

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації  
Кафедра комп'ютерних систем управління

**Бакалаврська кваліфікаційна робота**  
**на тему:**  
**«АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ГЛИНИ У ПРЯМОТОЧНІЙ**  
**БАРАБАННІЙ СУШАРЦІ»**

Виконав: студент 4 курсу, групи 2АКІТ-216  
спеціальності 151 – Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

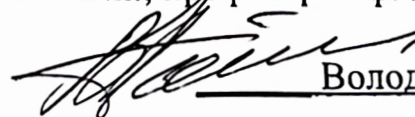
 Даніїл ШЕКОВ

Керівник: к.т.н., проф., професор каф. КСУ

 Микола БИКОВ

« 10 » червня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., професор каф. АІТ

 Володимр ПАПІНОВ

« 11 » червня 2025 р.

Допущено до захисту  
Зав. кафедри КСУ  
В'ячеслав Ковтун  
« 12 » червня 2025р.





5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Технологічна схема барабанної сушарки; конструкція барабанної прямоточної сушарки; структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами барабанної сушарки; функціональна схема системи автоматизації процесу сушіння; графіки порівняння експериментальної та апроксимованої кривих розгону при зміні подачі газу; структурна схема САР температури в камері змішування; перехідний процес у САР із ПІ-регулятором при заданого значення регульованої величини.

# 6. Консультанти розділів роботи

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

# 7. Дата видачі завдання 26.05.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва та зміст етапу                                                                            | Термін виконання |            | Примітка |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|----------|
|       |                                                                                                 | початок          | закінчення |          |
| 1     | Вступ: актуальність, мета, завдання, новизна, практична цінність.                               | 15.05.2025       | 17.05.2025 |          |
| 2     | Розділ 1. Аналіз об'єкта автоматизації і техніко-економічне обґрунтування доцільності розробки. | 17.05.2025       | 20.05.2025 |          |
| 3     | Постановка задачі і розробка технічного завдання                                                | 20.05.2025       | 26.05.2025 |          |
| 4     | Аналіз і вибір технічних і програмних засобів                                                   | 26.05.2025       | 30.05.2025 |          |
| 5     | Вибір та розрахунок технічних засобів автоматизації.                                            | 30.05.2025       | 03.06.2025 |          |
| 6     | Розробка програмного забезпечення системи                                                       | 3.06.2025        | 08.06.2025 |          |
| 7     | Опис системи автоматизації та алгоритм роботи.                                                  | 8.06.2025        | 10.06.2025 |          |
| 8     | Оформлення пояснювальної записки                                                                | 10.06.2025       | 12.06.2025 |          |
| 9     | Висновки, список використаних джерел, додатки                                                   | 11.06.2025       | 13.06.2025 |          |
| 10    | Захист БКР                                                                                      | 16.06.2025       | 18.06.2025 |          |

Студент

  
(підпис)

Даніїл ШЕКОВ

Керівник роботи

  
(підпис)

Микола БИКОВ

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 53 сторінки формату А4 основного тексту, на яких є 26 рисунків, 4 таблиці, список використаних джерел містить 26 найменувань.

Метою дипломної роботи є підвищення ефективності процесу сушіння глини шляхом автоматизації керування прямоточною барабанною сушаркою за допомогою сучасної мікроконтролерної системи.

Для досягнення поставленої мети в роботі проведено аналіз роботи прямоточної барабанної сушарки як об'єкта автоматизації, обґрунтовано вибір прямоточного методу сушіння як оптимального з точки зору енергоефективності та стабільності процесу. Надано рекомендації щодо зниження енергоспоживання в процесі сушіння.

Розроблено алгоритм керування автоматизованою системою сушіння глини, обґрунтовано вибір апаратних та програмних засобів для реалізації цієї системи. Створено електричні схеми автоматизації та обрано оптимальні конструкторські рішення щодо розміщення елементів системи

Використання сучасної елементної бази дозволило зменшити вартість реалізації системи, підвищити її надійність та забезпечити більш точний і гнучкий контроль параметрів процесу сушіння.

Ключові слова: автоматизація процесу сушіння, функціональна схема автоматизації, система автоматичного регулювання, модель перехідного процесу.

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis consists of 53 A4 pages, with 26 figures, 4 tables, and a list of references containing 26 items.

The purpose of the thesis is to increase the efficiency of the clay drying process by automating the control of a direct-flow drum dryer using a modern microcontroller system.

To achieve this goal, the work analyzes the operation of a direct-flow drum dryer as an automation object, justifies the choice of a direct-flow drying method as optimal in terms of energy efficiency and process stability. Recommendations for reducing energy consumption in the drying process are given.

An algorithm for controlling an automated clay drying system has been developed, and the choice of hardware and software for implementing this system has been substantiated. Electrical automation schemes were created and optimal design solutions for the placement of system elements were selected

The use of a modern element base made it possible to reduce the cost of system implementation, increase its reliability and provide more accurate and flexible control of the drying process parameters.

**Keywords:** automation of the drying process, functional automation scheme, automatic control system, transient model.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                              | 4  |
| 1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ<br>ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗРОБКИ .....                         | 7  |
| 1.1 Опис завдань технологічного процесу сушіння глини .....                                                             | 7  |
| 1.2 Визначення і аналіз факторів які впливають на технологічний процес.....                                             | 9  |
| 1.3 Обґрунтування номінальних значень параметрів технологічного процесу та<br>допустимих відхилень від цих значень..... | 11 |
| 1.4 Огляд функціональної схеми автоматизації.....                                                                       | 13 |
| 1.5 Висновки до розділу .....                                                                                           | 14 |
| 2 РОЗРОБКА СХЕМИ СИСТЕМИ І ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЇЇ<br>РЕАЛІЗАЦІЇ.....                                            | 15 |
| 2.1 Розробка та обґрунтування структури системи управління.....                                                         | 15 |
| 2.2 Вибір комплексу технічних засобів та вибір мікроконтролера .....                                                    | 16 |
| 2.3 Опис функціональної схеми автоматизації .....                                                                       | 19 |
| 2.4 Розробка електричних схем з'єднань контролера із засобами<br>автоматизації.....                                     | 20 |
| 2.5 Специфікація засобів автоматизації.....                                                                             | 24 |
| 2.6 Опис технологічного об'єкта регулювання та знаходження його динамічної<br>моделі.....                               | 27 |
| 2.7 Розрахунок оптимальних параметрів налагодження автоматичного ПІ-<br>регулятора .....                                | 28 |
| 2.8 Висновки до розділу .....                                                                                           | 29 |
| 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....                                                                               | 30 |
| 3.1 Розробка програми функціонування контролера .....                                                                   | 30 |
| 3.2 Розробка та тестування модуля для знаходження параметрів моделі.....                                                | 33 |
| 3.3 Розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання.....                                                     | 36 |
| 3.4 Опис алгоритму роботи системи .....                                                                                 | 37 |

|     |                                                                                                            |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5 | Вибір і обґрунтування параметрів перехідного процесу контуру регулювання та типу перехідного процесу ..... | 44 |
| 3.6 | Побудова розширеної ФЧХ об'єкта регулювання та знаходження частоти зрізу.....                              | 45 |
| 3.7 | Побудова перехідного процесу розрахованої САР .....                                                        | 49 |
| 3.8 | Висновки до розділу .....                                                                                  | 53 |
|     | ВИСНОВКИ.....                                                                                              | 54 |
|     | СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....                                                                                     | 56 |
|     | ДОДАТКИ.....                                                                                               | 58 |
|     | Додаток А (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....                                    | 59 |
|     | Додаток Б (обов'язковий) Технічне завдання .....                                                           | 60 |
|     | Додаток В (довідниковий) Лістинг програми .....                                                            | 63 |
|     | Додаток Г (обов'язковий) Ілюстративна частина.....                                                         | 67 |

## ВСТУП

**Актуальність.** Сушіння передбачає зневоднення твердих тіл через випаровування і подальше виведення пари, у ході чого відбувається теплоперенесення і дифузія вологи. Час, необхідний для того, щоб зменшити рівень вологи в речовині з початкового до кінцевого значення, і визначає період сушіння.

Метою сушіння глини є покращення її технологічних властивостей шляхом зменшення вологості, що сприяє зниженню усадки, підвищенню міцності готових виробів та розширенню сфер подальшого використання матеріалу у будівництві та промисловості.

Необхідність сушіння обумовлюється кількома ключовими причинами: по-перше, наявність вологи у продукті може сприяти його псуванню при зберіганні, оскільки вона негативно позначається на якості – наприклад, викликає злипання чи замерзання взимку; по-друге, залишкова вологість у проміжних продуктах заважає подальшій обробці, знижуючи стандарт кінцевого виробу; по-третє, транспортування висушеної речовини є менш витратним через зниження питомої ваги, особливо при дальніх перевезеннях.

У хімічній промисловості найпоширенішим є конвективне сушіння, що здійснюється в барабанних сушарках. У процесі конвективного сушіння тепло надходить із теплоносія прямо до поверхні матеріалу, що піддається зневодненню. У ролі теплоносія можуть виступати повітря, димовий газ або інертна газова суміш. Барабанні сушарки широко застосовуються для безперервного сушіння кускових, зернистих і сипучих матеріалів (глини, піску, вапняку тощо).

Основною причиною просування матеріалу по довжині барабана є його нахил. Коли барабан обертається, речовина підхоплюється лопатями, підіймається вгору, після чого падає з різних рівнів висоти. У процесі сушіння всередині барабана тепла енергія передається конвективним способом: від гарячих газів – до сипучих частинок і до поверхонь, які знаходяться в шарі та на лопатках. Крім того, частина тепла надходить через теплопровідність – безпосередньо з розігрітих внутрішніх деталей апарата до оброблюваної маси.

Встановлення різноманітних типів насадок визначає відмінні траєкторії руху частинок усередині об'єму барабана під час сушіння. Конструкція сушильного барабана відзначається простотою технічного обслуговування. Усе це є підтвердженням доцільності обраної схеми реалізації процесу сушіння.

Переваги сучасних високоефективних сушильних установок можуть бути повністю реалізовані лише за умови їх надійної автоматизації. Наприклад, підвищення температури та швидкості потоку теплоносія призводить до зростання ймовірності отримання недоброякісної продукції й виникнення аварійних ситуацій, що особливо властиво процесам хімічної технології, які часто пов'язані із застосуванням або виробництвом легкозаймистих і вибухонебезпечних речовин, сумішей та дорогоцінної сировини.

На початку виготовлення продукції теплове сушіння нерідко виступає як стартова операція. Попередню частину вологи усувають простішими й менш затратними методами, тоді як фінальна стадія осушення виконується сушильним процесом. Такий комбінований варіант дозволяє покращити економічні показники всієї операції.

**Метою дослідження** є розроблення системи автоматизації сушіння глини у прямоточній барабанній сушарці із застосуванням сучасних методів автоматизації.

**Об'єктом дослідження** є процес сушіння глини у прямоточній барабанній сушарці.

**Предметом дослідження** є методи та технології автоматизації параметрами сушіння глини у прямоточній барабанній сушарці.

**Новизна** одержаних результатів: запропоновано комплексну автоматизовану систему з адаптивною корекцією температури сушильного агента залежно від поточної вологості матеріалу, що дає змогу утримувати похибку вологості  $\pm 0,5$  % без збільшення питомої витрати палива

**Практична цінність.** Впровадження результатів роботи дозволять зменшити енергозатрати і підвищити якість продукції.

**Апробація.** Представлені в роботі результати апробовані в результаті участі в конференції Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція студентів,

аспірантів та молодих науковців «МОЛОДЬ В НАУЦІ: ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ (МН-2025)»:

**Публікація:** Шеков Д. С. «Автоматизація сушіння глини у прямоточній барабанній сушарці», «МОЛОДЬ В НАУЦІ: ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ», 2025. URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/25708>

# 1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗРОБКИ

## 1.1 Опис завдань технологічного процесу сушіння глини

Технологічна схема барабанної сушарки для сушки глини приведена на рис. 1.1.

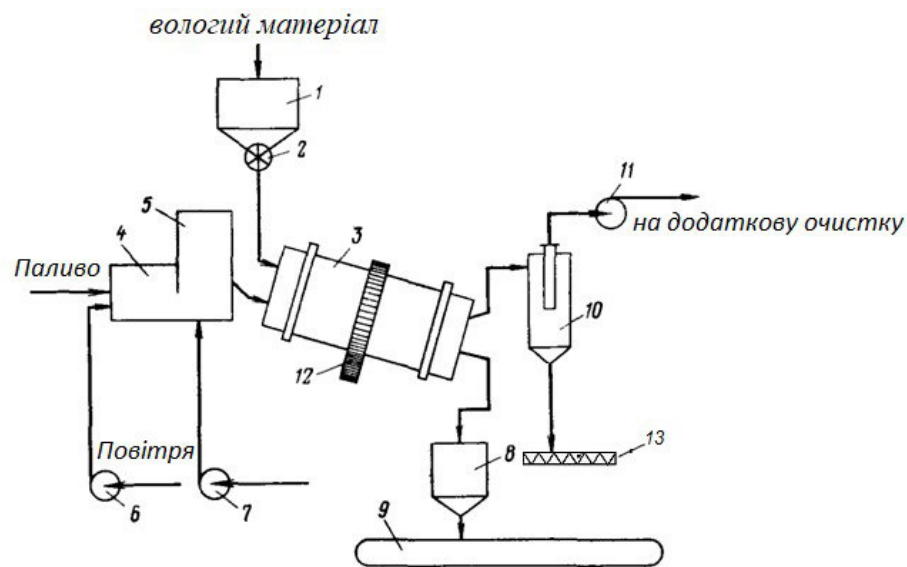


Рисунок 1.1 – Технологічна схема барабанної сушарки для сушки піску [1]:  
 1 - бункер матеріалу; 2 - живильник сирого матеріалу; 3 - сушильний барабан; 4 - топка; 5 - змішувальна камера; 6, 7, 11 - дуттєві і тягові пристрої; 8 - бункер для вивантаження готового матеріалу; 9 – транспортер стрічкового типу; 10 - система для фільтрації відхідних газів; 12 - зубчата передача; 13 - гвинтовий конвеєр.

Паливний газ спалюється у топці 4, а в змішувальній камері 5 формується сушильний агент, що являє собою суміш димових газів і вторинного повітря. Сушильний агент проходить через барабан 3, взаємодіє з висушуваним матеріалом і забезпечує його сушіння. Для відокремлення пилу від газової суміші використовується циклон 10, а для створення розрідження - димосос 11.

До складу комплексу лінії входять:

- бункер сирого матеріалу;

- живильник вологого матеріалу;
- стрічковий конвеєр з високотемпературною стрічкою ( $\approx 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- гвинтовий конвеєр;
- теплогенератор, що складається з топки та змішувальної камери;
- барабан сушильний  $1,5 \times 8\text{ м}$ ;
- система газоочищення;
- дуттєві та тягові установки (дуттєвий відцентровий вентилятор і димосос).

На рисунку 1.2 зображено сушарку барабанного типу, яка складається з нахиленого циліндричного барабана (4), обладнаного парюючими бандажами, що під час обертання переміщуються по опорних роликах. Матеріал надходить через живильник-дозатор (5), розташований на піднятому боці, потрапляє на гвинтові лопаті, де починається його попереднє осушення, а потім рухається уздовж барабана, що нахилений до горизонталі на кут до  $6^{\circ}$  [2].

