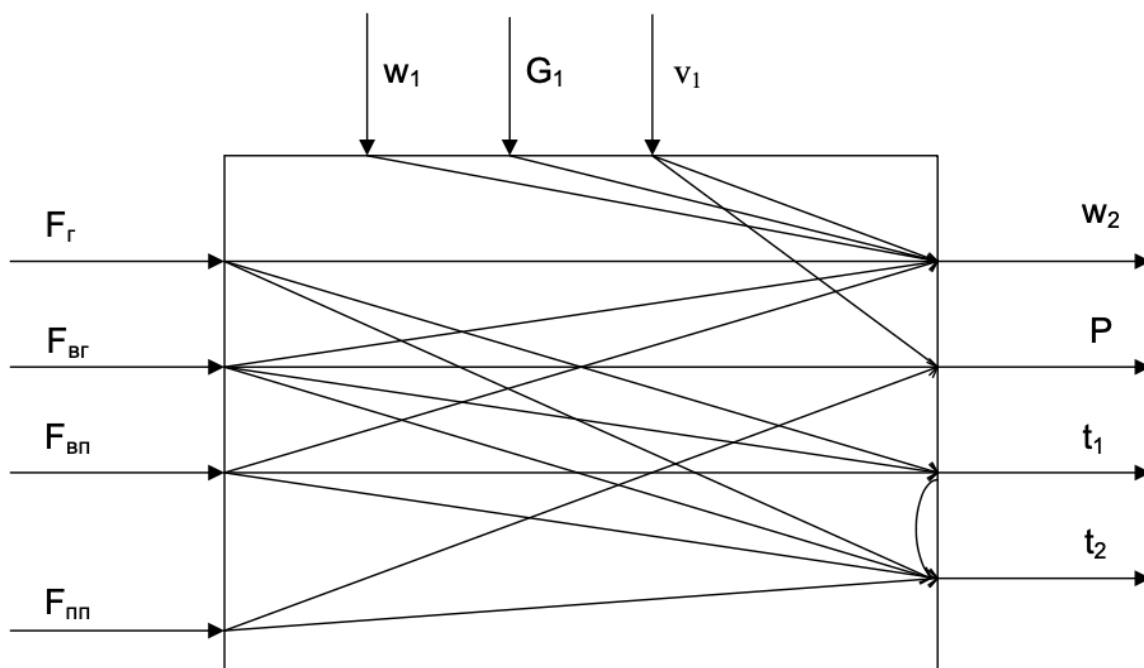


Рисунок 1.3 - Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами барабанної прямотечійної сушарки

Вхідні (керовані) параметри:

- $F_{Г}$ — витрата газу (паливного) у сушарку
- $F_{ПП}$ — витрата первинного повітря на горіння
- $F_{ВП}$ — витрата вторинного повітря для змішування/регулювання температури газів
- $F_{ВГ}$ — витрата відпрацьованого агента (регулює розрідження та швидкість потоку)

Вихідні (регульовані) параметри:

- w_2 — кінцева вологість висушеного матеріалу
- t_1 — температура сушильного агенту у змішувальній камері
- P — розрідження (тиск) у змішувальній камері
- t_2 — температура агенту всередині барабана

Збурюючі параметри:

- w_1 — вологість матеріалу на вході

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

- G_1 — витрата матеріалу на сушку
- v_1 — температура матеріалу на вході

Логіка зв'язків:

- Збільшення $F_r/F_{\text{шт}}$ → підвищує t_1 → впливає на t_2 і інтенсивність сушіння → впливає на w_2 .
- $F_{\text{вп}}$ регулює «охолодження» газів, допомагає тримати t_2 у потрібних межах.
- $F_{\text{вг}}$ (через димосос) формує необхідне розрідження P , визначає швидкість газового потоку та час контакту.
- w_1, G_1, v_1 як збурення: при зміні цих параметрів слід коригувати $F_r/F_{\text{шт}}/F_{\text{вп}}$ або швидкість подачі, щоб підтримати цільове w_2 .

Керування:

- Основна задача — забезпечити w_2 заданої якості при фіксованій продуктивності, утримуючи t_2 у технологічних межах.
- Використовують компенсацію за w_1, G_1, v_1 : вимірювати їх і за потреби змінювати налаштування витрат палива/повітря.
- регулювання: контролювати w_2 (або t_2) і підлаштовувати $F_r/F_{\text{шт}}/F_{\text{вп}}$.
- P контролюється окремим контуром через роботу димососа.

Висновки до розділу

У першому розділі виконано огляд технологічного процесу сушіння глини в прямоотечійній барабанній сушарці та виокремлено ключові складові й зв'язки параметрів для автоматичного керування. Проаналізовано призначення і конструктивні особливості барабанної сушарки, принцип роботи основних вузлів (топка, змішувальна камера, барабан, система очищення газів тощо) і послідовність руху матеріалу та сушильного агенту. Визначено фактори, що впливають на інтенсивність і якість сушіння: властивості матеріалу (внутрішня структура, теплофізичні характеристики, початкова вологість), параметри

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сушильного агента (температура, швидкість потоку, вологість, тиск) та збурюючі умови (витрата та температура сировини).

Розглянуто основні керовані параметри (витрати газу та повітря, розрідження) і механізми їх впливу на кінцеву вологість продукту, а також стратегічні підходи до управління (компенсація за змінами вологості й витрати матеріалу, зворотні і прогностні контури регулювання). Наголошено на потребі збалансованого підходу: забезпечення заданої якості глини при оптимальних енерговитратах і безпеці установки.

Ці висновки слугуватимуть фундаментом для подальшої розробки алгоритмів автоматичного керування, вибору конкретних датчиків і виконавчих механізмів, а також математичного моделювання й налаштування ПД-контурів у наступних розділах роботи.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ І АНАЛІЗ САК

2.1 Визначення характеристик об'єкта автоматизації

У цьому розділі бакалаврської роботи виконано побудову математичної моделі та моделювання системи автоматичного регулювання (САР) температури в камері змішування проточної барабанної сушарки.

Регулююча дія здійснюється шляхом коригування витрати газу, тоді як основним збуренням вважається коливання витрати первинного повітря.

Вихідні дані для моделювання сформовані на основі експериментальної кривої розгону (таблиця 2.1), отриманої при зміні подачі газу на величину 25 м³/год у камеру змішування. Ця крива використана для ідентифікації динамічних параметрів об'єкта регулювання.

Вимоги до якості роботи САР температури в камері змішування встановлено такі:

максимально допустиме динамічне відхилення $A = 50$ с;

допустима похибка регулювання $\Delta = \pm 5$ с;

максимальний час переходу до встановленого режиму $t = 50$ с;

перерегулювання $\delta = 0$.

Таблиця 2.1 – данні експериментальної кривої розгону

t, с		0	0	0	0	0	0	0	0	00	20	50
T, с	00	30	80	20	40	50	60	70	75	80	80	85

Ці показники визначають технічні критерії прийнятності системи: час реакції на збурення та регулюючу дію, точність утримання заданої температури й відсутність перерегулювання. На їх основі здійснюється вибір структури регулятора, налаштування його параметрів (наприклад, у разі ПІД-регулятора) та перевірка стабільності й перестійних характеристик моделі.

З огляду на форму експериментальної кривої розгону, для подальшого моделювання обрано передавальну функцію як послідовне з'єднання двох аперіодичних ланок першого порядку:

$$W_{OP}(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (2.1)$$

де T_1 та T_2 — часові постійні відповідних ланок, а k — коефіцієнт підсилення (коефіцієнт передачі).

Для знаходження параметрів T_1 , T_2 і k широко застосовують метод найменших квадратів (МНК). Суть підходу:

1. Фіксують структуру передавальної функції $W(p;a)$ де вектор параметрів $a = [T_1, T_2, k]$
2. На базі експериментальних даних (відліки температури в часі t_i) обчислюють теоретичні відгуки системи $y(t_i;a)$ (за допомогою моделювання крокової відповіді відповідно до обраної структури).
3. Формують функцію похибки як суму квадратів різниць між експериментальними вимірами $y_{exp}(t_i)$ та моделлю $y(t_i;a)$:

$$J(a) = \sum_{j=1}^N [y(t_j) - y^e(t_j)]^2, \quad j = \overline{1, N}, \quad (2.2)$$

де N — кількість точок, отриманих експериментально.

Шукають такі параметри a , які мінімізують $J(a)$. Це завдання можна вирішувати аналітично (якщо структура проста і можливо виразити похідні $\partial J/\partial a$ та прирівняти їх до нуля, отримавши систему рівнянь для T_1, T_2), або чисельними методами оптимізації.

У практиці часто застосовують чисельний підхід з використанням середовища MATLAB:

- Спочатку задають вихідні масиви часу та експериментальних значень температури наприклад:

Код matlab

$t = [0 \ 10 \ 20 \ 40 \ 50 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90 \ 100 \ 120 \ 150];$

$T_e = [600 \ 630 \ 680 \ 720 \ 740 \ 750 \ 760 \ 770 \ 775 \ 780 \ 780 \ 785];$

$dx = 25;$ % кроковий вплив (зміна витрати газу)

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Далі можна інтерполювати криву для зручнішої побудови:

Код matlab

```
t_i = 0:150;
```

```
Te_i = interp1(t, Te, t_i);
```

- Описують функцію похибки в окремому файл-функції (наприклад, summ.m), де за поточними параметрами $x=[T1, T2, k]$ будують модель:

1. Створюють передавальні функції двох аперіодичних ланок:

Код matlab

```
W1 = tf(k, [T1 1]);
```

```
W2 = tf(1, [T2 1]);
```

```
W = W1 * W2;
```

2. Обчислюють перехідну характеристику:

Код matlab

```
hroz = step(W, t_i);
```

$T_model = hroz * dx + T0;$ % де $T0$ — початкове значення температури (600 у прикладі)

3. Повертають суму квадратів відхилень від експериментальної інтерпольованої кривої:

Код matlab

```
s = sum((T_model' - Te_i).^2);
```

- У головному скрипті викликають оптимізатор, наприклад:

Код matlab

```
x0 = [10, 10, 1]; % початкові припущення для [T1, T2, k]
```

```
x = fminsearch(@summ, x0);
```

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T1 = x(1); T2 = x(2); k = x(3);$$

Пошук здійснюється алгоритмом Нелдера–Міда до мінімізації функції $summ$.