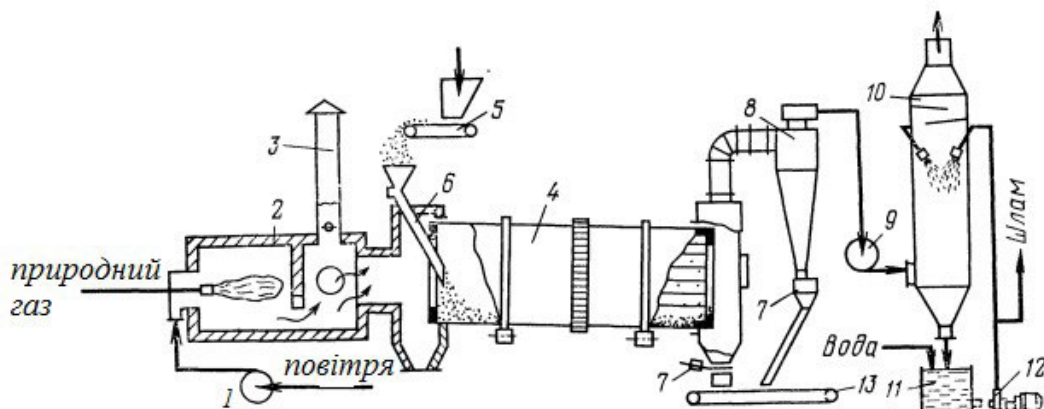


Рисунок 1.2 – Конструкція барабанної прямооточної сушарки [2]:

1 – дуттєвий відцентровий вентилятор; 2 - топковий теплогенератор; 3 - розпалювальний газохід; 4 - сушарка з обертовим барабаном; 5 - агрегат для живлення та дозування; 6 – охолоджувальний жолоб; 7 – затворний елемент або гвинтовий механізм; 8 - циклон; 9 - димосос; 10 – мокрий скруббер; 11 – ємність; 12 – насос; 13 - стрічковий транспортер.

Тип опори та її конструктивні елементи визначаються на основі двох ключових параметрів - діаметра барабана і навантаження на бандаж. Переміщення матеріалу в сушарці забезпечується внутрішньою насадкою, яка рівномірно розподіляє потік матеріалу по перерізу барабана. Конструкція насадки залежить від розміру фракцій та фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. У процесі сушіння з прямим потоком для запобігання виносу частинок матеріалу швидкість газового середовища в барабані підтримується на рівні до 2-3 м/с.

Гарячі гази надходять у систему з пальника (2), розміщеного поруч із завантажувальним отвором барабана, де передбачено камеру для змішування з атмосферним повітрям, що дозволяє охолодити гази до необхідної температури. Готовий матеріал, пройшовши через затвор (7), який блокує надходження повітря ззовні, транспортується стрічковим механізмом (13). Біля виходу суміші повітря й відпрацьованих газів розміщуються пристрої для вловлювання пилу та витяжні пристрої(8, 9). Вентилятор, як правило, встановлюється за циклоном, оскільки в такому випадку ротор менше зношується частинками висушеного продукту. У нижній частині циклону 8 розташовується пристрій для видалення висушеного матеріалу - затвор 7.

## **1.2 Визначення і аналіз факторів які впливають на технологічний процес**

Основною метою керування процесом сушіння глини є забезпечення одержання продукту з потрібними якісними характеристиками при заданій продуктивності. Ефективність цього процесу оцінюється за критерієм управління - параметром, що відображає якість або кількість продукції, зокрема рівнем вологості готової глини [5].

Ефективність процесу конвективного сушіння оцінюється за вологістю матеріалу, який виходить із сушарки. Залишкова волога в готовому продукті визначається тим, скільки вологи спочатку надходить разом із сирим матеріалом, і скільки з неї вдається видалити під час сушіння. Обсяг вологи, що потрапляє у

систему з мокрим матеріалом, залежить як від його вологості, так і від швидкості подачі сировини.

Інтенсивність сушіння характеризується швидкістю процесу, що, у міру наближення до стану рівноваги, зменшується та зазвичай прямує до нуля. Інтенсивність сушіння залежить від низки чинників, що засвідчують складність реального процесу.

Ключову роль у процесі сушіння відіграють характеристики висушуваного об'єкта. Вони впливають на внутрішній та зовнішній опір перенесення вологи, силу зв'язку води з матеріалом, а також на ефективність поглинання ним підведеного тепла.

До ключових характеристик, що впливають на сушіння, належать: будова внутрішніх шарів матеріалу, його фізико-теплові властивості, розміри, геометрична форма, стан зовнішньої поверхні, а також діапазон змін вологості впродовж сушіння. Найбільш суттєвий вплив справляє внутрішня структура речовини. Крім того, значення мають і параметри теплоносія: температура, вологість (або паровий тиск), швидкість руху відносно матеріалу та загальний тиск у системі.

До чинників, що впливають на процес сушіння, належать концентрація та склад домішок у рідині, яку видаляють із матеріалу. Домішки змінюють теплофізичні властивості рідини (в'язкість, теплопровідність тощо), коригують взаємодію рідини з поверхнею твердого скелета та, тим самим, впливають на швидкість міграції вологи з внутрішніх шарів тіла до периферії. Отже, процес сушіння можна зробити ефективнішим, якщо підвищити температуру теплоносія, пришвидшити його рух (без порушення технологічних норм), зменшити вологість теплоносія на вході, а також – за можливості – здійснити подрібнення матеріалу або застосувати вплив енергетичних полів. Водночас варто враховувати, що підвищення інтенсивності сушіння супроводжується зростанням витрат на його реалізацію, тому важливим завданням є визначення оптимального за економічними критеріями режиму проведення процесу.

### 1.3 Обґрунтування номінальних значень параметрів технологічного процесу та допустимих відхилень від цих значень

Сушіння здійснюється у барабанній сушарній установці гарячими газами, що утворюються під час спалювання природного газу в топці (сушильний агент – паливні газу).

Технічна характеристика прямоочної барабанної сушарки для сушіння глини:

1. Продуктивність сушарки за вихідним (вологим) матеріалом – 15 т/год.
2. Кут нахилу барабана до горизонту – 2,62°.
3. Об'єм барабана – 30,5 м³.
4. Температура глини: початкова – 10 °С; кінцева – 80 °С.
5. Температура теплоносія на вході – 800 °С.
6. Температура теплоносія на виході – 100 °С.
7. Початкова вологість глини – 22 % мас.
8. Кінцева вологість глини – 7,5 % мас.

Технологічна карта процесу представлена у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технологічна карта процесу

| №п/п | Назва параметру                                  | Одиниця вимірювання | Номінальне Значення | Допустимі відхилення |
|------|--------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 1.   | витрата палива                                   | м³/год.             | 150                 | 5                    |
| 2.   | витрата первинного повітря                       | м³/год.             | 1250                | 30                   |
| 3.   | витрата вторинного повітря                       | м³/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                  |

Структурна схема сушильного агрегату барабанного типу зображена на рис. 1.3.

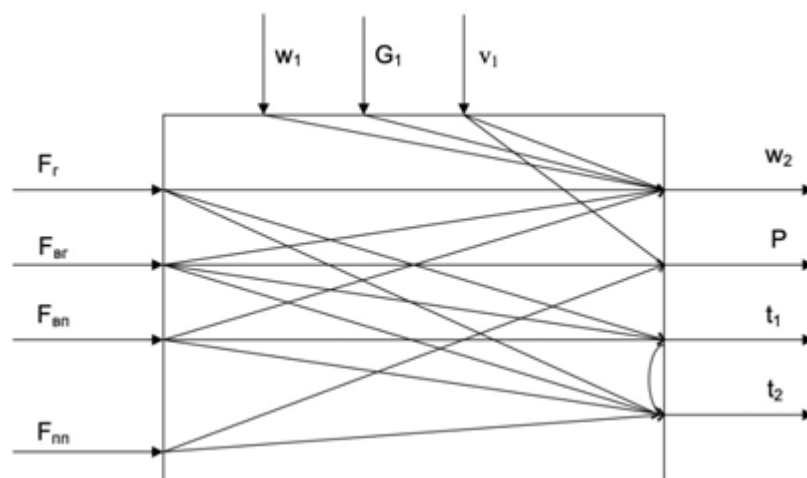


Рисунок 1.3 – Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами барабанної прямоточної сушарки

Вхідні параметри:

- $F_r$  – витрата газу до сушарки;
- $F_{гп}$  – витрата первинного повітря на горіння;
- $F_{вп}$  – витрата вторинного повітря;
- $F_{вг}$  – витрата відпрацьованого сушильного агента.

Вихідні (регульовані) параметри:

- $w_2$  – вміст вологи у висушеному матеріалі;
- $t_1$  – температура сушильного агента в змішувальній камері;
- $R$  – розрідження в змішувальній камері;
- $t_2$  – температура сушильного агента в барабані сушарки.

Збурюючі параметри:

- $w_1$  – вміст вологи у матеріалі, що надходить на сушіння;
- $G_1$  – витрата матеріалу на сушіння;
- $v_1$  – температура матеріалу на вході до сушарки.

## 1.4 Огляд функціональної схеми автоматизації

Автоматизовані функціональні рішення для барабанних сушарок прямооточного типу можуть відрізнятися за конструкцією та використовувати електричні або пневматичні засоби керування. Одна з відомих схем автоматизації представлена на рис. 1.4.

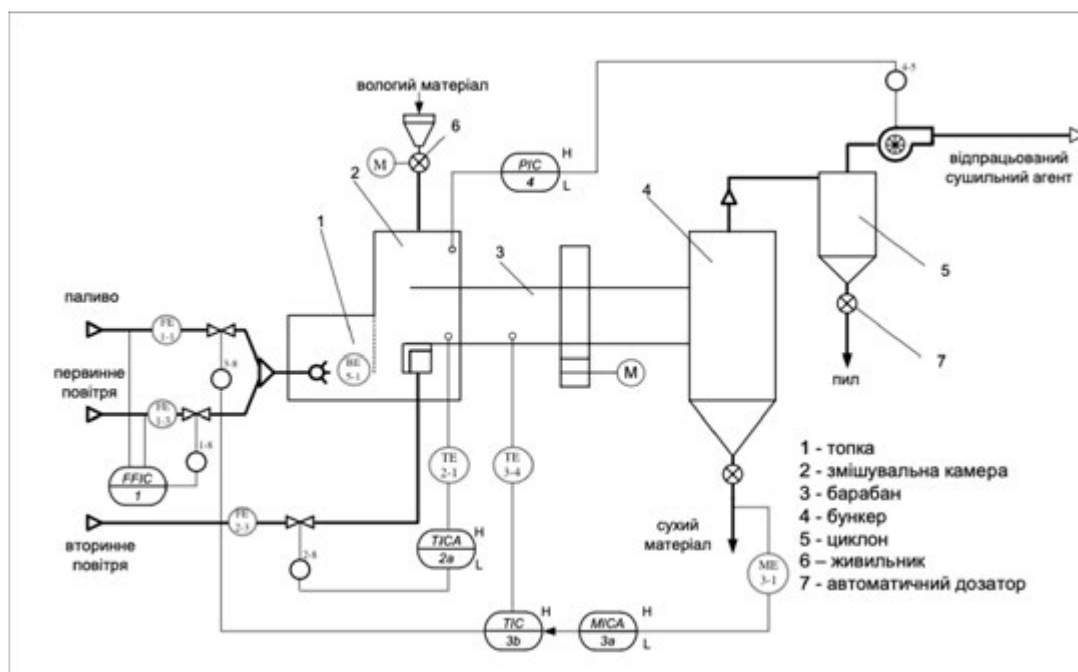


Рисунок 1.4 – Спрощена схема барабанної прямооточної сушарки [4]

На цій схемі передбачено такі контури регулювання: 1) регулювання співвідношення палива і повітря; 2) регулювання температури в камері змішування; 3) регулювання температури в барабані сушарки з корекцією за вологістю висушуваного матеріалу; 4) регулювання розрідження в камері змішування.

Якщо на вхід надходить матеріал з більшою вологістю, то на виході датчик подає сигнал на регулятор, і той збільшує витрату газу на спалювання, але водночас регулятор температури в камері змішування підвищує витрату вторинного повітря. Таким чином температура теплоносія не змінюється. Отже, у схемі, зображеній на рис. 1.4, виникає конфлікт контурів регулювання, який можна скоригувати змінивши конфігурацію схеми.

### **1.5 Висновки до розділу**

У цьому розділі проаналізовано об'єкт автоматизації та техніко-економічно обґрунтовано доцільність розробки. Описано завдання технологічного процесу сушіння глини. Визначено й проаналізовано фактори, що впливають на технологічний процес. Обґрунтовано номінальні значення параметрів технологічного процесу та допустимі відхилення від них та глянуто функціональні схеми автоматизації.

## 2 РОЗРОБКА СХЕМИ СИСТЕМИ І ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

### 2.1 Розробка та обґрунтування структури системи управління

Для автоматизації сушіння глини в прямоточній барабанній сушарці пропонується схема, що зображена на рис. 2.1.

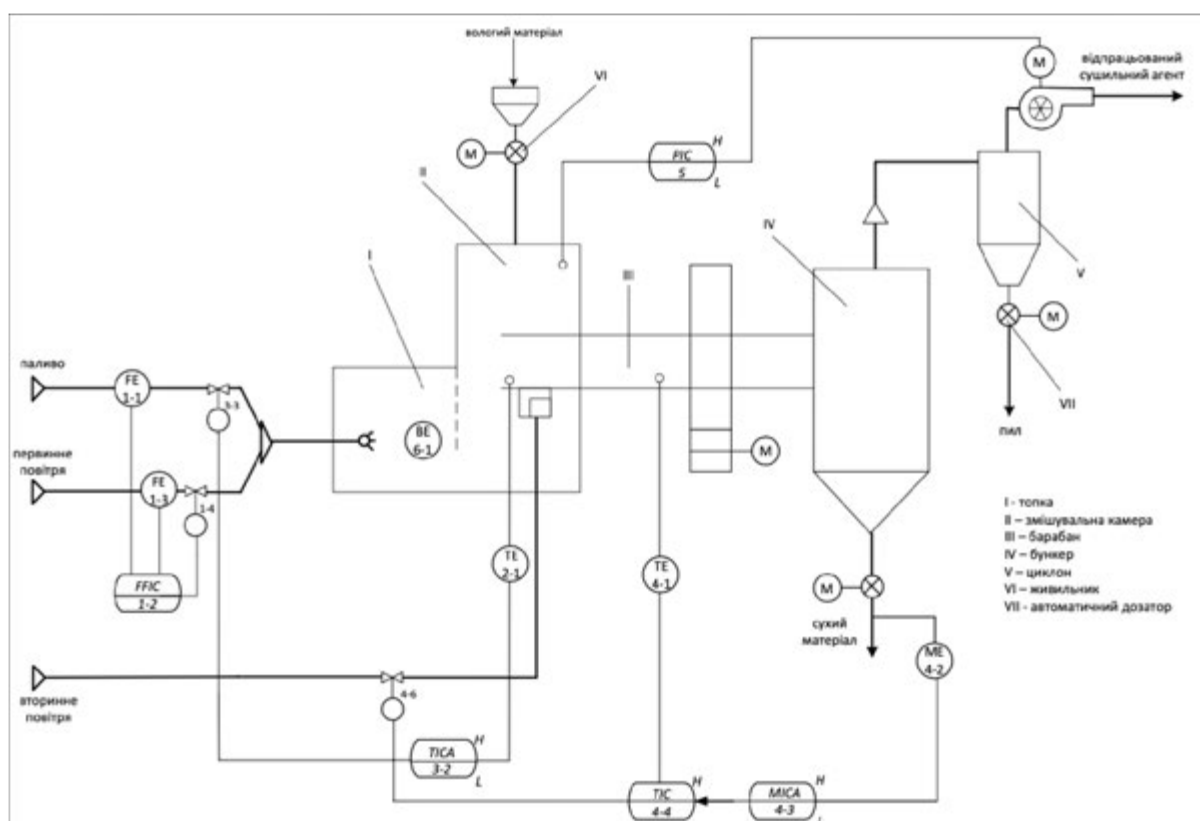


Рисунок 2.1 – Спрощена функціональна схема автоматизації(ФСА) процесу сушіння глини в прямоточній барабанній сушарці.

Для автоматизації процесу сушіння глини в прямоточній барабанній сушарці передбачено такі контури:

Контур 1. Регулювання співвідношення витрати палива та первинного повітря.

Контур 2. Регулювання температури в камері змішування шляхом зміни подачі газу.

Контур 3. Регулювання температури сушильного агента в барабані сушарки з корекцією по вологості сухого матеріалу.

Контур 4. Регулювання розрідження в змішувальній камері.

Крім того, передбачено захист за такими параметрами:

1. Тиск газу;
2. Тиск первинного повітря;
3. Тиск вторинного повітря;
4. Гасіння факела.

## **2.2 Вибір комплексу технічних засобів та вибір мікроконтролера**

Оберемо мікропроцесорні засоби автоматизації. Для впровадження автоматизованої системи керування сушінням глини було вибрано контролер серії Modicon виробництва компанії Schneider Electric.