Результати оптимізації за наведеними даними:

- Параметри передавальної функції:
 - $k=7.4$
 - $T1=35$ с,
 - $T2=3$ с.
- Побудована модельна крива порівнюється з експериментальною (рис. 2.1), де точками відзначено вимірні значення, а суцільною лінією — відгук моделі.
- Максимальне відносне відхилення апроксимації становить $\Delta_{max}=1.4\%$.

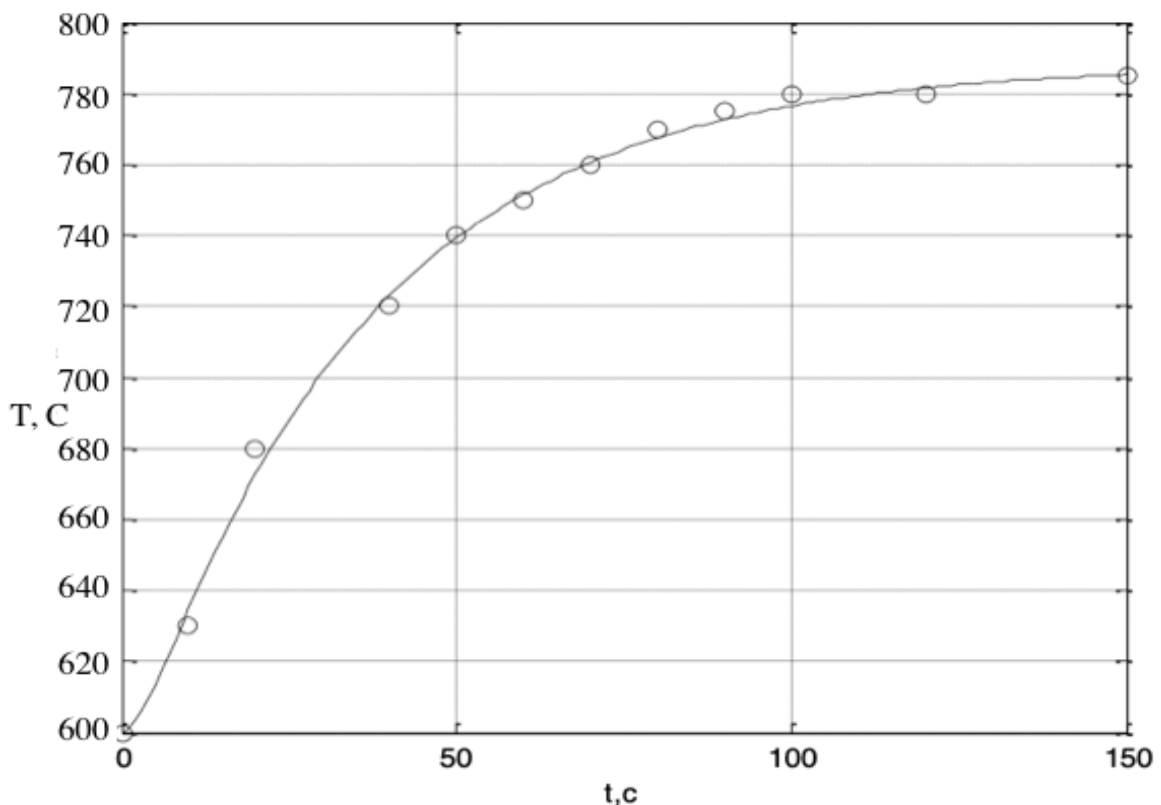


Рисунок 2.1 – Порівняння модельної кривої з експериментальними даними

- Середньоквадратичне відхилення похибки апроксимації (RMS) $\sigma=0.25$ Па.

- Оскільки приведена похибка апроксимації $< 3\%$, модель визнається придатною для подальшого синтезу регулятора.

Таким чином, передавальна функція об'єкта набуває вигляду:

$$W_{op}(p) = \frac{7.4}{(35p+1)(3p+1)}, \quad (2.3)$$

2.2 Розрахунок оптимальних настроювальних параметрів автоматичного ПІ-регулятора

У основі підходу з використанням розширених амплітудно-фазових характеристик (АФХ) лежить аналіз стійкості за критерієм Найквіста. Щоб отримати розширену частотну характеристику елемента з відомою передавальною функцією, у цій функції здійснюють заміну оператора Лапласа s на комплексний аргумент виду

$$p = -m\omega \pm i\omega, \quad (2.4)$$

де ω — кругова частота, а параметр m пов'язаний із бажаним запасом стійкості. Зокрема, реальна частина кореня характеристичного рівняння дорівнює $-m\omega$, а уявна — ω . Параметр m вибирають так, щоб у подальшому задовольнити умови запасу стійкості (зазвичай його визначають із заздалегідь заданої величини запасу по ампліуді або фазі).

Умову забезпечення конкретного запасу стійкості формулюють через розширені частотні характеристики розімкненої системи автоматичного регулювання. Позначимо:

- $W_{об}(j\omega;m)$ — розширена АФХ об'єкта керування;
- $W_p(j\omega;m)$ — розширена АФХ регулятора;

Тоді за критерієм Найквіста умова стійкості системи зі заданим запасом стійкості можна подати у вигляді комплексного рівняння, яке формує систему, що пов'язує амплітудно-фазові характеристики об'єкта та регулятора. З цього співвідношення випливають рівняння для знаходження оптимальних налаштувань регулятора (відомі як рівняння умов запасу стійкості).

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для ПІ-регулятора загальноприйнята форма передавальної функції в частотній області:

$$W(p) = k_p + \frac{k_p}{T_{із}p}, \quad (2.5)$$

Побудова розширеної частотної характеристики об'єкта:

Код matlab

k = 7.4; % коефіцієнт передачі об'єкта

T1 = 35; % перший часовий параметр (с)

T2 = 3; % другий часовий параметр (с)

m = 0.5; % параметр, що відповідає обраному запасу стійкості

w = 0:0.0001:0.4;

p = -m*w + 1i*w;

Wor = k ./ ((T1 .* p + 1) .* (T2 .* p + 1));

phi = phase(Wor);

l1 = -pi/2 + atan(m);

l2 = -pi;

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
plot(w,fi,[0 0.4],[-pi/2+atan(m) -pi/2+atan(m)],[0 0.4],[-pi -pi]); grid; xlabel('w, rad/sec'); ylabel('y, rad');
```

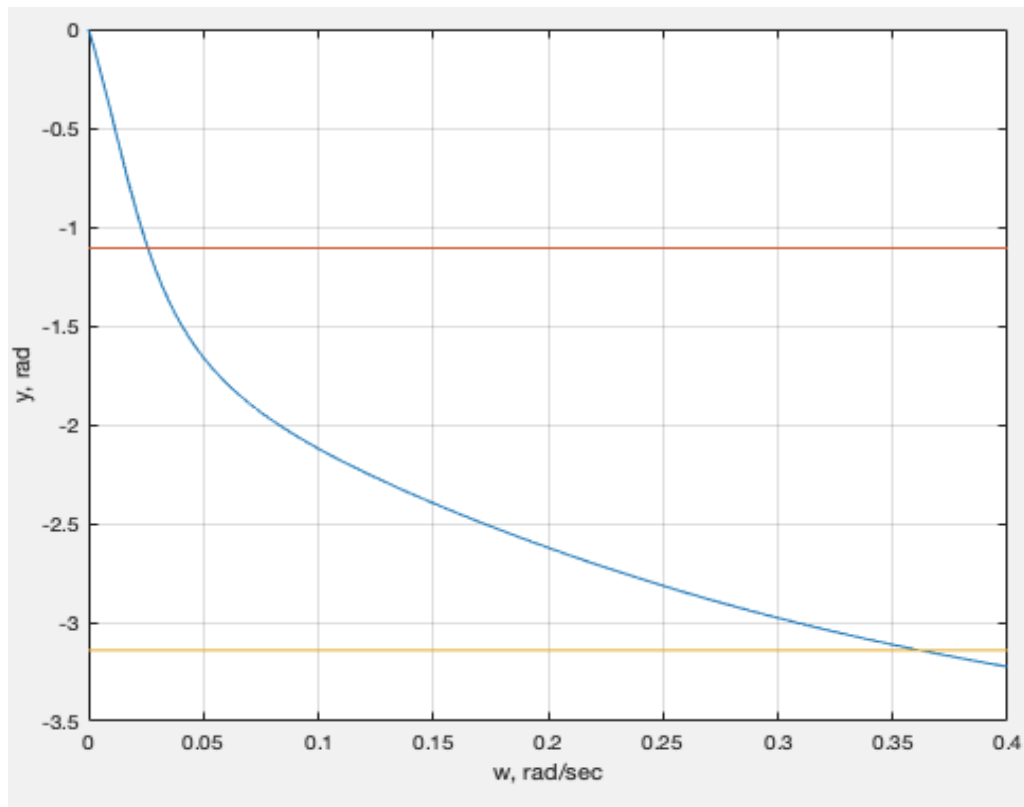


Рисунок 2.2 – Розширена ФЧХ

Далі для заданого m будують у площині параметрів $(k_p, k_p/T_i)$ межу області, що забезпечує необхідний запас стійкості.

Kod matlab

```
clear, clc;
```

```
k = 7.4; % параметри об'єкта
```

```
T1 = 35;
```

```
T2 = 3;
```

```
m = 0.5; % обраний запас стійкості
```

```
w = 0.1:0.001:0.36; % діапазон частот для побудови границі області
```

```
p = -m*w + 1i*w;
```

```
Wop = k ./ ((T1.*p + 1).*(T2.*p + 1));
```

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

```

Aop = abs(Wop);
phi = phase(Wop);
% Знаходження кривої області запасу стійкості:
kp_Tiz = -w .* (m.^2 + 1) .* sin(phi) ./ Aop;
kp = -(cos(phi) + m .* sin(phi)) ./ Aop;
% Для кожної пари (kp(i), kp_Tiz(i)) здійснюємо оцінку J2:
for i = 1:length(w)
    % Збираємо систему:
    Wob1 = tf(k, [T1 1]);
    Wob2 = tf(1, [T2 1]);
    Wob = Wob1 * Wob2;
    Wpi = tf(kp(i), [0 1]) + tf(kp_Tiz(i), [1 0]); % k_p + (k_p/Ti)/p
    Wcl = feedback(Wob * Wpi, 1); % замкнена система
    t = 0:0.5:300;
    y = step(Wcl, t) * 25; % масштабування впливу
    S(i) = trapz(t, y.^2);
end
[Jmin, idx] = min(S);
kp_opt = kp(idx);
kp_Tiz_opt = kp_Tiz(idx);
Ti_opt = kp_opt / kp_Tiz_opt;

% Графік області запасу стійкості та точка оптимуму:
figure; plot(kp, kp_Tiz, 'k', kp_opt, kp_Tiz_opt, '*k'); grid;
xlabel('k_p'); ylabel('k_p/T_i');
title('Границя області запасу стійкості та оптимальні налаштування');

% Графік J2 як функції k_p:
figure; plot(kp, S, 'k', kp_opt, Jmin, '*k'); grid;

```

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