Невеликий за розмірами контролер Modicon M340 пропонує потужні ПЛК-можливості та високу гнучкість. Інтеграція зі зручним середовищем програмування Unity значно знижує витрати часу на створення й запуск програмного забезпечення.

M340 дає змогу реалізувати різноманітний функціонал відповідно до індивідуальних потреб замовника, оскільки його відмінними рисами є:

- функції рахунку імпульсів, що реалізуються двома модулями: 2 канали до 60 кГц або 8 каналів до 10 кГц; 32-бітний лічильник;
- час циклу - 1 мс;
- два регістри захоплення та рефлексивні функції з реакцією  $< 200$  мкс;
- розширені конфігурувальні можливості: фільтрація кожного входу, широкий вибір рефлексивних функцій, генератор імпульсів, обмежувач вільного ходу;
- конфігурувальні функції рахунку й вимірювання.

M340 найкраще підходить для машин з функцією переміщення матеріалів, конвеєрних систем, пакувальних ліній вторинного рівня, а також для

спеціалізованих та деревообробних пристроїв. Контролер створено з урахуванням потреб виробників обладнання складної, компактної або модульної структури.

У середовищі Unity за замовчуванням доступна бібліотека функцій регулювання. Завдяки мові FBD (функціональних блок-схем) забезпечується візуальна розробка програм з можливістю глибокої настройки та моніторингу керуючого алгоритму.

Швидкісний USB-інтерфейс, наявний у кожному сучасному CPU-модулі Schneider Electric, разом із каналом Ethernet (локальна мережа або «точка-точка») забезпечує такі можливості: передавання програм до пристрою чи з нього, віддалену діагностику через вебсервер, а також операції читання та запису файлів даних.

Модулі дискретних I/O з високою чутливістю здатні підтримувати максимум 64 канали. Якщо застосовується Ethernet, вмикається інтегрована функція web-сервера. Конструкція контролера передбачає шасі на 4, 6, 8 чи 12 посадкових місць.

Мережеве розширення допускає:

- до 63 пристроїв через CANopen;
- до 63 пристроїв через Ethernet;
- до 32 пристроїв через Modbus.

Система підтримує до 1024 дискретних входів-виходів і 256 аналогових. Найменша конфігурація – 16 каналів. Працює від постійних 24 VDC або 48 VDC, а також від змінних 24 V, 48 V чи 110 V.

Для дискретних каналів передбачено PNP-підключення, хоча окремі модулі працюють і з NPN. Звично застосовують схеми на дві або три лінії. Під час вибору I/O-модулів необхідно звертати увагу на ізоляцію.

Модулі дискретних виходів можуть бути 64-канальними; популярними є релейні модулі, де комутувальним елементом є контакт реле.

Змішані модулі містять 8 входів і 8 виходів або 16 входів і 16 виходів; усі працюють при 24 V.

Базовим модулем аналогових входів є пристрій із 4 аналоговими входами, уніфікованими за струмом і напругою, біполярними; розрядність АЦП - 16 біт; час опитування - 5 мс на всі 4 канали. Наявні спеціалізовані модулі для під'єднання термоперетворювачів опору або термоелектричних перетворювачів: 4- або 8-канальні, для всіх типів термопар і стандартних ТПС (Pt100, Pt1000, Ni1000). Є модуль для під'єднання змінного резистора у діапазоні  $\pm 40$  мВ... $\pm 1,28$  В; розрядність АЦП - 16 біт; швидкість опитування - 400 мс. Аналогові виходи реалізовано єдиним двоканальним модулем: сигнал по напрузі  $\pm 10$  В або по струму 0–20/4–20 мА; розрядність ЦАП - 16 біт; час перетворення -  $< 1$  мс.

Внутрішня RAM складається з трьох частин: блок даних із програмою, коментарями й символами; блок констант; блок «online-update», де дозволено змінювати програму під час роботи. Змінні на картці пам'яті не зберігають. На карту переносять програму, коментарі, символи та константи; у конфігураціях з Ethernet-CPU до цього додаються файли вебсерверу.

За допомогою середовища Unity Pro здійснюється програмування контролера виконується у середовищі Unity Pro, що має такі версії:

- Unity Pro S для M340;
- Unity Pro M для M340 Premium;
- Unity Pro для Quantum.

Структура програмного забезпечення буває одно- та багатозадачна.

Для реалізації поставленої задачі необхідні: дискретні чотири входи та 1 вихід; аналогові 8 входів та 4 виходи.

Для реалізації системи обрано таке апаратне забезпечення::

- два аналогових модулі введення сигналів - BMX AMI 0410;
- один модуль аналогового виведення - BMX AMO 0802;
- живильний модуль - CPS 2000;
- процесорна частина - модуль P34-2000;
- модуль для обробки дискретних входів і виходів - BMXDD M16022.

### 2.3 Опис функціональної схеми автоматизації

Запропонована функціональна схема автоматизації зображена у Додатку Г.

*Регулювання співвідношення витрати палива та первинного повітря.*

Для визначення витрати газу та повітря використовують методику вимірювання змінного тискового перепаду. У газовому трубопроводі монтується діафрагма типу ДК6-60 (поз. 1-1), тиск на якій фіксується приладом «Сафір-М» моделі 2440 (поз. 1-2) із виходом 4–20 мА. Первинне повітря контролюється через діафрагму ДК6-125 (поз. 1-3), тиск з якої вимірює диференціальний манометр «Сафір-М» 2450 (поз. 1-4), що також генерує струмовий сигнал у межах 4–20 мА.

Регулятор співвідношення витрат подає сигнал на електропневматичний позиціонер, який керує регулювальним клапаном Samson 3241 (поз. 1-6), установленим на трубопроводі подачі первинного повітря.

*Регулювання температури в камері змішування шляхом зміни подачі газу.*

У трубопроводі подачі вторинного повітря встановлюємо діафрагму ДК6-200 (поз. 2-1). Перепад тиску на діафрагмі вимірюється дифманометром «Сафір-М» модель 2450 (поз. 2-2).

Температуру сушильного агента на вході до сушарки вимірюємо термоелектричним перетворювачем типу Sitrans TH200 (поз. 3-1).

За відхилення параметра (витрати газу) від заданого значення регулятор подає сигнал на електропневматичний позиціонер, який керує регулювальним клапаном Samson 3241 (поз. 3-4), установлюваним на трубопроводі подачі газу.

*Регулювання температури сушильного агенту в барабані сушарки з корекцією по вологості сухого матеріалу.*

Для вимірювання вологості сухого матеріалу використовуємо вологомір «Мікрорадар-113» (поз. 4-3).

За відхилення параметра (вологості матеріалу) від заданого значення аналоговий регулятор подає коригувальний сигнал на регулятор температури.

За відхилення параметра (температури в сушарці) від заданого значення регулятор подає сигнал на електропневматичний позиціонер, який керує регулювальним клапаном Samson 3241 (поз. 4-6), установленим на лінії подачі вторинного повітря.

#### *Регулювання розрідження в змішувальній камері.*

Вимірюємо розрідження перетворювачем Сафір М модель 2201 (поз. 5-1). Відведення робочого середовища з сушильного барабана забезпечується димососом. Коли значення розрідження у камері не відповідає заданому, регулятор подає аналоговий вихід на частотник ATV 320, що змінює швидкість обертання двигуна димососу.

#### *Схема захисту*

Для захисту від погасання факела встановлюємо прилад контролю полум'я РКП-1 (поз. 6-1). На лінії подачі газу встановлюємо реле тиску РД-2В (поз. 7-1). На лінії подачі первинного повітря встановлюємо реле тиску РД-2В (поз. 8-1). На лінії подачі вторинного повітря встановлюємо реле тиску РД-2В (поз. 9-1). Від приладу контролю полум'я та реле тиску надходять дискретні сигнали; на їхній основі схема захисту формує дискретний вихідний сигнал для відсікання подачі газу або повітря.

### **2.4 Розробка електричних схем з'єднань контролера із засобами автоматизації**

Для синтезу схем під'єднання використано технічні матеріали, а саме інструкції до приладів. Усі прилади живляться напругою 24 В; усі лінії живлення оснащені запобіжним пристроєм від перевантаження (рис 2.2).

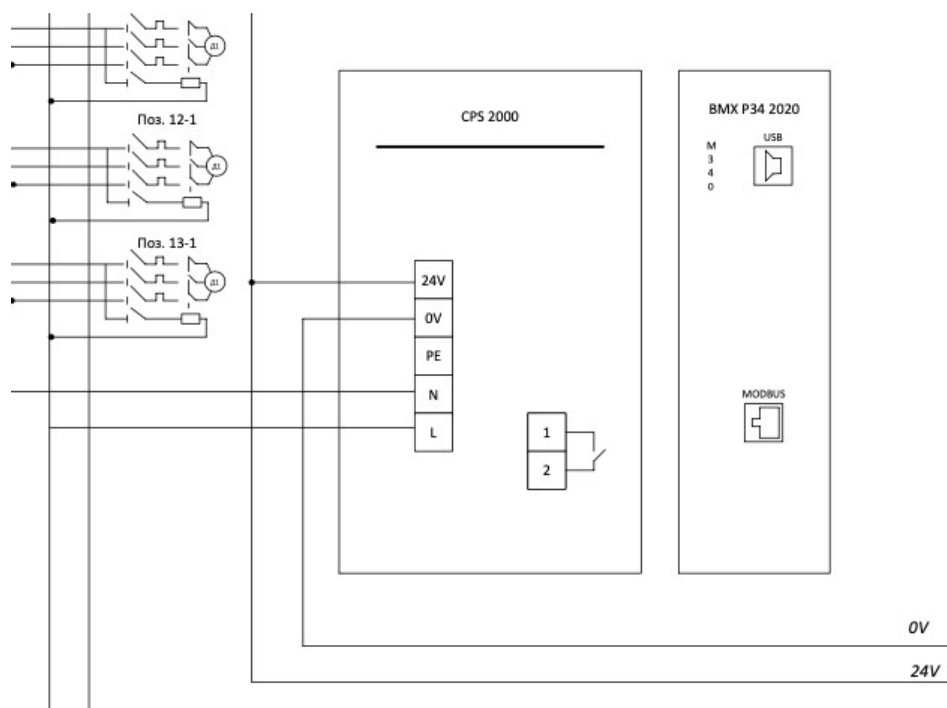


Рисунок 2.2 – Підключення блоку живлення

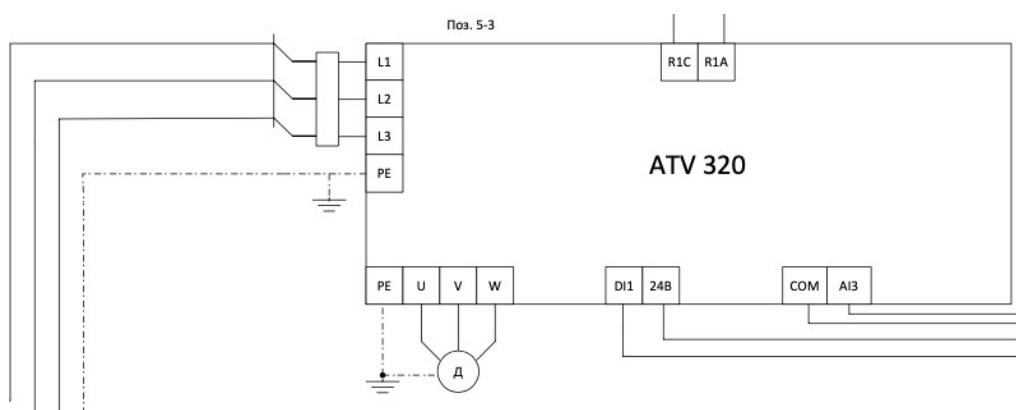


Рисунок 2.3 – Схема під'єднання частотного перетворювача ATV320

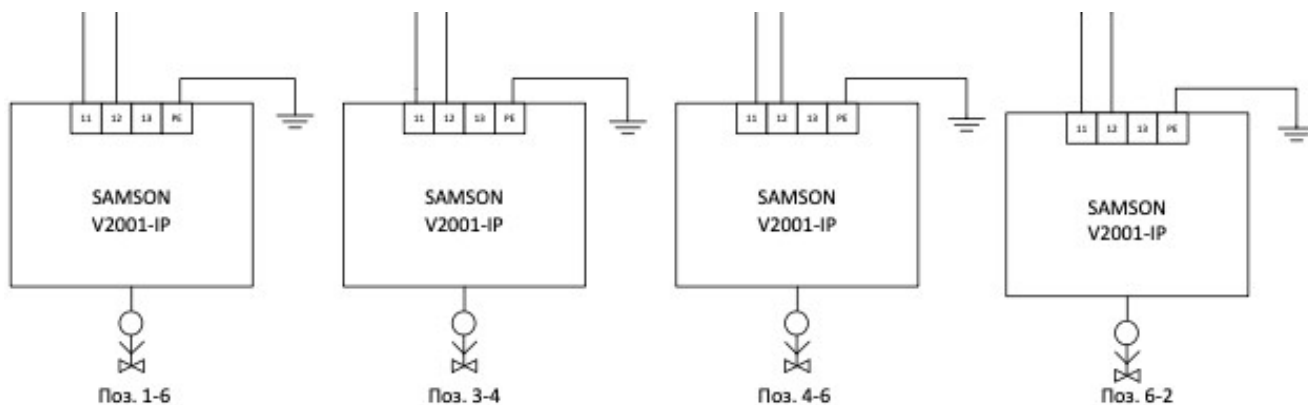


Рисунок 2.4 – Схема під'єднання електропневматичних перетворювачів Samson 2001IP

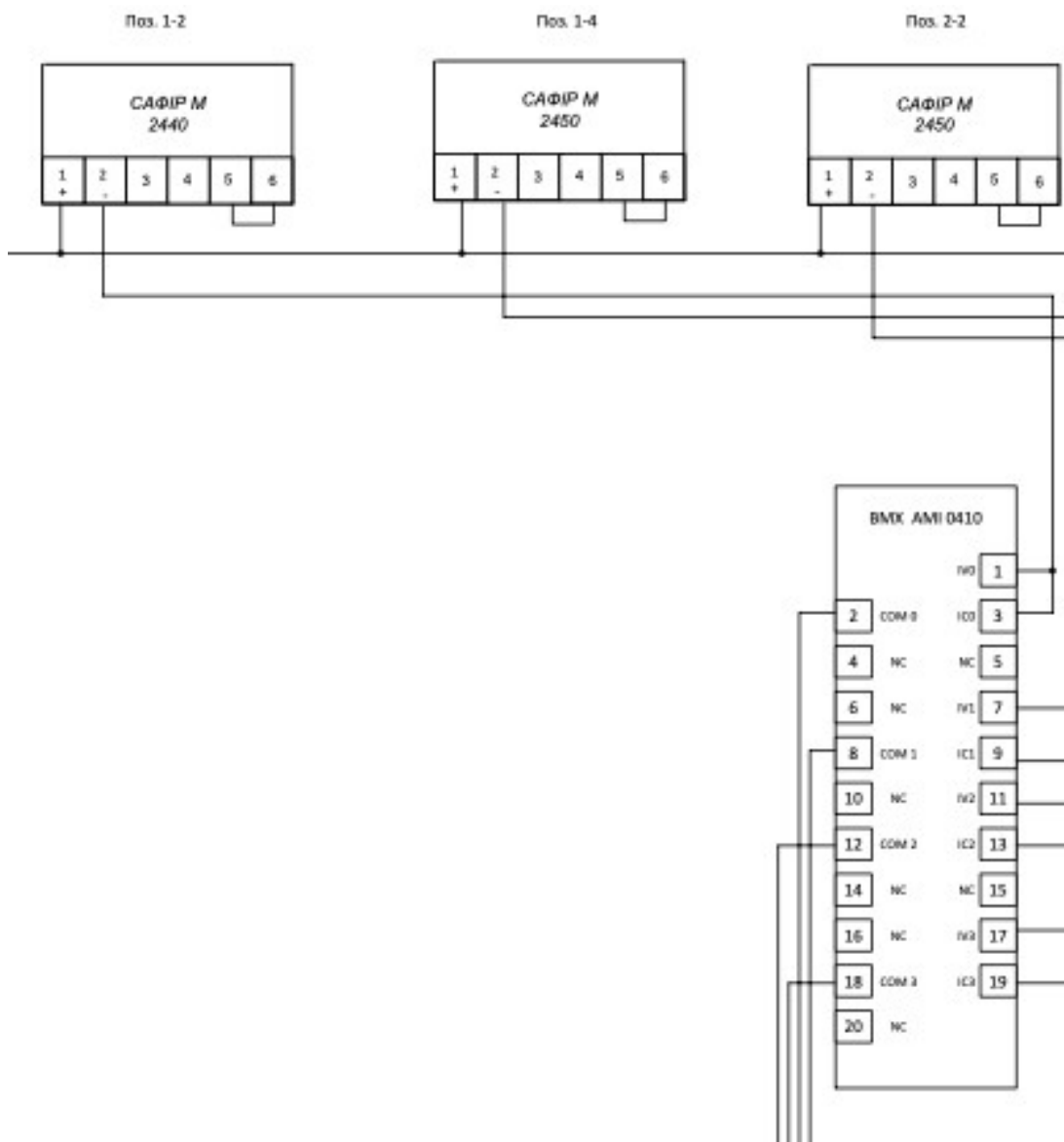


Рисунок 2.5 – Схема під'єднання дифманометра Сафір-М 2440 та дифманометра Сафір-М 2450