```
xlabel('k_p'); ylabel('J_2');
title('Інтегральна оцінка якості від k_p');
```

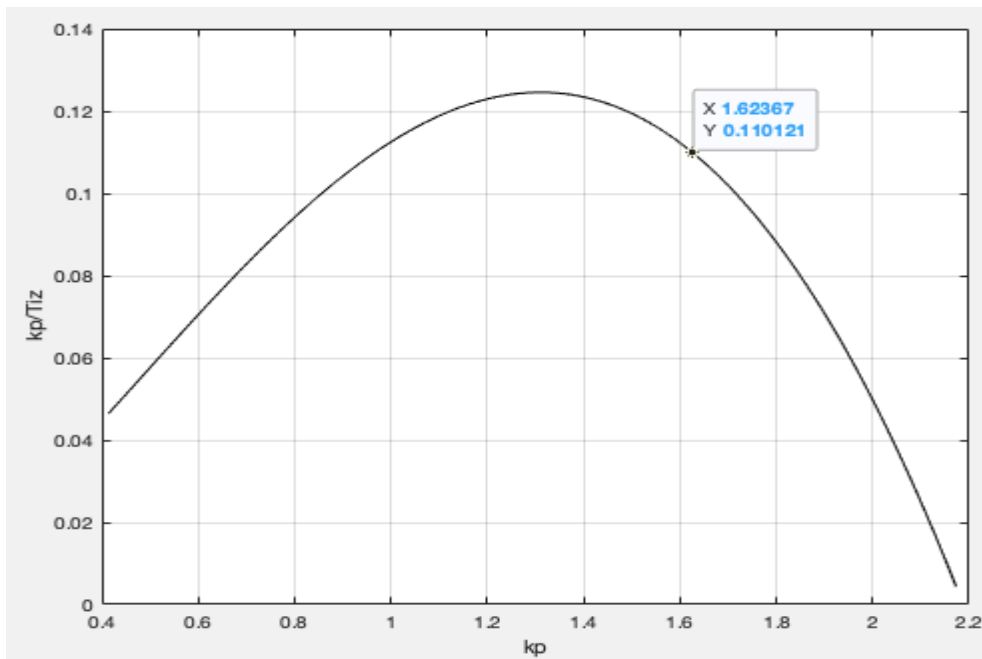


Рисунок 2.3 – Інтегральна оцінка якості від K_p

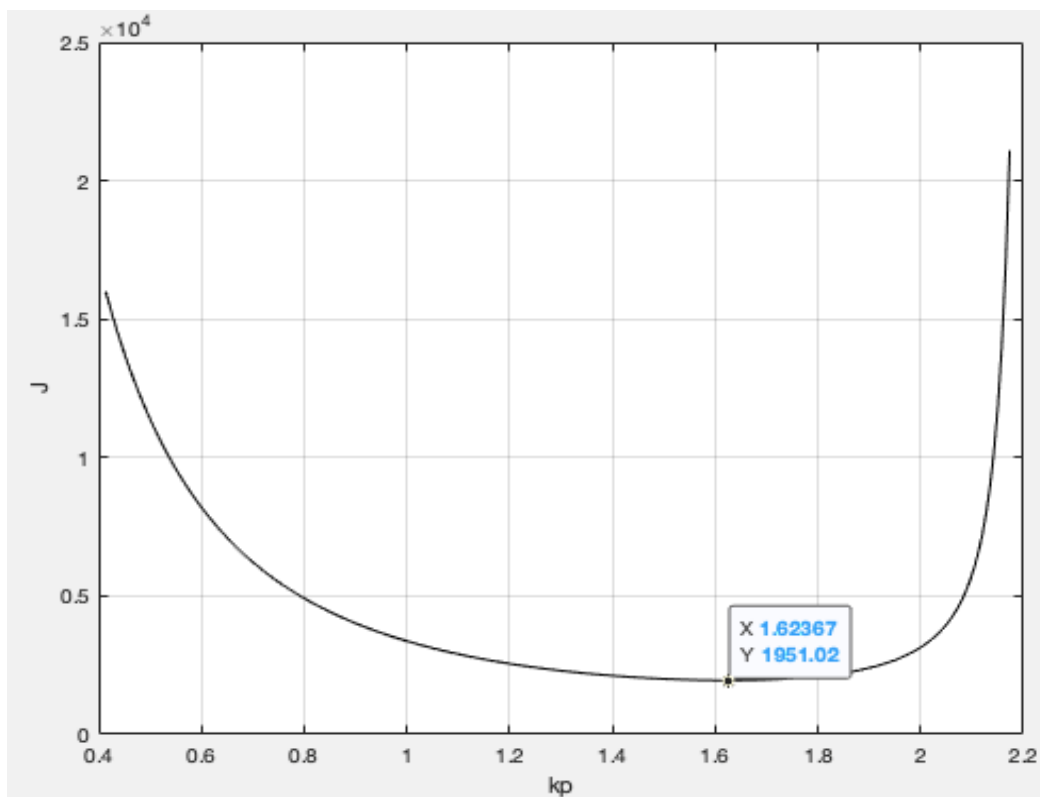


Рисунок 2.6 - Границя області запасу стійкості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таким чином, виконано:

1. Побудову розширеної ФЧХ об'єкта для аналізу умови запасу стійкості.
2. Визначення критичних частот ω_i і ω_c
3. Формування границі області стійкості у площині налаштувань регулятора.
4. Оптимізацію параметрів регулятора за інтегральним критерієм якості переходу.
5. Отримання підсумкової передавальної функції регулятора, що задовольняє технічним вимогам до якості перехідного процесу.

2.3 Побудова перехідного процесу САР

Формуємо модель цього контуру регулювання в середовищі Simulink (рисунок 2.7), використовуючи обчислені параметри ПІ-регулятора.

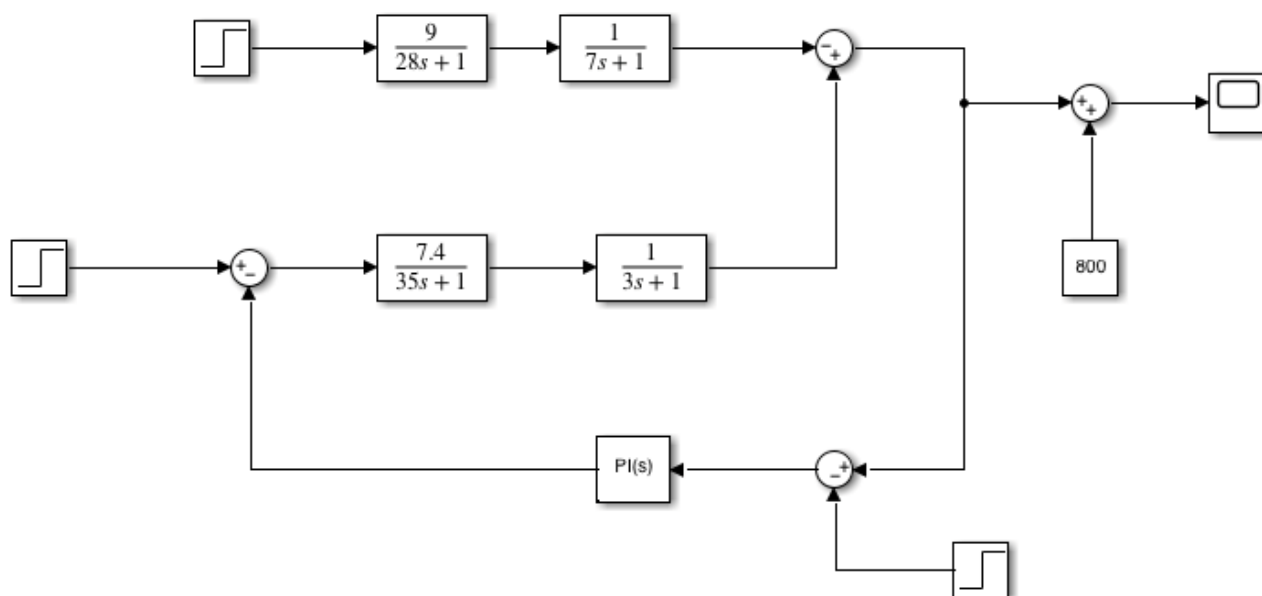


Рисунок 2.7 – модель контуру регулювання

Виконаємо моделювання перехідної характеристики САР під дією збурення: подачі первинного повітря у кількості 25 м³/год (рисунок 2.8)

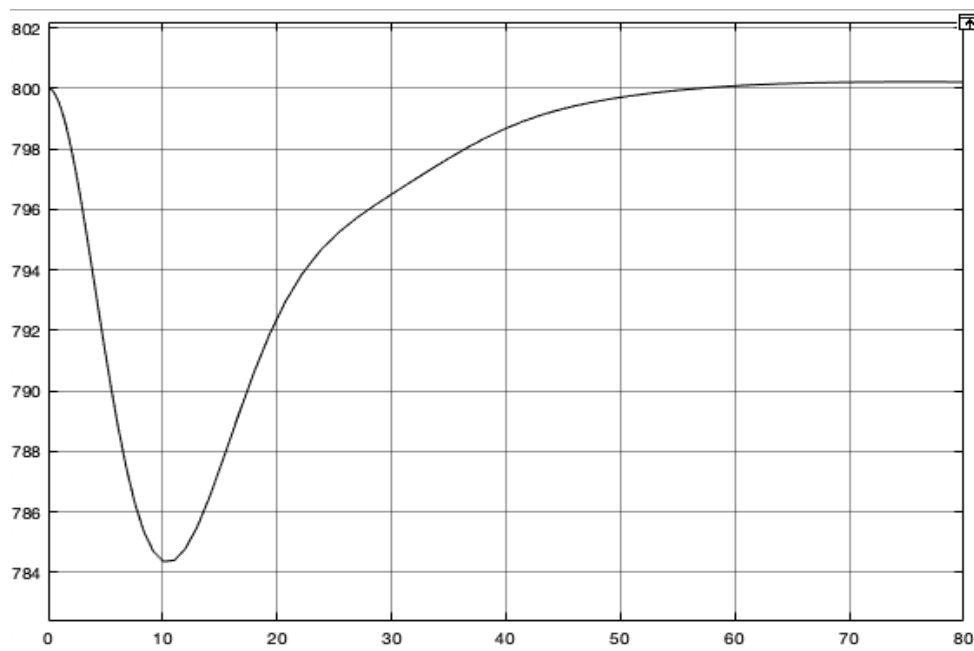


Рисунок 2.8 – моделювання перехідної САР під дією збурення

На основі отриманої перехідної характеристики перевіряю, чи відповідає САР встановленим вимогам якості регулювання при зміні регулюючої дії, порівнюючи результати з допустимими значеннями: максимальне динамічне відхилення становить $\Delta_1=15, ^\circ\text{C}$; час виходу на усталений режим $t_p=20\text{c}$ при допустимій похибці $\Delta=5^\circ\text{C}$. Аналіз кривої розгону демонструє, що із застосованим ПІ-регулятором усі критерії якості перехідного процесу виконуються.

Проведемо моделювання перехідної характеристики системи за умов різкої зміни витрати на 25 м³/год.

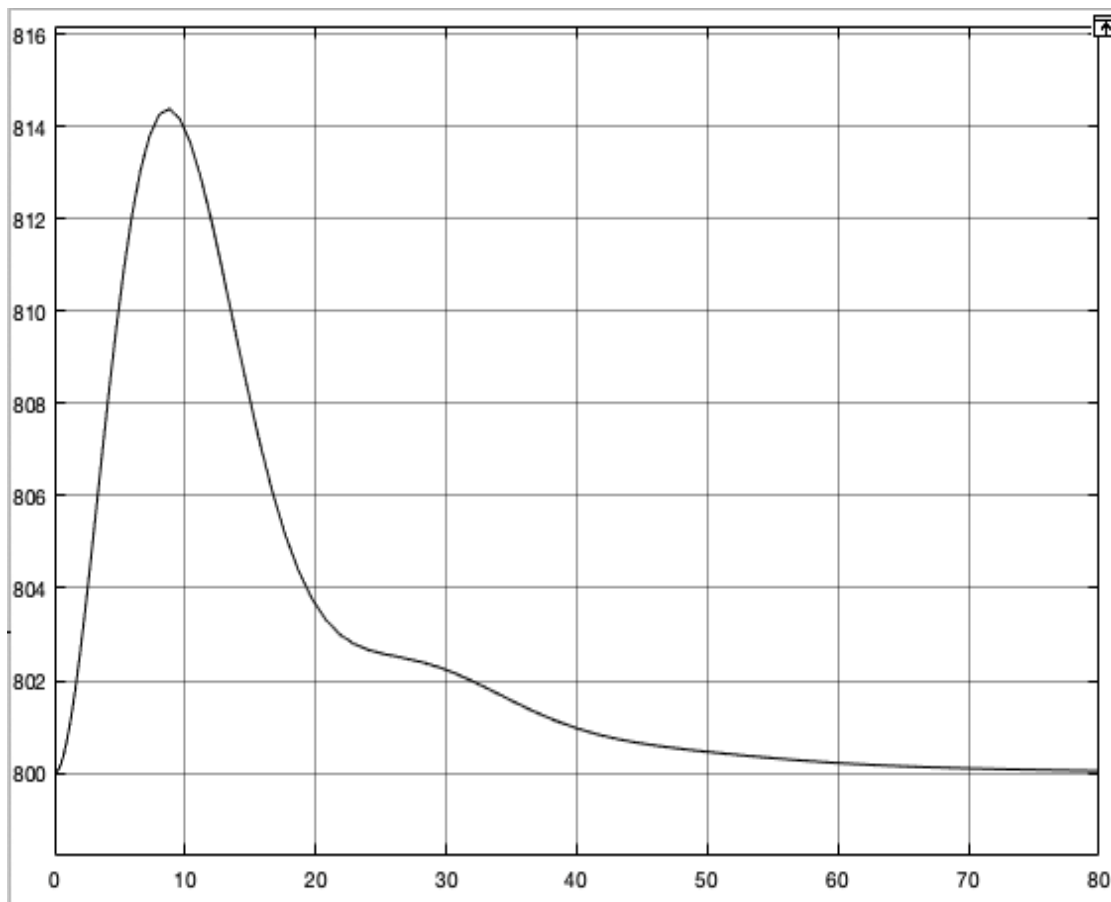


Рисунок 2.9 – моделювання перехідної САР за умови різкої зміни витрати

На основі отриманої перехідної характеристики оцінюється, чи задовольняє система автоматичного регулювання встановлені вимоги до якості регулювання при зміні регулюючої дії. Зіставляючи розраховані показники з допустимими межами, маємо: максимальне динамічне відхилення становить $\Delta_1=14,2$ °С, а час регулювання дорівнює $t_p=30$ с при допустимій статичній похибці $\Delta=5$ °С.

Аналіз отриманої кривої розгону дозволяє зробити висновок, що впровадження ПІ-регулятора забезпечує відповідність усім критеріям якості перехідного процесу в межах заданих вимог.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Моделюємо поведінку САР у випадку зміни заданого значення регульованого параметра на 25 °С

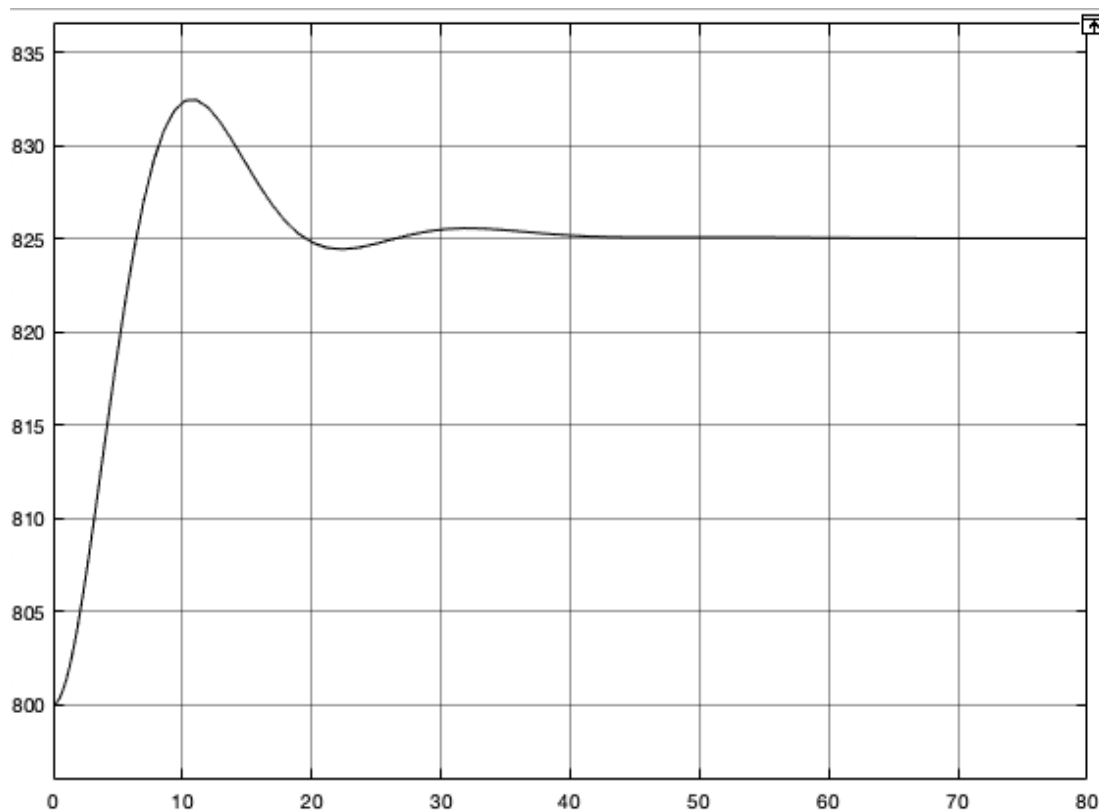


Рисунок 2.9 – моделювання переходної САР у випадку зміни заданого значення

У середовищі Simulink реалізовано математичну модель системи, яка дала змогу змоделювати переходні процеси в умовах:

- зміни заданого значення регульованої величини;
- впливу зовнішнього збурення;
- стрибкоподібної зміни регулюючої дії.

Модель підтвердила ефективність запропонованого підходу до автоматизації процесу сушіння та відповідність обраного регулятора технічним вимогам.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таблиця 2.2 - показники якості перехідного процесу:

Канал дослідження	$A_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_p, \text{ c}$	$\Psi, \%$
Регулююча дія	14.2	30	98
Збурююча дія	15.2	20	85
Зміна завдання	9	17	88
Вимоги до якості	50	50	-

Отже, досліджена система автоматичного регулювання задовольняє вимоги по якості.

Висновки до розділу

У другому розділі бакалаврської роботи проведено повний цикл математичного моделювання та ідентифікації об'єкта автоматизації — системи керування температурою в камері змішування прямої барабанної сушарки.

Для побудови математичної моделі було виконано ідентифікацію об'єкта регулювання за експериментальними даними. У результаті визначено передавальну функцію у вигляді послідовного з'єднання двох аперіодичних ланок першого порядку з високою точністю апроксимації (максимальне відносне відхилення – 1.4%, RMS – 0.25), що підтверджує достовірність моделі.

Застосовуючи методику розширених амплітудно-фазових характеристик, проведено розрахунок оптимальних параметрів ПІ-регулятора, який забезпечує необхідний запас стійкості та задовольняє інтегральний критерій якості регулювання. Після цього побудовано замкнену систему автоматичного регулювання та виконано моделювання її роботи в середовищі Simulink.

Аналіз результатів перехідних процесів показав, що система з розрахованим ПІ-регулятором демонструє високу якість регулювання за всіма критеріями: час встановлення, відсутність перерегулювання, точність та швидкість реакції на збурення. Зокрема, в усіх випадках максимальне відхилення

не перевищує 15.2 °С, а час перехідного процесу становить не більше 30 с, що суттєво менше допустимих меж.

Таким чином, розроблена система автоматичного регулювання температури в камері змішування є ефективною, стабільною та придатною до практичного впровадження в системі керування сушильним процесом.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК

3.1 Обґрунтування вибору ФСА

ФСА складається з п'яти основних контурів керування та окремої захисної схеми. Кожен контур використовує типові датчики перепаду тиску, температури або вологості, а також виконавчі механізми (позиціонери й частотні перетворювачі).

Контур 1. Підтримка співвідношення витрат палива та первинного повітря

1. Датчик витрати газу: на газопроводі встановлена калібрована діафрагма ДК6-60 (позиція 1-1), перепад тиску з якої фіксує дифманометр «Сафір-М» моделі 2440 (4–20 мА, поз. 1-2).
2. Датчик витрати повітря: аналогічна схема з діафрагмою ДК6-125 (поз. 1-3) і дифманометром «Сафір-М» моделі 2450 (4–20 мА, поз. 1-4).
3. Регулювання: вихідні струми обох датчиків надходять у блок масштабування SCALING, потім — у блок добування кореня K_SQRT. Отримані сигнали передаються в блок DIV, де обчислюється їх відношення. Результат виступає як поточна величина (PV) регулятора, а встановлене співвідношення — як завдання (SP).
4. Виконавчий механізм: керуючий сигнал із регулятора надходить на електропневматичний позиціонер Samson 3241 (поз. 1-6), що керує дросельним клапаном на лінії первинного повітря.

Контур 2. Контроль температури в камері змішування через регулювання газу

1. Датчик перепаду тиску вторинного повітря: діафрагма ДК6-200 (поз. 2-1) та дифманометр «Сафір-М» 2450 (поз. 2-2).
2. Температурний датчик: термоелектричний перетворювач Sitrans TH200 (поз. 3-1) монтується на вході в камеру.
3. Алгоритм: сигнал з дифманометра масштабується та корениться, стає PV; SP задається оператором. Регулятор видає керуючий сигнал OUT_LS,

						БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
							39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

який після SCALING подається на позиціонер Samson 3241 (поз. 3-4), монтується на газовому трубопроводі.

4. Сигналізація: перевищення температурного порогу відстежується блоком COMPARE.

Контур 3. Підтримка температури сушильного агента з урахуванням вологості матеріалу

1. Датчик вологості: вологомір Мікрорадар-113 (поз. 4-3) подає сигнал у SCALING, далі — у допоміжний регулятор.
2. Температурний датчик сушильного агента: термоперетворювач масштабується, стає PV для допоміжного PID-блоку. Спрацьовує feed-forward: вихід допоміжного регулятора (OUT_MS) задає SP для основного PIDFF, а також подається в його вхід AIN_i.
3. Основний регулятор: на виході формує OUT_IS, який після SCALING переходить на аналоговий вихід.
4. Контроль межі: верхній поріг вологості або температури контролюється блоком COMPARE.

Контур 4. Регулювання розрідження в змішувальній камері

1. Датчик розрідження: перетворювач «Сафір-М» модель 2201 (поз. 5-1) вимірює вакуум у камері.
2. Регулятор: масштабований сигнал надходить у PIDFF, який видає OUT_MS. Після SCALING вихідний сигнал керує частотним перетворювачем ATV 320, що регулює швидкість димососа.
3. Сигналізація: верхній та нижній пороги вакууму відстежуються блоком COMPARE.

Контур 5. Захист і блокування подачі газу та повітря

1. Полум'я: пристрій контролю факелу РКП-1 (поз. 6-1) слідкує за наявністю або згасанням полум'я.
2. Контроль тиску: реле РД-2В встановлено на лініях подачі газу (поз. 7-1), первинного (поз. 8-1) та вторинного (поз. 9-1) повітря.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Логіка захисту: усі дискретні сигнали від полум'я контролю та реле тиску потрапляють у логічну схему, яка у випадку аварії формує „1” на виході та миттєво розмикає відповідні клапани або вентиля для припинення подачі.

Таким чином, ФСА на аркуші 1 включає чітко розділені контури вимірювань і регулювання, кожен із яких має власні датчики, регулятори й виконавчі механізми, а також є єдина захисна структура для безпеки всього технологічного процесу.

Функціональні схеми автоматизації прямої барабанної сушарки можуть бути реалізовані з різними рішеннями виконавчих засобів — як на електричних приводах, так і з пневматикою. Один із загальноприйнятих варіантів показано на рисунку 3.1.

На цій спрощеній схемі виділено такі контури керування:

1. Контур регулювання співвідношення палива та повітря.
2. Контур підтримки температури в камері змішування.
3. Контур регулювання температури в самому барабані сушарки із врахуванням вологості матеріалу, що висушується.
4. Контур підтримки розрідження (надмірного тиску) у камері змішування.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

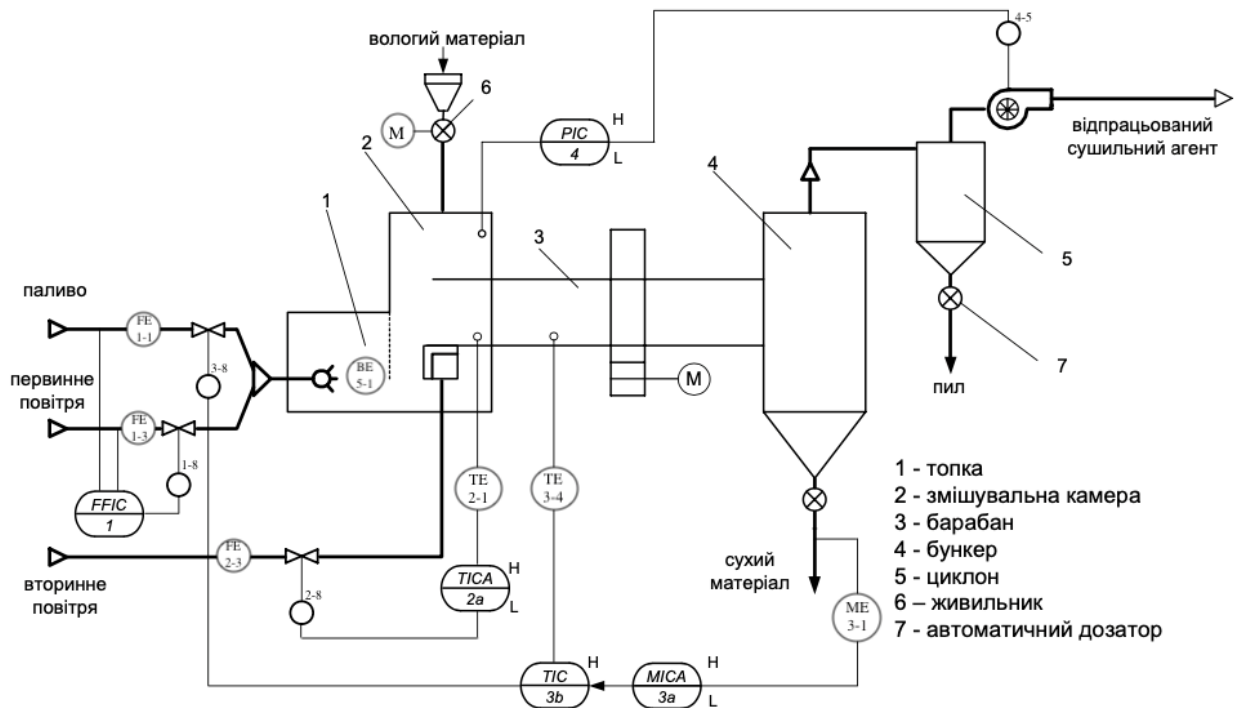


Рисунок 4.1 - Спрощена схема прямої барабанної сушарки

Зокрема, якщо на вхід барабана надходить матеріал із підвищеною вологістю, датчик вологості фіксує це і подає сигнал на відповідний регулятор. У результаті відбувається збільшення подачі газу до камери спалювання, щоб компенсувати додатковий тепловий дефіцит. Водночас регулятор температури в камері змішування активізує більший об'єм вторинного повітря, що змішується з продуктами згоряння. Через це фактична температура теплоносія при подачі до сушарного барабана залишається на тому самому рівні, незважаючи на зміну витрати палива. Така взаємодія контурів призводить до конфлікту в системі керування: при спробі компенсувати підвищену вологість одні регулятори змінюють свої виходи, а інші — автоматично протидіють цим діям, щоб утримати сталу температуру носія.

Оскільки подібний пережресний вплив знижує ефективність та стабільність роботи сушарки, у подальшій частині роботи розглянуто скориговану схему керування. Вона враховує описані взаємозв'язки та запобігає конфлікту між контурами; запропонована модифікація наведена на рисунку 4.2.

У даній роботі для автоматизації процесу сушіння глини в прямоточній барабанній сушарці обрана схема, представлена на рисунку 3.2

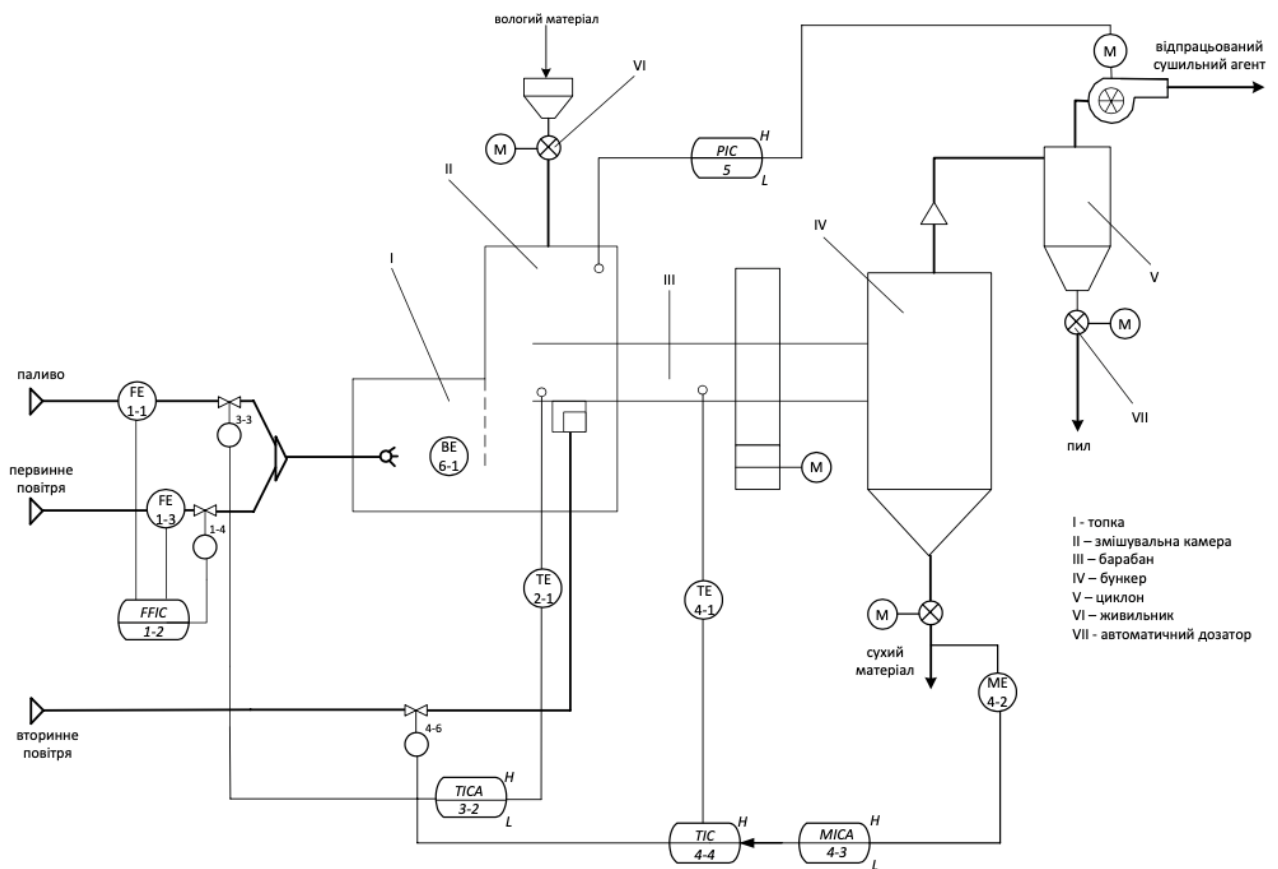


Рисунок 3.2 - Спрощена функціональна схема автоматизації (ФСА) процесу сушіння глини в прямоточній барабанній сушарці.

Заплановано реалізацію таких контурів керування:

- Контур 1: підтримка оптимального співвідношення витрат палива та первинного повітря.
- Контур 2: регулювання температури в камері змішування за допомогою коригування подачі газу.
- Контур 3: забезпечення необхідної температури сушильного агента всередині барабана сушарки з урахуванням вологості матеріалу, що надходить на сушіння.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- Контур 4: підтримка заданого розрідження (або тискового режиму) у змішувальній камері.

Крім контурів керування, передбачено систему захисту за такими ключовими параметрами:

1. Тиск газу (щоб запобігти небезпечним надлишкам або нестачі палива).
2. Тиск первинного повітря (для уникнення порушення складу горіння).
3. Тиск вторинного повітря (щоб контролювати умови змішування газів і уникнути коливань температури).
4. Фіксація погасання факела (щоб миттєво відключити подачу палива у разі зникнення полум'я).

Така конфігурація контурів дозволяє координовано реагувати на зміну вологості глини та інших зовнішніх факторів: наприклад, при підвищеній вологості матеріалу контур 3 вмикає відповідну корекцію параметрів подачі тепла до барабана, а інші контури узгоджують подачу повітря і газу так, щоб мінімізувати ризики нестабільного горіння чи зниження ефективності сушіння. Захисні механізми додатково забезпечують відключення або переведення системи в безпечний стан у разі виходу критичних параметрів за межі допустимих.