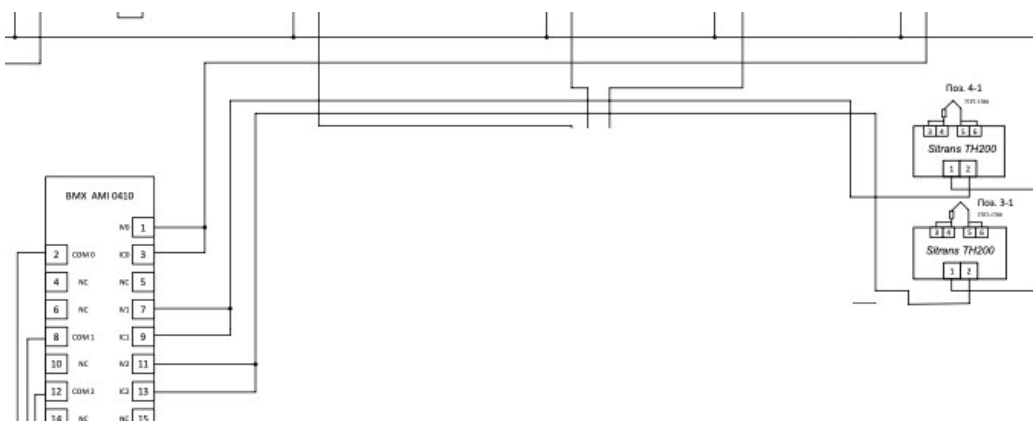


Рисунок 2.6 – Схема під'єднання ТППІ -1788

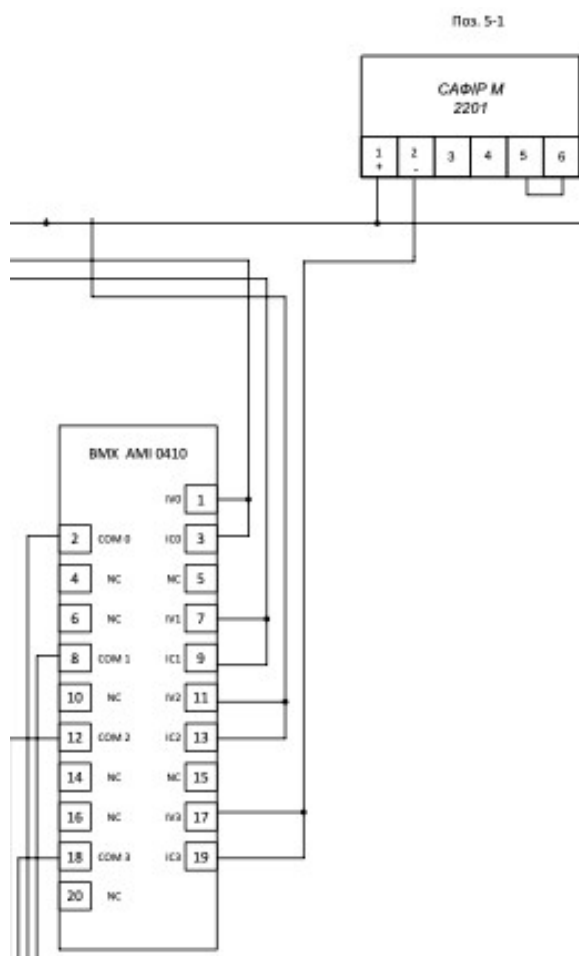


Рисунок 2.7 – Схема під'єднання вимірювальний перетворювач розрідження Сафір-М 2201

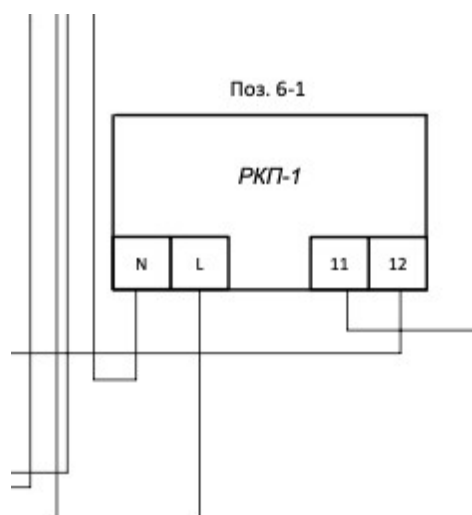


Рисунок 2.8 – Схема під'єднання приладу контролю полум'я РКП-1

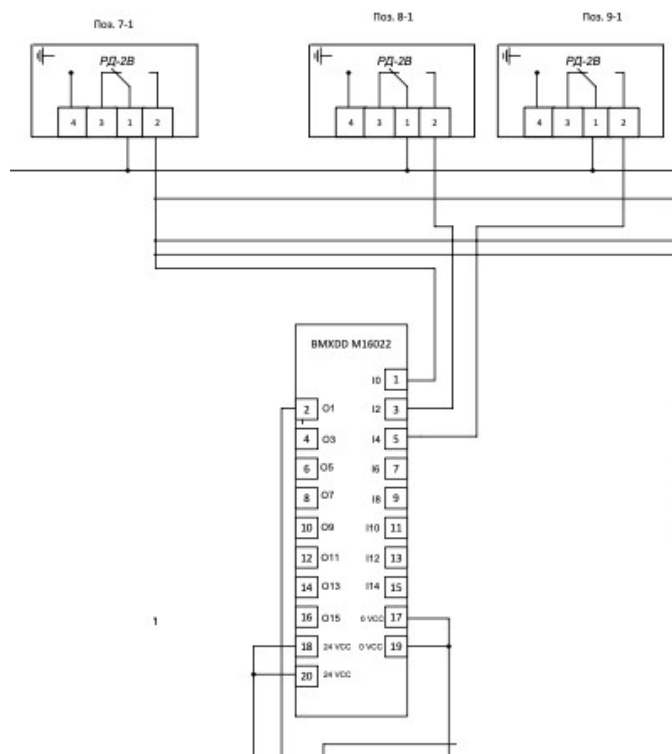


Рисунок 2.9 – Схема під'єднання реле тиску РД-2В

## 2.5 Специфікація засобів автоматизації

У таблиці 2.1. відображено специфікація на засоби автоматизації.

Таблиця 2.1 – Специфікація на засоби автоматизації

| № п/п | № поз. | Назва параметра і номінальне значення                | Назва засобу та коротка технічна характеристика                                                                                                                    | Тип                    | Місце встановлення                    | К-ть |
|-------|--------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------|
| 1     | 1-1    | Витрата газу<br>120 м <sup>3</sup> /год              | Діафрагма камерна<br>$P_y = 0.6 \text{ МПа}$ ; $D_y = 60 \text{ мм}$                                                                                               | ДК6-60                 | Трубопровід подачі газу               | 1    |
| 2     | 1-2    |                                                      | Перетворювач перепаду тиску.<br>Верхня межа вимірювання 16 кПа; межа допустимої основної похибки 0,5% від верхньої межі вимірювання.<br>Вихідний сигнал 4 ÷ 20 мА. | Сафір М<br>модель 2440 | По місцю                              | 1    |
| 3     | 1-3    | Витрата первинного повітря 1250 м <sup>3</sup> /год. | Діафрагма камерна<br>$P_y = 0,6 \text{ МПа}$ ; $D_y = 125 \text{ мм}$                                                                                              | ДК6-125                | Трубопровід подачі первинного повітря | 1    |

Таблиця 2.1 – Специфікація на засоби автоматизації (Продовження)

| №<br>п/п | №<br>поз.           | Назва параметра<br>і номінальне<br>значення               | Назва засобу та коротка технічна<br>характеристика                                                                                                                             | Тип                  | Місце<br>встановлення                  | К-<br>ть |
|----------|---------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|----------|
| 4        | 1-4                 |                                                           | Перетворювач перепаду тиску. Верхня межа вимірювання 25 кПа; межа допустимої основної похибки 0,5% від верхньої межі вимірювання. Вихідний сигнал $4 \div 20$ мА.              | Сафір М 2450         | По місцю                               | 1        |
| 5        | 3-1<br>4-1          | Температура сушильного агенту                             | Термoeлектричний перетворювач. Діапазоном вимірювання $0 \div 1300$ °С. НсХ - ПП; клас допуску 2; довжина монтажної частини - 1,0 м.                                           | Sitrans TH200        | На вході і всередині сушарки           | 2        |
| 6        | 2-1                 | Витрата вторинного повітря $1500 \text{ м}^3/\text{год.}$ | Діафрагма камерна $P_y = 0,6$ МПа; $D_y = 200$ мм                                                                                                                              | ДК6-200              | Трубопровід, що подає вторинне повітря | 1        |
| 7        | 2-2                 |                                                           | Перетворювач перепаду тиску. Верхня межа вимірювання 40 кПа; межа допустимої основної похибки 0,5% від верхньої межі вимірювання. Вихідний сигнал $4 \div 20$ мА.              | Сафір М 2450         | По місцю                               | 1        |
| 8        | 4-3,<br>4-4         | Вологість сухого матеріалу на виході сушарки 3%           | Радарний НВЧ – вологомір. Діапазон вимірювання 0,1 - 10%. Вихідний сигнал 4-20 мА. Похибка 0,5... 1 % абс. Напруга живлення ~220 В.                                            | Мікрорадар -113 K11K | На виході сушарки                      | 1        |
| 9        | 6-1,                | наявність полум'я на пальнику                             | Прилад контролю полум'я в комплекті з давачем полум'я ДП-1. сигналізація відсутності полум'я. сигнал на вимкнення подачі палива у випадку порушення нормального режиму роботи. | РКП-1                | Всередині барабану                     | 1        |
| 10       | 7-1,<br>8-1,<br>9-1 |                                                           | Реле тиску<br>Дискретний вихідний сигнал<br>Діапазон тиску $0 \dots 25$ кПа                                                                                                    | РД-2В                | По місцю                               | 3        |
| 11       | 5-1                 | Розрідження в змішувальній камері -60 Па                  | Перетворювач розрідження. Верхня межа вимірювання 25кПа; межа допустимої основної похибки 0,5% від верхньої межі вимірювання. Вихідний сигнал $4 \div 20$ мА.                  | Сафір М 2201         | По місцю                               | 1        |

Таблиця 2.1 – Специфікація на засоби автоматизації (Продовження)

| № п/п | № поз.             | Назва параметра і номінальне значення | Назва засобу та коротка технічна характеристика                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Тип                  | Місце встановлення                   | К-ть |
|-------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|------|
| 12    | 1-6, 3-4, 4-6, 6-2 |                                       | Регулюючий клапан з пневматичним виконавчим механізмом та вбудованим електропневматичним позиціонером як одна монтажна одиниця. Умовний діаметр Ду 80мм. Умовний тиск Р <sub>у</sub> 1,6 МПа. У якості живлення використовується стиснене повітря під тиском від 1,4 до 6 бар. Електричний вхідний сигнал позиціонера 4 ... 20 мА. Температури від -20 оc до +220 оc.                               | Samson 3241-1/3241-7 | Трубопровід и подачі газу та повітря | 4    |
| 13    | 5-3                |                                       | Частотний перетворювач виробництва Schneider Electric. Потужність 0.2 кВт. Номінальний струм 1.5А. Максимальна вихідна частота 600 Гц. сигнал керування 4...20 мА                                                                                                                                                                                                                                   | ATV 320              | По місцю                             | 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(и) line supply, protective earth, 24 V DC input sensor                                                                                                                                                                                | CPS 2000             |                                      | 1    |
| 15    |                    |                                       | Центральний процесор має 11 комірок і працює з 36 каналами. У стандартній конфігурації (одна стійка) підтримується до 1024 дискретних I/O. Аналогові входи/виходи – до 256 у багаторейковому варіанті або до 66 у межах однієї стійки. Для зв'язку передбачено 2 Ethernet-комунікаційні модулі та 4 модулі інтерфейсу AS. Кількість адресованих пристроїв: 248 у character mode і ще 248 по Modbus. | P34 - 2000           |                                      | 1    |
| 17    |                    |                                       | Модуль аналогового введення: один 20-контактний роз'єм; підтримує сигнали 4–20 mA або 0–10 V; кількість каналів – 4.                                                                                                                                                                                                                                                                                | BMX AMI 0410         |                                      | 2    |
| 18    |                    |                                       | Модуль аналогового виведення: той самий тип підключення – 20-піновий конектор; має 8 вихідних каналів зі струмовим діапазоном 4–20 mA.                                                                                                                                                                                                                                                              | BMX AMO 0802         |                                      | 1    |
| 19    |                    |                                       | Дискретний модуль містить 8 входів (24 V DC) і 8 виходів, працездатних у діапазоні 19–30 V DC                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | BMXDD M16022         |                                      | 1    |

## 2.6 Опис технологічного об'єкта регулювання та знаходження його динамічної моделі

Щоб розрахувати систему автоматичного регулювання даного контуру, визначимо математичну модель об'єкта [9]. Виходячи з характеру експериментальної кривої, обираємо структуру моделі об'єкта - функцію передачі як послідовне з'єднання двох аперіодичних ланок:

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

де  $T_1, T_2$  - сталі часу;  $k$  - коефіцієнт передачі.

### *Визначення параметрів*

У моделюванні за експериментальними даними розгону або імпульсної перехідної характеристики часто використовують метод найменших квадратів (МНК). У межах цього підходу, обравши певну структуру передатної функції  $W(p)$ , будують її теоретичну криву розгону, після чого обчислюють суму квадратів відхилень між експериментальними та теоретичними значеннями  $y(t)$  у конкретні моменти часу  $t$ :

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

Де  $N$  позначає кількість експериментальних спостережень, а  $a$  – вектор параметрів заданої передатної функції [9]. Відповідно до методу найменших квадратів, ці параметри мають бути такими, щоб функціонал  $J(a)$  набував мінімального значення ( $J(a) \rightarrow \min$ ). Отже, завдання полягає у знаходженні таких значень вектора  $a$ , які мінімізують функцію  $J(a)$ . Розв'язати це можна як аналітично, так і чисельно. У разі аналітичного підходу для кожного параметра беруть частинні похідні функції  $J(a)$  та прирівнюють їх до нуля, у результаті чого формується система з  $n$  рівнянь

$$\frac{\partial J}{\partial a_1} = 0; \frac{\partial J}{\partial a_2} = 0; \dots; \frac{\partial J}{\partial a_n} = 0.$$

Розв'язок цієї системи рівнянь дозволяє знайти значення невідомих параметрів [9].

При чисельному розв'язанні задачі знаходження параметрів моделі ефективним інструментом є пакет Matlab, який забезпечує засоби для формування передатних функцій, розрахунку перехідних процесів і реалізації оптимізаційних процедур. Одним з базових засобів пошуку параметрів є функція `fminsearch`.

## 2.7 Розрахунок оптимальних параметрів налагодження автоматичного ПІ-регулятора

У методі розширеного аналізу АФХ основою є критерій стійкості, сформульований Найквістом.. Розширену частотну характеристику елемента з відомою функцією передавання визначають, замінюючи в ній оператор Лапласа

$$p = -m\omega \pm i\omega,$$

де  $\omega$  позначає кругову частоту, а показник коливальності  $m = \alpha/\beta$  визначає запас стійкості. Параметр  $\alpha$  є модулем дійсної частини комплексного кореня характеристичного рівняння, тоді як  $\beta$  дорівнює модулю його уявної частини [11].