Якщо є необхідність уточнити, які саме датчики (типи, діапазони вимірювання) або виконавчі пристрої (клапани, заслінки, серводвигуни чи пневмоциліндри) застосовуються у вашій системі, можна додати відповідний опис. Аналогічно, для реального впровадження слід вказати обрану апаратну платформу (наприклад, конкретний ПЛК або контролер) та стратегії алгоритмічної обробки сигналів (ПІД-регулятори, адаптивні чи розмивні схеми корекції). Це робить опис більш детальним і підкреслює ваш власний підхід до автоматизації процесу.

Таким чином, у тексті підкреслюється:

- узгоджене функціонування кількох контурів, що враховують взаємозв'язки між температурою, витратою палива та подачею повітря;

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- адаптація режиму під змінні властивості матеріалу (вологість глини);
- наявність засобів безпеки для роботи в штатних і позаштатних умовах.

Надалі можна деталізувати налаштування кожного контуру: наприклад, описати, як підбираються коефіцієнти ПІД-регулятора для підтримання стабільного розрідження чи температури, які алгоритми корекції вологості використовуються (напр., feedforward-корекція на основі прогнозу вологості), а також як реалізовано моніторинг і логування аварійних подій для аналізу роботи системи.

3.2 Вибір технічних засобів автоматизації

Для автоматизації процесу сушіння глини було обрано компактний програмований логічний контролер Modicon M340 від Schneider Electric.



Рисунок 3.3 – зображення Modicon M340

Незважаючи на свій невеликий розмір, він забезпечує можливості PLC високого рівня та легко інтегрується завдяки середовищу розробки Unity Pro, яке значно спрощує створення, налагодження й введення в експлуатацію прикладних програм.

Ключові функціональні можливості M340

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Підрахунок імпульсів: два 60 кГц канали або вісім 10 кГц каналів із 32-бітовим лічильником, час циклу 1 мс, реєстри захоплення з реакцією < 200 мкс;
- Розширені налаштування: фільтрація за кожним входом, вибір рефлексивних функцій, генератор імпульсів, обмежувач ходу;
- Універсальне під'єднання: USB та Ethernet (точка-точка або через LAN) для завантаження/завантаження програм, віддаленої діагностики через вбудований веб-сервер і обміну файловими даними;
- Модульна архітектура: шасі на 4, 6, 8 або 12 слотів, на яких можна встановити до 64 дискретних входів/виходів, змішані модулі (8 входів + 8 виходів або 16 входів + 16 виходів), а також аналогові модулі.

Мережеві інтерфейси та розширення

- CANopen до 63 пристроїв
- Ethernet до 63 пристроїв
- Modbus RTU до 32 пристроїв

Загальна місткість I/O сягає 1 024 дискретних та 256 аналогових каналів при мінімумі в 16 каналів. Живлення — 24 V DC або 48 V DC (можливе підключення змінної напруги 24 V, 48 V, 110 V). Дискретні входи підтримують PNP/NPN, із дво- або трипровідним з'єднанням, при виборі модулів слід враховувати електричну ізоляцію.

Аналогові модулі

- Входи: стандартний 4-канальний модуль ± 10 В/0–20 мА/4–20 мА (16-біт АЦП, опитування всіх каналів за 5 мс); спеціалізовані 4- або 8-канальні модулі для термопар і Pt-датчиків; модуль для змінного резистора (± 40 мВ... $\pm 1,28$ В, 16-біт АЦП, 400 мс на всі канали).
- Виходи: єдиний 2-канальний ЦАП ± 10 В/0–20 мА/4–20 мА, 16-біт, швидкість перетворення < 1 мс.

Пам'ять та програмне забезпечення

Внутрішня RAM розділена на області даних (локалізовані та нелокалізовані),

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

програм, коментарів і символів, констант та онлайнних змін. Змінні не зберігаються на карті пам'яті — на ній містяться лише програма, коментарі, символи, константи та, за наявності Ethernet-CPU, файли веб-сервера. Програмування здійснюється в Unity Pro (версії S для M340, M для M340/Premium, та базова для Quantum) із підтримкою однозадачної та багатозадачної архітектури.



Рисунок 3.5 – Зображення Samson 3241

Обрана конфігурація для даної системи

Враховуючи потребу в 8 аналогових входах, 4 аналогових виходах, 4 дискретних входах та 1 дискретному виході, було закомпоновано:

- VMX AMI 0410 × 2 (аналогові входи)
- VMX AMO 0802 (аналогові виходи)
- VMX DD M16022 (дискретні входи/виходи)
- CPS 2000 (модуль живлення)
- P34-2000 (процесорний модуль)

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ця конфігурація повністю відповідає вимогам і забезпечує необхідний набір I/O для стійкої та гнучкої роботи автоматизованої системи сушіння.



Рисунок 3.4 – Зображення Сафір-М

3.3 Розробка програми функціонування контролера

Програма контролера побудована у вигляді модульної послідовності функціональних блоків. Кожен блок приймає вхідні сигнали певного формату, обробляє їх відповідно до внутрішніх параметрів і віддає результат на подальшу обробку або на вихід.

Перелік основних блоків і їх призначення

- IN — отримує значення у форматі Real; зазвичай застосовується для масштабування вхідного сигналу.
- PARA — містить набір налаштувань блока: чотири змінні Real (які входять у формулу перетворення) та один логічний прапорець slip (Bool) для обмеження результату.
- HALT — фіксує вихідний сигнал: при 1 значення на виході утримується на останньому стані.
- LAG — виконує першопорядкову фільтрацію; параметр Gain задає коефіцієнт фільтрації, а Time — часову постійну фільтра. Результат доступний у YMAN (Real) у ручному режимі.

						БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			48

- K_SQRT — добування квадратного кореня з попередньо масштабованого сигналу.
- DIV — виконує ділення двох Real-значень (найчастіше — співвідношення двох потоків).
- COMPARE — порівнює вхідне значення з заданим порогом, видає сигнал тривоги при перевищенні.
- PIDFF — комбінований блок ПІД-регулятора з урахуванням feed-forward; має стандартні входи PV, SP, виходи OUT_MS та OUT_IS. Додатково підтримує ручний режим (MAN_AUTO), дистанційне керування (TR_I, TR_S) і службове слово STATUS.
- RCPY — примусове скидання виходу регулятора на початкове значення при переході у новий цикл обчислень.

Перетворення між форматами: Integer ↔ Bool/Byte/Word/DWord/DInt/Real — здійснюється відповідними функціональними блоками-конверторами.

Контур 1: Співвідношення витрат палива та первинного повітря

1. Сигнал з тискового датчика газу надходить на блок SCALING для приведення до уніфікованого діапазону.
2. Промасштабований сигнал обробляється блоком K_SQRT.
3. Аналогічні операції виконуються із сигналом від датчика первинного повітря.
4. Результати обох квадратних коренів подаються на вхід DIV, де обчислюється їхнє відношення.
5. Отриманий відношення йде до входу PV основного регулятора, а задане значення — на SP.
6. Регулятор видає керуючий сигнал OUT_MS, який знову масштабується в SCALING і виводиться на аналоговий вихід.

Контур 2: Підтримка температури в камері змішування

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Вхідний сигнал від датчика тиску масштабується в SCALING і далі перетворюється в K_SQRT.
2. Отриманий результат стає PV регулятора, а SP задається оператором.
3. Блок PIDFF генерує керуючий сигнал OUT_LS, який потім обробляється SCALING і виводиться на лінію газу.
4. Для сигналізації перевищення максимальної температури використовується блок COMPARE.

Контур 3: Регулювання температури сушильного агента з урахуванням вологості

1. Сигнал вологості надходить на SCALING, після чого передається на допоміжний PID-блок як PV.
2. Термоперетворювач дає сигнал, який також масштабується і стає SP для допоміжного регулятора.
3. Допоміжний регулятор видає OUT_MS — це завдання для основного PID-FF. Одночасно цей сигнал подається на вхід AIN_ і основного блока.
4. Основний PID-FF обчислює OUT_IS, що є остаточним керуючим сигналом.
5. Після SCALING цей вихід відправляється на аналоговий вихід устаткування.
6. Перевищення допустимого діапазону контролюється блоком COMPARE.

Контур 4: Підтримка розрідження в змішувальній камері

1. Сигнал із вимірювача розрідження обробляється в SCALING і стає PV для регулятора PIDFF.
2. Регулятор формує OUT_MS, який масштабується і виходить на відповідний виконавчий пристрій.
3. Верхня й нижня межі контролюються через блок COMPARE.

Контур 5: Захист і блокування подачі газу та повітря

У цьому контурі задля безпечного відключення застосовані комбінації нормально-замкнених та нормально-розімкнених контактів. При аварійній

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ситуації рівень сигналу переходить у стан “1” і спрацьовує реле тиску, яке миттєво перекриває подачу газу та повітря.

3.4 Специфікація на засоби автоматизації

Таблиця 3.1 - специфікація

№ п/п	№ поз.	Назва параметра і номінальне значення	Місце встановлення	Назва засобу та коротка технічна характеристика	Тип	К-ть
1	1-1	Витрата газу 120м ³ /год	Трубопровод подачі газу	Діафрагма камерна P _y =0.6МПа; D _y =60мм	ДК6-60	1
2	1-2		По місцю	Перетворювач перепаду тиску. Верхня межа вимірювання 16 кПа; межа допустимої основної похибки 0,5% від верхньої межі вимірювання. Вихідний сигнал 4 ÷ 20 мА.	Сафір М модель 2440	1

Продовження таблиці 3.1

3	1-3	Витрата первинного повітря 1250 м ³ /год.	Трубопровод первинного повітря	Діафрагма камерна P _y =0,6 МПа; D _y =125 мм	ДК6-125	1
---	-----	--	--------------------------------	---	---------	---

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

4	1-4		По місцю	Перетворювач перепаду тиску. Верхня межа вимірювання 25 кПа; межа допустимої основної похибки 0,5% від верхньої межі вимірювання. Вихідний сигнал 4 ÷ 20 мА.	Сафір М модель 2450	1
5	3-1 4-1	Температура сушильного агенту	На вході і всередині сушарки	Термоелектричний перетворювач. Діапазоном вимірювання 0 ÷ 1300 °С. НсХ - ПП; клас допуску 2; довжина монтажної частини - 1,0 м.	Sitrans TH200	2

Продовження таблиці 3.1

6	2-1	Витрата вторинного	Трубопрово д подачі вторинного повітря	Діафрагма камерна Р _у =0,6 МПа; D _у =200 мм	ДК6-200	1
---	-----	--------------------	---	---	---------	---

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

		повітря 1500 м ³ /год.				
7	2-2		По місцю	Перетворювач перепаду тиску. Верхня межа вимірювання 40 кПа; межа допустимої основної похибки 0,5% від верхньої межі вимірювання. Вихідний сигнал 4 ÷ 20 мА.	Сафір М модель 2450	1
8	4-3, 4-4	Вологість сухого матеріалу на виході сушарки 3%	На виході сушарки	Радарний НВЧ – вологомір. Діапазон вимірювання 0,1 - 10%. Вихідний сигнал 4-20 мА. Похибка 0,5... 1 % абс. Напряга живлення ~220 В.	Мікрора дар -113 К11К	1

Продовження таблиці 3.1

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

9	6-1,	наявність полум'я на пальнику	Всередині барабану	Прилад контролю полум'я в комплекті з давачем полум'я ДП-1. сигналізація відсутності полум'я. сигнал на відключення подачі палива у випадку порушення нормального режиму роботи.	РКП-1	1
10	7-1, 8-1, 9-1		По місцю	Реле тиску Дискретний вихідний сигнал Діапазон тиску 0....25кПа	РД-2В	3
11	5-1	Розрідження в змішувальній камері -60 Па	По місцю	Перетворювач розрідження. Верхня межа вимірювання 25кПа; межа допустимої основної похибки 0,5% від верхньої межі вимірювання. Вихідний сигнал 4 ÷ 20 мА.	Сафір М модель 2201	1

Продовження таблиці 3.1

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

12	1-6, 3-4, 4-6, 6-2		Трубопрово ди подачі газу, первинного і вторинного повітря	Регулюючий клапан з пневматичним виконавчим механізмом та вбудованим електропневматичн им позиціонером як одна монтажна одиниця. Умовний діаметр Ду 80мм. Умовний тиск Ру 1,6 МПа. В якості живлення використовується стиснене повітря під тиском від 1,4 до 6 бар. Електричний вхідний сигнал позиціонера 4 ... 20 мА. Температури від -20 ос до +220 ос.	Samson 3241- 1/3241-7	4
----	-----------------------------	--	--	--	-----------------------------	---

Продовження таблиці 3.1

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

13	5-3		По місцю	Частотний перетворювач виробництва Schneider Electric. Потужність 0.2 кВт. Номінальний струм 1.5А. Максимальна вихідна частота 600 Гц. сигнал керування 4...20мА	АТV 320	1
14				Модуль живлення. Напруга 240V. Частота мережі 60 Гц. Повна потужність 0.7кВА. максимальна розсіювана потужність 8.5 Вт. Тип підключення 1 connector 5 контакт(ы)line supply, protective earth, 24 V Dc input sensor	CPS 2000	1

Продовження таблиці 3.1

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

15				<p>Процесорний модуль. 11 комірок. 36 каналів. продуктивність дискретних вх. / вих. Процесора 1024 вх./вих. single-rack configuration .Продуктивність аналогових вх. / вих. процесора 256 вх./вих. multi-rack configuration 66 I/O single-rack configuration. 2 комунікаційних модуля Ethernet 4 модулів AS-інтерфейсу. Кількість адрес: 248 для character mode 248 для Modbus</p>	Р34 - 2000	1
----	--	--	--	--	------------	---

Продовження таблиці 3.1

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

17				Модуль вводу аналогових сигналів. Тип підключення 20 пін 1 конектор. Тип аналогового входу 4...20 mA , 0...10 V. 4 аналогові входи.	ВМХ АМІ 0410	2