Так як обґрунтування стійкості спирається на амплітудно-фазовий підхід Найквіста, для незамкненої системи регулювання критерій стабільності формулюється через її розширені частотні властивості

$$W_{pc}(m, i\omega) = W_{op}(m, i\omega) \cdot W_p(m, i\omega) = -1,$$

де  $W_{op}(m, i\omega)$  позначає розширену амплітудно-фазову характеристику (АФХ) відкритої системи,  $W_p(m, i\omega)$  - це розширена АФХ самого об'єкта регулювання; а залишена частина виразу відображає відповідну характеристику регулятора. З даного виразу отримуємо

$$\begin{cases} A_{op}(m, \omega) \cdot A_p(m, \omega) = 1, \\ \varphi_{op}(m, \omega) + \varphi_p(m, \omega) = -\pi. \end{cases}$$

А функція передачі для ПІ-регулятора має вигляд

$$W_{PI}(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right),$$

де  $k_p$  - коефіцієнт підсилення;  $T_i$  - ізодромний час.

## 2.8 Висновки до розділу

У цьому розділі розроблено схему системи й дібрано технічні засоби для її реалізації. Розроблено й обґрунтовано структуру системи керування. Дібрано комплекс технічних засобів і мікроконтролер. Обрано середовище програмування – Unity Pro. Обрано таку конфігурацію мікропроцесорного засобу: BMX AMI 0410 - модуль введення аналогових сигналів; BMX AMI 0410 - модуль введення аналогових сигналів; BMX AMO 0802 - модуль виведення аналогових сигналів; CPS 2000 - модуль живлення; P34-2000 - процесорний модуль; BMXDD M16022 - модуль дискретних входів/виходів. Описано функціональні схеми автоматизації, що, зокрема, передбачають регулювання співвідношення витрат палива та первинного повітря, температури у камері змішування шляхом зміни подачі газу, температури сушильного агента в барабані з корекцією за вологістю висушеного матеріалу та розрідження у змішувальній камері. Побудовано схему захисту. Розроблено електричні схеми з'єднання контролера із засобами автоматизації. Складено специфікацію засобів автоматизації. Описано технологічний об'єкт регулювання та процедуру визначення його динамічної моделі. Розраховано оптимальні настроювальні параметри автоматичного ПІ-регулятора.

### 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

#### 3.1 Розробка програми функціонування контролера

Перелік використаних блоків:

IN – змінна типу Real, яку необхідно масштабувати;

PARA – набір параметрів блока, до якого входять чотири значення за формулою у форматі Real та одна булева змінна clip;

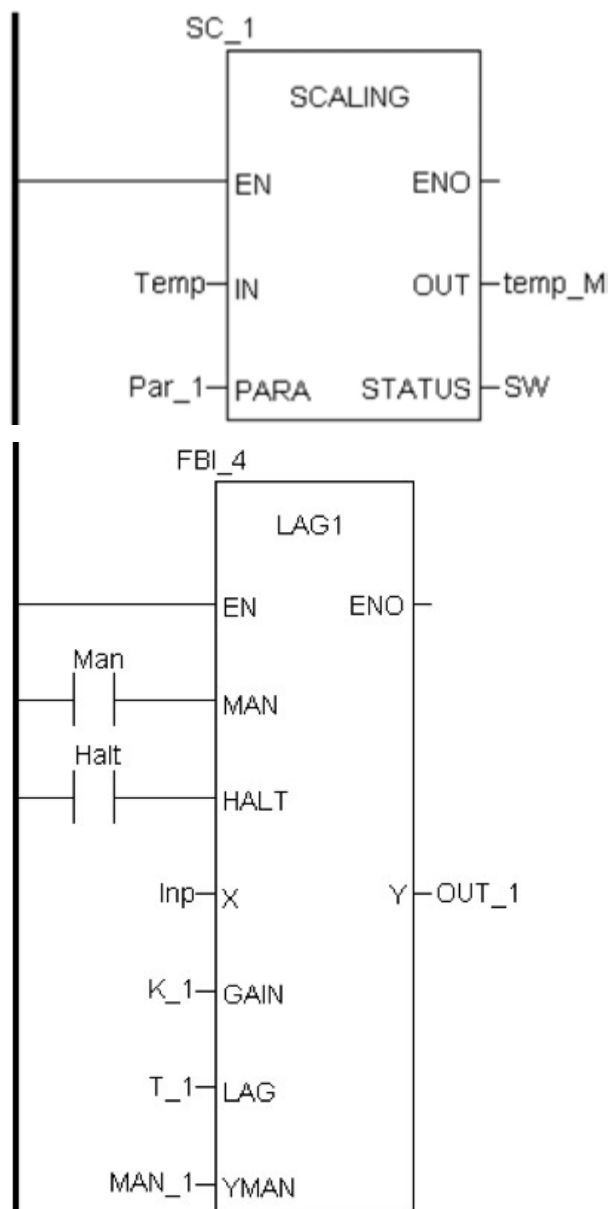
HALT – логічна ознака фіксації виходу (1 означає утримання попереднього значення);

X – вхідний сигнал у форматі Real;

Gain – коефіцієнт, що визначає рівень фільтрації;

LAG – часова константа фільтрації (тип Time);

YMAN – вихідний сигнал у ручному режимі, заданий у форматі Real.



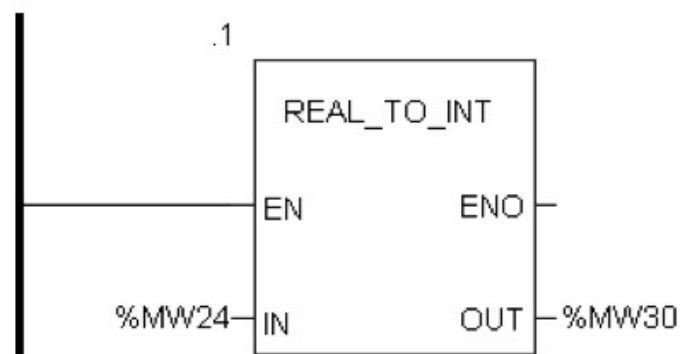
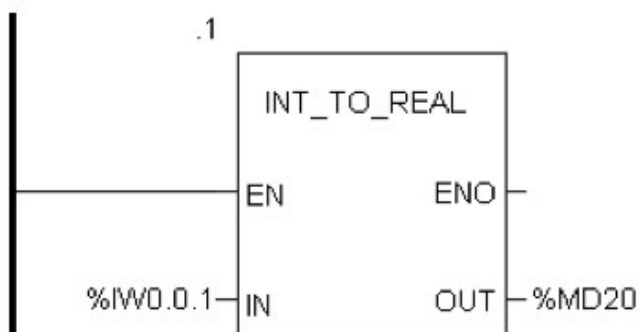
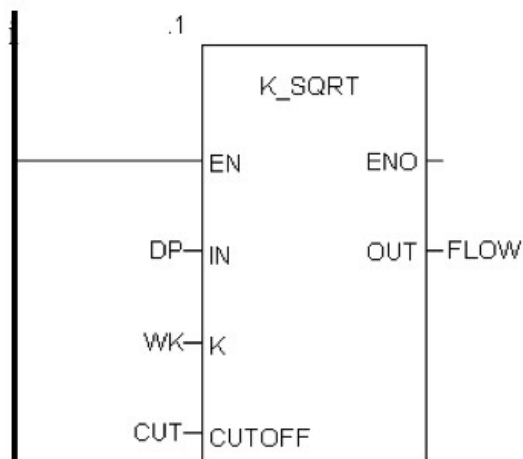
N – сигнал із диференційного манометра, представлений як значення типу Real.

K – множник або коефіцієнт масштабування.

CUTOFF – рівень обрізання, що визначає поріг.

Числовий тип integer може бути конвертований у формати: bool, byte, word, dword, dint, а також real.

Для значень IN використовується алгоритм округлення: значення з 0 до 4 округлюються вниз, а з 5 до 9 – вгору.



PV – поточна значення сигналу.

SV – встановлене значення.

FF – прямий позитивний зворотній зв'язок.

RCPY – команда на перезапис виходу регулятора на початку обчислювального кроку.

MAN\_AUTO – перемикач режимів «ручний / автоматичний».

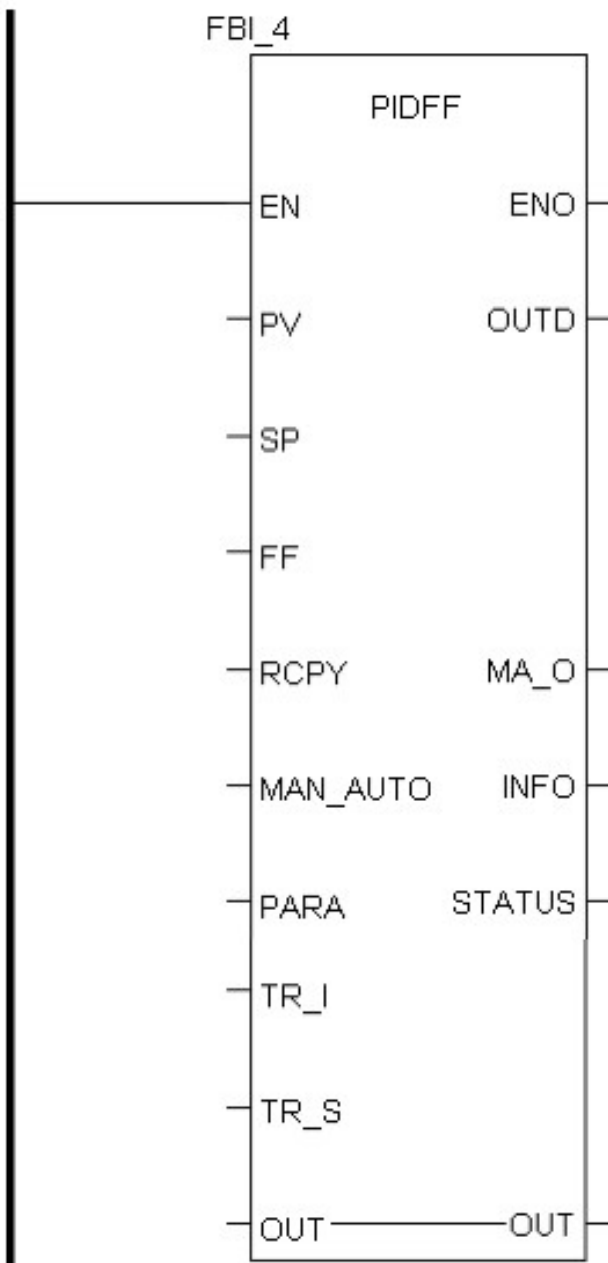
TR\_I – вихід у віддаленому режимі.

TR\_S – перехід у віддалене керування.

OUTD – диференційний вихідний сигнал.

MA\_O – ручний чи автоматичний режими роботи.

STATUS – індикатор стану.



IN – вхід регулятора, що використовується в автоматичному режимі.

FORC – параметр, який визначає, за яким перемикачем виконується робота (MA\_FORC чи MA\_AUTO).

TR\_I – величина дистанційного керування.

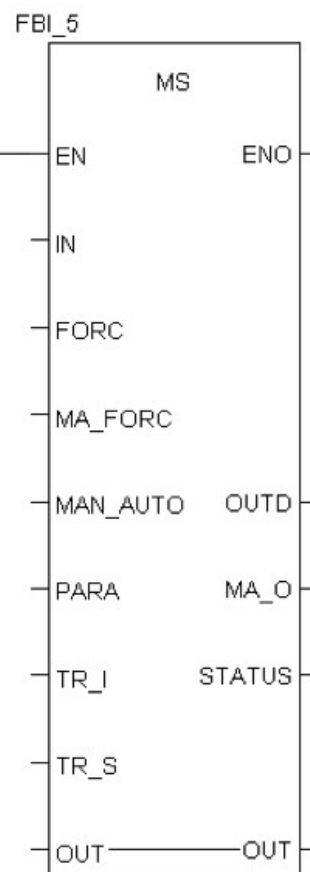
TR\_S – перехід у дистанційне керування.

OUTD – інкрементний вихід.

OUT – абсолютний вихід.

MA\_O – режим роботи (ручний або автоматичний).

STATUS – статусне слово.



### 3.2 Розробка та тестування модуля для знаходження параметрів моделі

За допомогою чисельного алгоритму в пакеті MATLAB визначимо параметри моделі. Основний script-файл викликає підпрограму `sumt`, де сформульовано вираз  $s = J(a)$  – суму квадратів різниць між експериментальними й змодельованими перехідними характеристиками.

Основна програма звертається до алгоритму `fminsearch`, котрий ітеративно, за схемою Нелдера-Міда, знаходить набір параметрів моделі, що мінімізує цільову функцію `sumt`. Результат обчислень зберігається у векторі `x`, який і представляє потрібні коефіцієнти заданої функції передавання.

*Програма для визначення параметрів моделі та порівнянні розбіжності між експериментальними та теоретичними кривими розгону на графіку*

```
t_sec = [0 10 20 40 50 60 70 80 90 100 120 150];
T_exp_C = [605 635 675 725 745 755 760 765 773 778
782 783];
gain_dx = 25;
t_grid_sec = 0:150;
T_exp_interp_C = interp1(t_sec, T_exp_C,
t_grid_sec, 'linear');
obj_fun = @(p) sum( ...
    ( step( tf(p(3), [p(1) 1]) * tf(1, [p(2) 1]),
t_grid_sec ) ...
    * gain_dx + 600 - T_exp_interp_C ).^2 );
init_params = [10 10 1];
opt_params = fminsearch(obj_fun, init_params);
tau1 = opt_params(1);
tau2 = opt_params(2);
gain_k = opt_params(3);
tf1 = tf(gain_k, [tau1 1]);
tf2 = tf(1, [tau2 1]);
sys_tf = tf1 * tf2;
step_resp = step(sys_tf, t_grid_sec);
T_model_C = step_resp * gain_dx + 600;
max_rel_err_pct = max(abs(T_model_C -
T_exp_interp_C)) / 600 * 100;
rms_err = sqrt(mean( (T_model_C -
T_exp_interp_C).^2 ));
figure;
plot(t_grid_sec, T_model_C, 'k', ...
    t_sec, T_exp_C, 'ok');
grid on;
xlabel('t, c');
```

```
ylabel('T, °C');
title(sprintf('Макс. похибка = %.2f%%, RMS = %.2f
°C', ...
    max_rel_err_pct, rms_err));
```

*Текст Файл-функції **summ.m** function s=summ(x) ;*

```
t_sec = [0 10 20 40 50
60 70 80 90 100 120 150];
T_exp_C = [600 630 680
720 740 750 760 770 775 780
780 785];
t_grid_sec =
0:5:150; крок 5 с
T_exp_interp_C =
interp1(t_sec, T_exp_C,
t_grid_sec, 'linear');
gain_dx = 25;
tau1 = opt_params(1);
tau2 = opt_params(2);
gain_k = opt_params(3);
tf1 = tf(gain_k, [tau1
1]);
tf2 = tf(1, [tau2 1]);
sys_tf = tf1 * tf2;
step_resp = step(sys_tf,
t_grid_sec); відгук
T_model_C = step_resp *
gain_dx + 600;
sse = sum( (T_model_C -
T_exp_interp_C).^2 );
fprintf('SSE = %.3f
°C²\n', sse);
```

Результат виконання програми:

- графіки порівняння експериментальної та апроксимованої обраною функцією передачі кривих розгону (рис. 3.1);
- параметри функції передачі:  
 $k = 7.4$   $T_1 = 35$  с;  $T_2 = 3$  с – сталі часу функції передачі

- максимальна зведена похибка апроксимації  $\delta_{\text{del}} = 1.4 \%$ ;
- середньоквадратичне відхилення похибки апроксимації  $\sigma = 0.25 \text{ Па}$ .

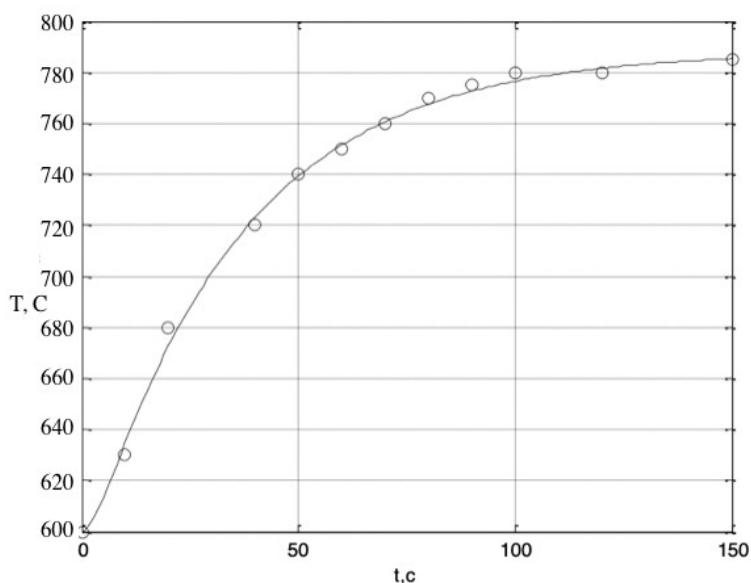


Рисунок 3.1 – Графіки порівняння експериментальної та апроксимованої кривих розгону при зміні подачі газу на  $25 \text{ м}^3/\text{год}$ : о – експериментальні значення.

Отже, функція передачі об'єкта матиме вигляд:

$$W_{op}(p) = \frac{7,4}{(35p+1)(3p+1)}$$

Для забезпечення достатньої точності апроксимації потрібно, щоб зведена похибка не перевищувала 3%.

Оскільки розрахункова величина похибки менше граничного порогу  $\delta = 1,4 \% < 3\%$ , функція передачі вважається придатною для моделювання експериментальної кривої розгону.

### 3.3 Розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання

У цьому розділі бакалаврської роботи виконано розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання температури (САР) у камері змішування прямоточної барабанної сушарки.

Регулювальна дія - зміна витрати газу.

Основним збуренням є зміна витрати первинного повітря.

Вихідними даними для розрахунку слугує експериментальна крива розгону (табл. 3.1), отримана внаслідок зміни витрати газу на 25 м<sup>3</sup>/год, що подається до камери змішування.

Вимоги до якості системи автоматичного регулювання температури в камері змішування прямої барабанної сушарки:

- допустиме максимальне динамічне відхилення (МДВ)  $A = 50$  с;
- допустима похибка регулювання  $\Delta = \pm 5$  с;
- допустимий час регулювання  $t = 50$  с;
- перерегулювання  $\partial = 0$ .

Таблиця 3.1 – Експериментальна крива розгону

|      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| t, с | 0   | 10  | 20  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 | 120 | 150 |
| T, с | 600 | 630 | 680 | 720 | 740 | 750 | 760 | 770 | 775 | 780 | 780 | 785 |

### 3.4 Опис алгоритму роботи системи

*Контур 1. Регулювання співвідношення витрати палива та первинного повітря*

Уніфікований вихід з датчика перепаду тиску на газовій лінії подається до блока масштабування SCALING. Потім сигнал передається до функціонального модуля K\_SQRT, який виконує добування квадратного кореня.

Аналогічно, сигнал із датчика перепаду тиску на повітряній лінії також надходить спочатку на SCALING, а далі – на K\_SQRT.

Обидва оброблені сигнали передаються до модуля DIV, де обчислюється їхнє відношення. Результат подається на вхід PV, а задане значення – на SP.

Основний регулятор, опрацювавши ці сигнали, формує керуючий вихід OUT\_MS, який надходить на черговий блок SCALING, що масштабує його перед передачею на аналоговий вихід (див. рис. 3.2).

*Контур 2. Регулювання температури в камері змішування шляхом зміни подачі газу.*

Сигнал уніфікованого типу з датчика перепаду тиску надходить спочатку до модуля SCALING, де відбувається його масштабування. Далі оброблений сигнал передається в блок K\_SQRT, що виконує операцію добування квадратного кореня.

Результат подається на вхід PV, тоді як встановлене значення передається на вхід SP.

Після обробки сигналів регулятор формує вихідну величину OUT\_LS, яка проходить через ще один блок SCALING, масштабується і спрямовується на аналоговий вихід.

Для контролю граничного рівня використовується блок COMPARE, який забезпечує сигналізацію при перевищенні верхньої межі (див. рис. 3.3).

Рисунок 3.2 – Регулювання співвідношення витрати палива та первинного повітря

подачі газу

*Контур 3. Регулювання температури сушильного агента в барабані сушарки з корекцією по вологості сухого матеріалу*

Уніфікований сигнал від вологоміра надходить на блок масштабування «SCALING». Уніфікований сигнал від термоелектричного перетворювача також надходить на блок масштабування «SCALING», після чого сигнал подається на «PV» блока «PIDFF». Після оброблення сигналів «PV» і завдання «SP» допоміжний регулятор формує сигнал «OUT\_MS», який, своєю чергою, подається на основний блок «PIDFF» як завдання «SP» і вхідний сигнал AIN<sub>i</sub>. Після оброблення вхідних сигналів допоміжний регулятор «MS» формує керівний сигнал «OUT\_IS». Керівний сигнал передається на блок «SCALING», масштабований сигнал подається на аналоговий вихід. За допомогою блока «COMPARE» реалізовано сигналізацію перевищення верхньої межі (рис 3.4).

*Контур 4. Регулювання розрідження в змішувальній камері*

Уніфікований сигнал від перетворювача розрідження надходить на блок масштабування «SCALING». Промасштабований сигнал подається на «PV», а завдання – на «SP» основного аналогового регулятора «PIDFF». Після оброблення сигналу регулятор формує керівний сигнал «OUT\_MS», який після масштабування у блоці «SCALING» подається на аналоговий вихід. За допомогою блока «COMPARE» реалізовано сигналізацію перевищення верхньої та нижньої меж (рис. 3.5).

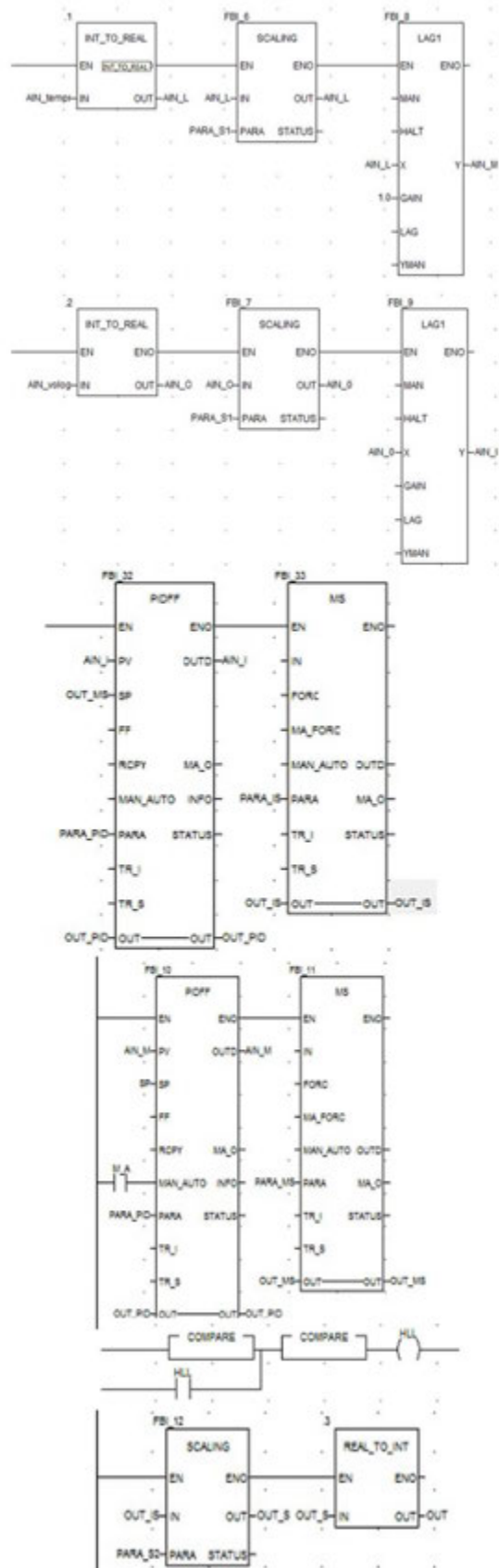


Рисунок 3.4 – Регулювання температури сушильного агенту в барабані сушарки з корекцією по вологості сухого матеріалу

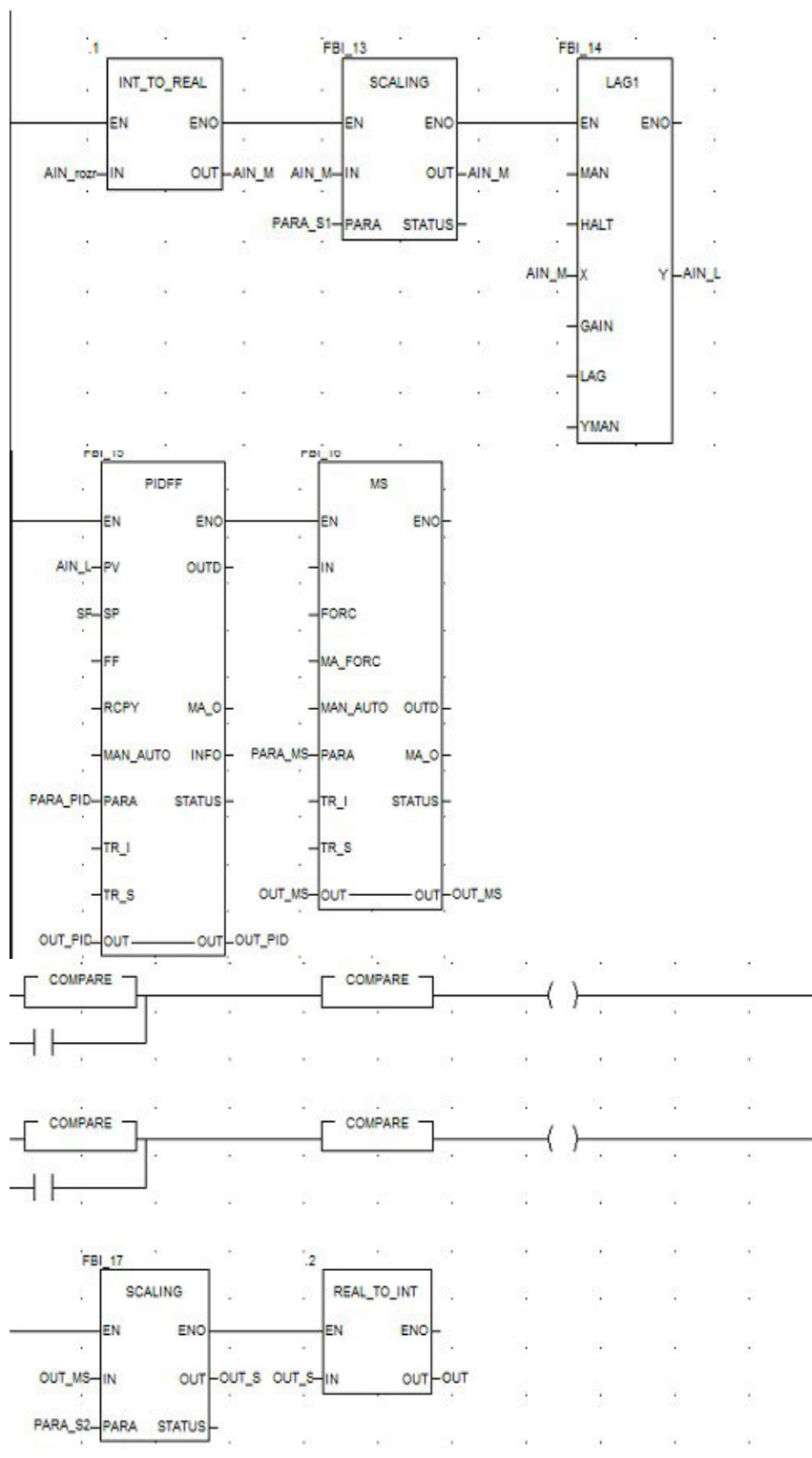


Рисунок 3.5 – Регулювання розрідження в змішувальній камері

#### Контур 5. Захист та блокування подачі газу й повітря.

Для забезпечення блокування та захисту повітряної й газової подачі застосовують комутаційні елементи з нормально відкритими або закритими контактами. У разі аварії вони генерують сигнал «1», що активує реле (рис. 3.6).

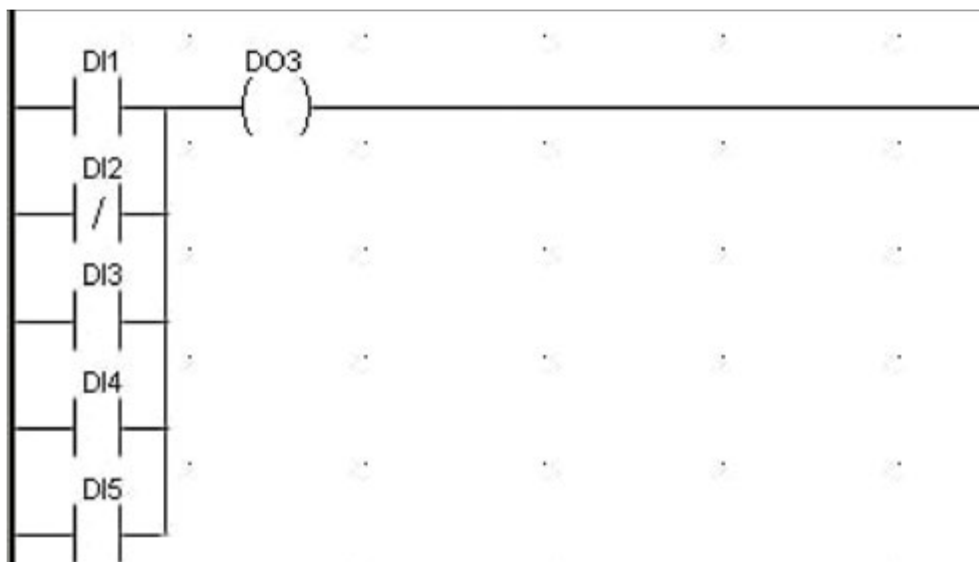


Рисунок 3.6 – Захист та блокування подачі газу й повітря

### 3.5 Вибір і обґрунтування параметрів перехідного процесу контуру регулювання та типу перехідного процесу

Промислова система автоматичного регулювання повинна забезпечувати відповідний рівень якості регулювання. Для стабілізуючих САР якість визначається через перехідну характеристику у відповідь на одиничне збурення, тоді як для слідкуючих систем – за реакцією на одиничну зміну визначеного сигналу [11].

До ключових критеріїв якості регулювання належать: тривалість перехідного процесу, найбільше відхилення під час динаміки, рівень коливань і статична похибка.

Крім основних, іноді враховуються і специфічні вимоги до якості, як-от гранична швидкість зміни регульованої величини чи основна частота її коливань. Тривалість перехідного процесу описується показником часу регулювання, а максимальне динамічне відхилення – це найбільша амплітуда відхилення від заданого значення. Ступінь коливальності системи - кількість коливань регульованої величини протягом часу регулювання. Похибка регулювання - різниця між установленим після закінчення перехідного процесу значенням регульованої величини та її заданим значенням. Параметри якості, зокрема й інші

характеристики, встановлюють або на основі досвіду експлуатації подібних систем, або задають як вимоги.

Згідно з цими критеріями формують бажаний вигляд перехідного процесу, який повинен забезпечити регулятор, що проектується [11].

### **3.6 Побудова розширеної ФЧХ об'єкта регулювання та знаходження частоти зрізу**

Згідно з математичною моделлю (п. 2.2) пропонується наступний код для знаходження частоти зрізу.