18				Модуль виводу. Тип підключення 20 пін 1 connector. Аналогових виходів 8. Тип аналогового виходу 4...20mA.	ВМХ АМО 0802	1
19				Модуль дискретних входів-виходів. 8 дискретних входів 24V Dc. 8 дискретних виходів 24V 19...30V	ВМХДД М16022	1

Висновки до розділу

У результаті детального опрацювання третього розділу було розроблено повну функціональну схему автоматики (ФСА), що містить п'ять ключових контурів керування та захисну підсистему. Кожний контур оглядової частини спирається на перевірені методи вимірювання (діафрагмові перепади тиску,

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

термоперетровувачі, вологоміри) і реалізований за допомогою уніфікованих функціональних блоків (SCALING, K_SQRT, DIV, PIDFF, COMPARE). Це дозволяє забезпечити високий рівень точності та швидкодії у підтримці співвідношення витрат палива та повітря, температури у камерах змішування й сушіння, а також оптимального розрідження в змішувальній камері.

Підбір апаратних модулів контролера Modicon M340 (аналогові й дискретні вводи/виходи, живильні та процесорні блоки) задовольняє всі технічні вимоги: достатню кількість каналів, необхідні швидкості опитування, а також гнучкість у розширенні мережевих інтерфейсів. Таблиця специфікації чітко відображає склад і кількість кожного модуля, що дає змогу одразу перейти до стадії тендерних закупівель і подальшої інсталяції.

Загалом, виконана розробка підтверджує відповідність обраної архітектури вимогам технологічного процесу сушіння глини: вона забезпечує керованість у широкому діапазоні режимів, високу надійність і безпеку.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської роботи було всебічно досліджено технологічний процес сушіння глини в прямотечійній барабанній сушарці, розроблено математичну модель об'єкта автоматизації, виконано синтез структурно—алгоритмічних схем керування (САК) та спроектовано й реалізовано програмно-апаратну частину системи автоматичного керування (САК).

В першому розділі проведено глибокий аналіз фізико-хімічних основ сушіння, визначено ключові фактори, які впливають на кінетику видалення вологи, і побудовано структурну схему взаємозв'язків параметрів технологічного процесу. Отримані результати дали змогу чітко сформулювати вимоги до точності та динамічних характеристик системи керування.

У другому розділі створено й апробовано математичну модель барабанної сушарки, ідентифіковано її параметри, а також обрано та налаштовано оптимальні коефіцієнти ПІ-регулятора. Перехідні характеристики системи підтвердили задовільний ступінь стійкості й швидкодії при різних режимах роботи.

Третій розділ присвячено вибору технічних засобів: контролера Modicon M340, дифманометрів, термодатчиків, вологоміра та виконавчих механізмів (позиціонерів Samson, частотного перетворювача ATV 320). Розроблено програму функціонування контролера в середовищі Unity Pro та створено функціональну схему автоматики (ФСА), до якої додано специфікацію всіх модулів із кількістю каналів і характеристиками.

Важливо, що система забезпечує:

- підтримку оптимального співвідношення витрат палива й повітря;
- стабілізацію температур на вході та всередині барабана з урахуванням вологості;
- контроль розрідження в камері та оперативне відключення при аваріях.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Запропоновані рішення гарантують високу точність регулювання, енергоефективність та безпеку експлуатації. Подальші дослідження можуть бути присвячені впровадженню адаптивних алгоритмів і розширенню аналітики для прогнозування зносу обладнання та покращення достатності технічного обслуговування.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Бучацький А. В. Автоматизація процесу сушіння глини в барабанній сушарці [Текст] : дипломна робота / А. В. Бучацький. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. – 78 с.
2. Гнатюк О. І. Моделювання теплових процесів у сушильних установках [Монографія] / О. І. Гнатюк. – Львів : НУ “Львівська політехніка”, 2020. – 125 с.
3. Дорошенко П. М. Теорія технологічного автоматичного керування в хіміко-технологічних процесах [Підручник] / П. М. Дорошенко. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. – 312 с.
4. Іванчук Є. В. Система PLC-керування для барабанної сушарки [Курсова робота] / Є. В. Іванчук. – Чернівці : ЧНУ, 2022. – 45 с.
5. Клименко В. П., Шевчук О. І. Автоматизація енергозберігаючих технологій сушіння [Стаття] // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. – 2021. – № 2. – С. 88–95.
6. Король І. М. Вплив вологості сировини на ефективність сушарок: моделювання і експеримент [Дисертація к.т.н.] / І. М. Король. – Дніпро : НМетАУ, 2023. – 165 с.
7. Назаренко Т. А. Автоматизація промислових сушильних комплексів [Навчальний посібник] / Т. А. Назаренко. – Київ : КНУБА, 2018. – 142 с.
8. Олійник С. Б. Ідентифікація динаміки процесу теплового сушіння глини [Стаття] // Зб. наук. праць КНУТД. – 2022. – Вип. 60. – С. 120–129.
9. Сологуб Ю. В. Застосування ПЛК в системах керування барабаними сушарками [Конференційний матеріал] / Ю. В. Сологуб. – Житомир : ЖДТУ, 2021. – С. 33–37.
10. Шевченко І. І. Розробка алгоритмів ПІД-регулювання температури при сушінні глини [Кваліфікаційна робота] / І. І. Шевченко. – Тернопіль : ТНТУ, 2022. – 68 с.

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Modicon M340 PAC User Guide. Schneider Electric. Modicon M340 PAC Cutsheet [PDF]. – близько 2010 р. Технічні характеристики ПЛК, включаючи I/O, комунікаційні та захисні можливості
12. Schneider Electric. Modicon M340 for Ethernet – User Manual [PDF]. – 2019. Опис комунікаційних можливостей, налаштування Ethernet, вбудованого web-серверу
13. RS Components. Schneider Electric – BMXAMI0410 analog input module datasheet [Електронний ресурс]. – 2025. Специфікація аналогового вводу для контролерів M340
14. VBASE Automation. Industry 4.0 Retrofit in a clay mill [Електронний ресурс]. – описано модернізацію старої установки у сучасну PLC + SCADA систему
15. Progetti Plant. Automation in the terracotta industry: a tailored dryer for enhanced productivity and energy efficiency [Електронний ресурс]. – 2024. Приклад впровадження повністю автоматизованого промислового сушильного комплексу

					БР. АКП-68.00.00.000. ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		