*Програма для побудови розширеної фазо-частотної характеристики та пошуку частот зрізу  $\omega^*$  та  $\omega^{**}$ :*

```
clear; clc;
gain_k = 7.4;
tau1 = 35;
tau2 = 3;
sigma_ratio = 0.5;
omega_rad_s = 0:1e-4:0.4;
s_line = -sigma_ratio*omega_rad_s + 1i*omega_rad_s;
freq_resp = gain_k ./ ((tau1*s_line + 1) .*
(tau2*s_line + 1));
phase_rad = phase(freq_resp);
ref_phase1 = -pi/2 + atan(sigma_ratio);
ref_phase2 = -pi;
figure;
plot(omega_rad_s, phase_rad, [0 0.4], [ref_phase1
ref_phase1], [0 0.4], [ref_phase2 ref_phase2]);
grid on;
xlabel('\omega, рад/с');
```

```

ylabel('\phi, рад');
legend('\phi(\omega)', sprintf('\phi = %.3f рад',
ref_phase1), '\phi = -\pi', 'Location', 'best');
title('Фазова характеристика системи на лінії s = -\sigma + j\omega');

```

Виконання програми призводить до побудови графіка, який відображає розширену фазо-частотну характеристику системного об'єкта регулювання (рис. 3.7).

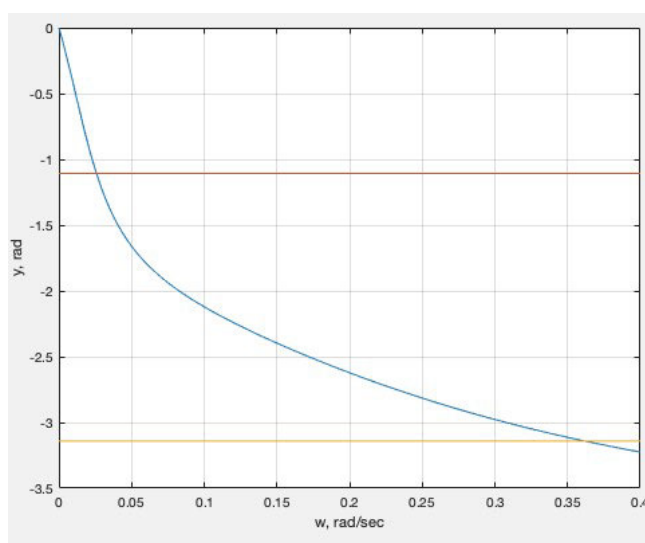


Рисунок 3.7 – Графік розширеної фазо-частотної характеристики об'єкта регулювання

З графіку зображеному на рис. 3.7 визначимо значення частоти

$$\omega^* = 0.025 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \text{ та } \omega^{**} = 0.37 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Для заданого рівня запасу стійкості  $m$  у координатній площині  $k_p$  і  $k_p/T_i$  побудовано межу області, що забезпечує необхідний запас. На її основі визначено оптимальні параметри налаштування, зокрема коефіцієнт підсилення  $k_{\text{опт}}$  і відношення  $k_p/T_{i_{\text{опт}}}$ , які знайдено з урахуванням другої інтегральної оцінки якості перехідного процесу на збурення.

*Програма, створена в MATLAB, призначена для пошуку оптимальних параметрів регулятора за критерієм другої мінімальної інтегральної оцінки, що застосовується до перехідної характеристики витрати повітря:*

```

clear; clc;
gain_k      = 7.4;
tau1        = 35;
tau2        = 3;
sigma_ratio = 0.5;
omega_rad_s = 0.1:0.001:0.36;
s_line      = -sigma_ratio*omega_rad_s +
1i*omega_rad_s;
freq_resp_open = gain_k ./ ((tau1*s_line + 1) .*
(tau2*s_line + 1));
mag_open       = abs(freq_resp_open);
phase_open_rad = phase(freq_resp_open);
kp_over_tiz    = -omega_rad_s .* (sigma_ratio^2 + 1)
.* sin(phase_open_rad) ./ mag_open;
kp_gain        = -(cos(phase_open_rad) + sigma_ratio
.* sin(phase_open_rad)) ./ mag_open;
plant_tf       = tf(gain_k, conv([tau1 1],[tau2 1]));
S = zeros(size(omega_rad_s));
for idx = 1:length(omega_rad_s)
    ctrl_tf     = tf(kp_gain(idx),[0 1]) +
tf(kp_over_tiz(idx),[1 0]);
    closed_tf   = feedback(plant_tf, ctrl_tf);
    t_sec       = 0:0.5:300;
    output      = step(closed_tf, t_sec)*25;
    S(idx)      = trapz(t_sec, output.^2);
end
[J_min, idx_min] = min(S);
kp_over_tiz_opt = kp_over_tiz(idx_min);
kp_opt          = kp_gain(idx_min);
tiz_opt         = kp_opt / kp_over_tiz_opt;
figure(1);
plot(kp_gain, kp_over_tiz, 'k', kp_opt,
kp_over_tiz_opt, '*k');
grid on;
xlabel('kp'); ylabel('kp/Tiz');
figure(2);
plot(kp_gain, S, 'k', kp_opt, J_min, '*k');
grid on;
xlabel('kp'); ylabel('J');
```

У результаті виконання програми побудовано два графіки: межу запасу стійкості САР та залежність другої інтегральної оцінки якості від значення коефіцієнта підсилення регулятора (рис. 3.8).

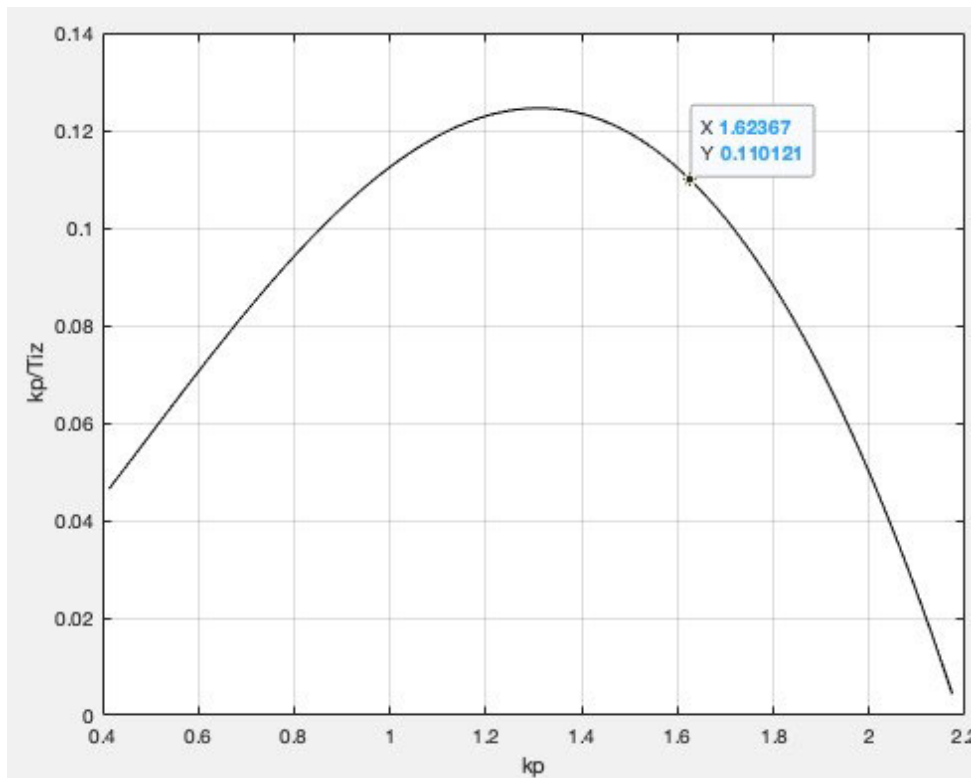


Рисунок 3.8 – Границя області запасу стійкості САР температури з ПІ регулятором

На рис. 3.9 зображено границю області запасу стійкості САР температури з ПІ регулятором, на якій "\*" відмічено оптимальні параметри налаштування ПІ регулятора, для мінімуму другої інтегральної оцінки якості  $J$ .

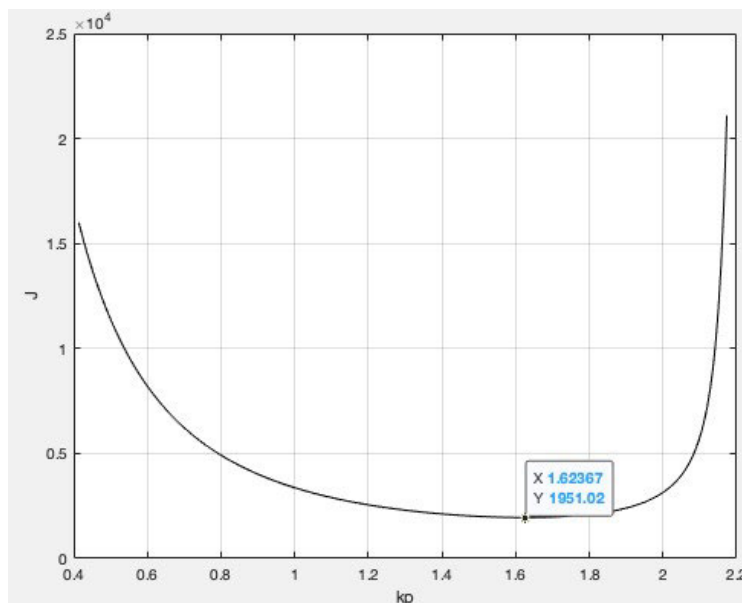


Рисунок 3.9 – Границя області заданого запасу стійкості САР температури в камері змішування з ПІ-регулятором

Оптимальні параметри настроювання ПІ-регулятора та передавальна функція мають наступний вигляд:

$$\frac{k_p}{T_i} = 0,1101 \text{ \%}/(\text{с}^2),$$

$$k_p = 1,6237 \text{ \%}/\text{с},$$

$$W_{\text{ПІ}}(p) = 1,6237 + \frac{0,1101}{p}.$$

### 3.7 Побудова перехідного процесу розрахованої САР

На підставі отриманих параметрів у середовищі Simulink побудовано структурну модель одноконтурної САР температури в камері змішування (рис. 3.10).

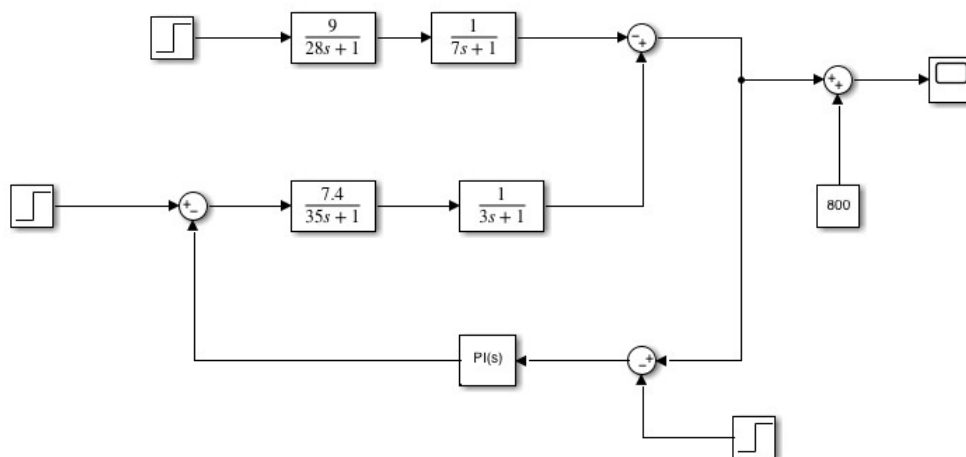


Рисунок 3.10 – Структурна схема САР температури в камері змішування у середовищі SIMULINK

Для перевірки динамічних властивостей САР змодельовано її поведінку у трьох режимах. Перший режим - збурення у вигляді стрибкоподібної зміни витрати первинного повітря на 25 м<sup>3</sup>/год (рис. 3.11):

- максимальне динамічне відхилення  $A_1 = 15.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- час регулювання становить  $t_p = 20 \text{ c}$ ;
- допустима похибка регулювання  $\Delta = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

На підставі отриманої кривої розгону встановлено, що САР із налаштованим ПІ-регулятором задовольняє вимоги до якості перехідного процесу.

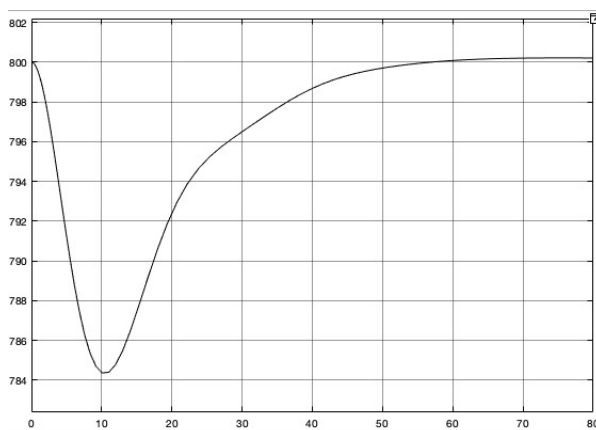


Рисунок 3.11 – Перехідний процес в одноконтурній САР з ПІ-регулятором при дії на нього збурення – витрати первинного повітря, величиною 25 м<sup>3</sup>/год

Другий режим – стрибкоподібна зміна регулюючої дії на 25 м³/год (рис. 3.12):

- максимальне динамічне відхилення  $A_1 = 14.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- час регулювання  $t_p = 30\text{ с}$ ;
- допустима похибка регулювання  $\Delta = 5^{\circ}\text{C}$ .

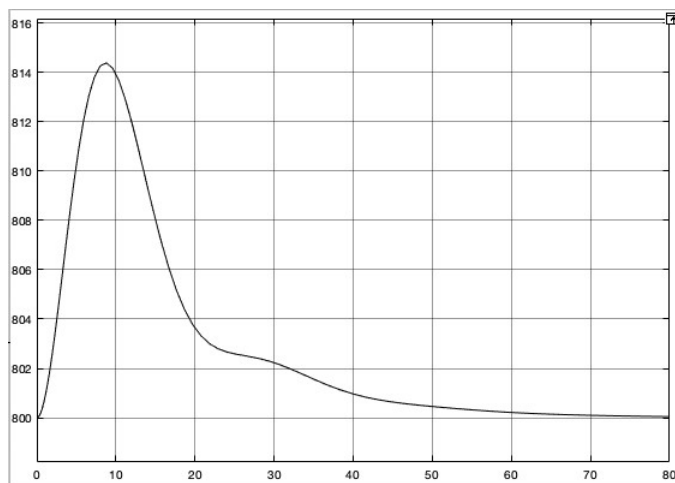


Рисунок 3.12 – Перехідний процес у САР із ПІ-регулятором при стрибкоподібній зміні регулюючої дії на 25 м³/год

У результаті моделювання також встановлено, що система забезпечує задану динаміку регулювання.

Третій режим для моделювання – перехідний процес у САР при зміні заданого значення регульованої величини на 25 °С (рис. 3.13):

- максимальне динамічне відхилення  $A_1 = 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- час регулювання  $t_p = 17\text{ с}$ ;
- допустима похибка регулювання  $\Delta = 5^{\circ}\text{C}$ .

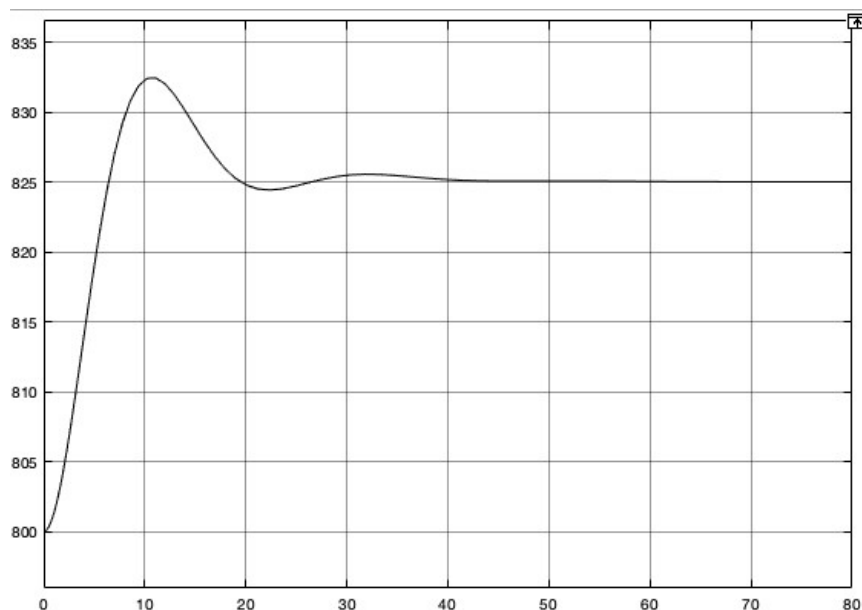


Рисунок 3.13 – Перехідний процес у САР із ПІ-регулятором при заданого значення регульованої величини на 25 °С

Аналізуючи отриманий перехідний процес, перевіряю, чи виконує САР вимоги до якості регулювання під час зміни регулюючої дії, зіставляючи результати з допустимими межами. На підставі кривої розгону можна зробити висновок: застосування ПІ-регулятора в цій системі забезпечує відповідність усім критеріям якості перехідного процесу.

Отже, в усіх випадках спостерігається виконання вимог до якості перехідного процесу без суттєвого перерегулювання. Проведемо моделювання САР температури в камері змішування прямоточної барабанної сушарки. На підставі експериментального збурення у вигляді стрибкоподібного збільшення витрати газу на 25 м³/год побудовано криву розгону, за якою визначено передавальну функцію об'єкта керування:

$$W_{\text{оп}}(p) = \frac{7,4}{(35p + 1)(3p + 1)}.$$

Адекватність побудованої моделі підтверджується тим, що зведена похибка апроксимації становить лише  $\delta = 1,4 \%$

Розрахунок оптимальних параметрів ПІ-регулятора проведено на основі розширеного частотного підходу. Передавальна функція ПІ-регулятора має такий вигляд:

$$W_{pi(p)} = 1.6237 + 0.1101p$$

За допомогою програмного забезпечення Simulink була складена модель, на базі якої було змодельовано перехідний процес при зміні заданого значення регульованої величини, при дії на нього збурення, та при стрибкоподібній зміні регулюючої дії. Показники якості перехідного процесу зображено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Показники якості перехідного процесу

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

Отже, розроблена система автоматичного регулювання задовольняє вимоги щодо якості.

### 3.8 Висновки до розділу

У цьому розділі розроблено програмне забезпечення. Зокрема, створено функціональні програми контролера, а також розроблено та протестовано модуль для визначення параметрів моделі. Розраховано та промодельовано системи автоматичного регулювання. Описано алгоритм роботи системи. Дібрано й обґрунтовано параметри перехідного процесу регульовального контролера та тип перехідного процесу. Побудовано розширену частотно-фазову характеристику об'єкта регулювання та визначено частоти зрізу. Побудовано перехідний процес розрахованої системи автоматичного регулювання.

## ВИСНОВКИ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі була виконана автоматизація процесу сушіння глини в прямоточній барабанній сушарці. Детально розглянуто процес сушіння, описано та проаналізовано всі фактори, які можуть впливати на цей процес.

У першому розділі проаналізовано об'єкт автоматизації та техніко-економічно обґрунтовано доцільність розробки. Описано завдання технологічного процесу сушіння глини. Визначено й проаналізовано фактори, що впливають на технологічний процес. Обґрунтовано номінальні значення параметрів технологічного процесу та допустимі відхилення від них. Оглянуто функціональні схеми автоматизації.

У другому розділі розроблено схему системи й дібрано технічні засоби для її реалізації. Розроблено й обґрунтовано структуру системи керування. Дібрано комплекс технічних засобів і мікроконтролер. Описано функціональні схеми автоматизації, що, зокрема, передбачають регулювання співвідношення витрат палива та первинного повітря, температури у камері змішування шляхом зміни подачі газу, температури сушильного агента в барабані з корекцією за вологістю висушеного матеріалу та розрідження у змішувальній камері. Побудовано схему захисту. Розроблено електричні схеми з'єднання контролера із засобами автоматизації. Складено специфікацію засобів автоматизації. Описано технологічний об'єкт регулювання та процедуру визначення його динамічної моделі. Розраховано оптимальні настроювальні параметри автоматичного ПІ-регулятора.

У третьому розділі розроблено програмне забезпечення. Зокрема, створено функціональні програми контролера, а також розроблено та протестовано модуль для визначення параметрів моделі. Розраховано та промодельовано системи автоматичного регулювання. Описано алгоритм роботи системи. Дібрано й обґрунтовано параметри перехідного процесу регулювального контролера та тип перехідного процесу. Побудовано розширену частотно-фазову характеристику

об'єкта регулювання та визначено частоти зрізу. Побудовано перехідний процес розрахованої системи автоматичного регулювання.

Отримані результати підтвердили ефективність запропонованої системи автоматизації та її доцільність для впровадження у виробництво.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технології сушіння : навч. посібник / В. В. Шутюк, Т. М. Левківська, О. В. Душак, К. В. Рубанка, О. С. Бессараб, С. А. Бут. – Київ : НУХТ ; АртЕк, 2024. – 355 с.
2. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектинвмісної сировини: Монографія. – К.: ТОВ «СІК ГРУП УКРАЇНА», 2018. – 228 с. ISBN 978-617-7457-69-4.
3. Погожих М.І., Потапов В.О., Пак А.О., Жеребкін М.В. Енергоефективні технології та техніка сушіння харчової сировини. – Харків: ХДУХТ, 2016. – 234 с.
4. І.В. Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. Автоматизація виробничих процесів: підручник – Вид. 2-ге, виправлене. – К.: Вид. Ліра-К, 2015. – 378 с.
5. Засоби автоматизації технологічних процесів. Каталог продукції ВО "Мікрол". – Івано-Франківськ, 2020.
6. Методичні вказівки до виконання бакалаврських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / уклад. В. М. Дубовой, – Вінниця : ВНТУ, 2022 – 52 с.
7. Програмовані контролери m340 Schneider Electric – <https://www.electrocentr.com.ua/ru/products/products/plc/m340.html> .
8. Крих Г. Б., Матіко Г. Ф. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів. Лабораторний практикум. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 156 с.
9. Биков М.М. Мікропроцесорні засоби систем управління. Лабораторний практикум для студентів спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / М.М. Биков, Т.В. Гришук, В.В. Ковтун. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 125 с.
10. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Самойленко К.М. Ефективні технології сушіння насіння овочів. – Вінниця: ВНАУ, 2019. – 129 с.

11. Регульовані клапани Samson –  
[http://www.samsoneng.kiev.ua/pdf\\_de/\\_dhlkven.htm](http://www.samsoneng.kiev.ua/pdf_de/_dhlkven.htm) (дата звернення: 12.04.2025).
12. Касаткін А.Г. Основні процеси і апарати хімічної технології: Підручник для вищих навчальних закладів. – К.: Хімія, 2004. – 753 с.
13. Крих Г.Б., Матіко Ф.Д. Теорія автоматичного керування: навч. посібник. – Львів: Сполом, 2017. – 165 с.
14. Номенклатурний каталог-2021. [Електронне джерело] URL:  
<https://www.manometr-kharkiv.com/wp-content/uploads/.pdf> (дата  
звернення: 12.04.2025)
15. CCPS (Center for Chemical Process Safety). Guidelines for Safe Automation of Chemical Processes. – Wiley, 2017. – 448 p.
16. Coley C.W., Eyke N.S., Jensen K.F. Autonomous Discovery in the Chemical Sciences Part I: Progress. – arXiv, 2020. – 30 p.
17. Landau I.D., Lozano R., Saad M.M., Karimi A. Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications. – arXiv, 2024. – 45 p.
18. Modern Industrial Electronics. 6th ed. / T.D. Kissell. Prentice Hall, 2019. 704 p.
19. Williams-Gardner A. Industrial Drying (Chemical and Process Engineering Series). – L. Hill, 1971. – 250 p.
20. Buck A. Drying in the Chemical Industry. – NWGD, 2016. – 15 p.
21. McCabe W.L., Smith J.C., Harriott P. Unit Operations of Chemical Engineering. – McGraw-Hill, 2004. – 1152 p.
22. Green D.W., Southard M.Z. (Eds.) Perry's Chemical Engineers' Handbook. – McGraw-Hill, 2018.
23. Urban P.G. (Ed.) Bretherick's Handbook of Reactive Chemical Hazards. – Elsevier, 2017.
24. Kister H.Z. Distillation Design. – McGraw-Hill, 1992.
25. Gašparović Z. Rotary Dryer Control Using a Grey-Box Neural Model Scheme. Appl. Sci., 2024.
26. Manometr-Kharkiv LLC. Differential Pressure Transmitters «Safir-M» : Catalogue. Харків, 2023. 36 с.

## **ДОДАТКИ**

## ДОДАТОК А (ОБОВ'ЯЗКОВИЙ)

### ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Розробка системи автоматизації процесу сушіння глини в прямоточній барабанній сушарці

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота  
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

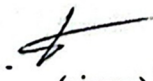
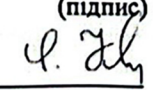
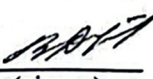
Підрозділ кафедра КСУ  
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 16%

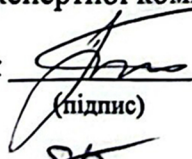
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

|                                                              |                                                                                                 |                                            |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| <u>Завідувач кафедри КСУ</u><br>(прізвище, ініціали, посада) | <br>(підпис) | В'ячеслав КОВТУН                           |
| <u>Гарант ОПП</u><br>(прізвище, ініціали, посада)            | <br>(підпис) | Олег КОВАЛЮК                               |
| Особа, відповідальна за перевірку                            | <br>(підпис) | Володимир ДУБОВОЙ_<br>(прізвище, ініціали) |

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

|                                                                                                          |                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Керівник <br>(підпис) | <u>Микола БИКОВ</u><br>(прізвище, ініціали, посада) |
| Здобувач <br>(підпис) | <u>Даніїл ШЕКОВ</u><br>(прізвище, ініціали)         |

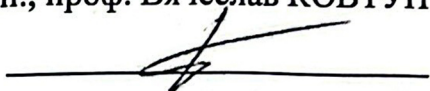
**ДОДАТОК Б (ОБОВ'ЯЗКОВИЙ)**

ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КСУ ВНТУ

д.т.н., проф. Вячеслав КОВТУН

  
« 26 » травня 2025 р.**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи

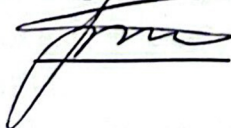
**РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУШННЯ ГЛИНИ У  
ПРЯМОТОЧНІЙ БАРАБАННІЙ УСТАНОВЦІ**

08-33.БКР.012.00.000 ТЗ

Студент групи 2 АКІТ-216

 Данііл Шеков

Керівник роботи:

 к.т.н., професор Микола БИКОВ

Вінниця 2025

## 1. Назва та галузь застосування

1.1. Назва – Автоматизація процесу сушіння глини у прямоточній барабанній сушарці.

1.2. Галузь застосування – Автоматизація та будівельна промисловість.

## 2. Підстава для проведення розробки.

Тема бакалаврської дипломної роботи затверджена наказом по ВНТУ

№97 від «20» 03 2025 р.

## 3. Мета та призначення розробки.

Розроблення системи автоматизації сушіння глини у прямоточній барабанній сушарці із застосуванням сучасних методів автоматизації.

## 4. Джерела розробки.

Бакалаврська кваліфікаційна робота виконується вперше. В ході проведення розробки повинні використовуватись такі документи:

1. Биков М.М. Мікропроцесорні засоби систем управління. Лабораторний практикум для студентів спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / М.М. Биков, Т.В. Гришук, В.В. Ковтун. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 125 с.
2. Шутюк В.В., Левківська Т.М., Душак О.В., Рубанка К.В., Бессараб О.С., Бут С.А. Технології сушіння. – К.: НУХТ, 2024.
3. Ельперін І.В., Пупена О.М., Сідлецький В.М., Швед С.М. Автоматизація виробничих процесів. – К.: Ліра-К, 2021. – 378 с.

## 5. Вимоги до розробки.

### 5.1. Перелік головних функцій:

- отримання даних;
- програмне регулювання процесом сушіння глини.

### 5.2. Основні технічні вимоги до розробки.

#### 5.2.1. Вимоги до програмної платформи:

- WINDOWS 10/11;
- Microsoft Visual Studio, Matlab, simatic.

#### 5.2.2. Умови експлуатації системи:

- робота на стандартних ПЕОМ в приміщеннях зі стандартними умовами;
- можливість цілодобового функціонування системи;
- текст програмного забезпечення системи є цілком закритим.

## 6. Стадії та етапи розробки.

### 6.1 Пояснювальна записка:

- |                                                                     |                   |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 1 Вступ: актуальність, мета, завдання, новизна, практична цінність. | 27 травня 2025 р. |
| 2 Постановка задачі і розробка технічного завдання                  | 30 травня 2025 р. |
| 3 Постановка задачі і розробка технічного завдання                  | 02 червня 2025 р. |
| 4 Аналіз і вибір технічних і програмних засобів                     | 05 червня 2025 р. |
| 5 Вибір та розрахунок технічних засобів автоматизації               | 08 червня 2025 р. |
| 6 Розробка програмного забезпечення системи                         | 11 червня 2025 р. |
| 7 Опис системи автоматизації та алгоритм роботи.                    | 13 червня 2025 р. |
| 8 Оформлення пояснювальної записки                                  | 13 червня 2025 р. |

### 6.2 Графічні матеріали:

#### Графічні матеріали:

- |                                                                                                         |                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Технологічна схема барабанної сушарки для сушки                                                         | 01 червня 2025 р. |
| Схема структурна системи                                                                                | 01 червня 2025 р. |
| Конструкція барабанної прямооточної сушарки                                                             | 02 червня 2025 р. |
| Спрощена схема барабанної прямооточної сушарки                                                          | 02 червня 2025 р. |
| Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами барабанної прямооточної сушарки           | 03 червня 2025 р. |
| Спрощена функціональна схема автоматизації(ФСА) процесу сушіння глини в прямооточній барабанній сушарці | 05 червня 2025 р. |
| Графіки порівняння експериментальної та апроксимованої кривих розгону при зміні подачі газу             | 05 червня 2025 р. |
| Перехідний процес у САР із ПІ-регулятором при заданого значення регульованої величини                   | 07 червня 2025 р. |
| Функціональна схема системи автоматизації процесу сушіння                                               | 07 червня 2025 р. |

## 7. Порядок контролю і приймання.

7.1. Хід виконання роботи контролюється керівником роботи. Рубіжний контроль провести до « 12 » червня» 2025 р.

7.2. Атестація роботи здійснюється на попередньому захисті. Попередній захист бакалаврської роботи провести до « 14 » червня 2025 р.

7.3. Підсумкове рішення щодо оцінки якості виконання роботи приймається на засіданні ДЕК. Захист бакалаврської дипломної роботи провести до « 18 » червня 2025 р.

## ДОДАТОК В (ДОВІДНИКОВИЙ) ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

*Програма для визначення параметрів моделі та порівнянні розбіжності між експериментальними та теоретичними кривими розгону на графіку*

```
t_sec = [0 10 20 40 50 60 70 80 90 100 120 150];
T_exp_C = [605 635 675 725 745 755 760 765 773 778
782 783];
gain_dx = 25;
t_grid_sec = 0:150;
T_exp_interp_C = interp1(t_sec, T_exp_C,
t_grid_sec, 'linear');
obj_fun = @(p) sum( ...
    ( step( tf(p(3), [p(1) 1]) * tf(1, [p(2) 1]),
t_grid_sec ) ...
    * gain_dx + 600 - T_exp_interp_C ).^2 );
init_params = [10 10 1];
opt_params = fminsearch(obj_fun, init_params);
tau1 = opt_params(1);
tau2 = opt_params(2);
gain_k = opt_params(3);
tf1 = tf(gain_k, [tau1 1]);
tf2 = tf(1, [tau2 1]);
sys_tf = tf1 * tf2;
step_resp = step(sys_tf, t_grid_sec);
T_model_C = step_resp * gain_dx + 600;
max_rel_err_pct = max(abs(T_model_C -
T_exp_interp_C)) / 600 * 100;
rms_err = sqrt(mean( (T_model_C -
T_exp_interp_C).^2 ));
figure;
plot(t_grid_sec, T_model_C, 'k', ...
    t_sec, T_exp_C, 'ok');
```

```

grid on;
xlabel('t, c');
ylabel('T, °C');
title(sprintf('Макс. похибка = %.2f%%, RMS = %.2f
°C', ...
    max_rel_err_pct, rms_err));

```

*Текст Файл-функції **summ.m** `function s=summ(x) ;`*

```

    t_sec = [0 10 20 40 50
60 70 80 90 100 120 150];
    T_exp_C = [600 630 680
720 740 750 760 770 775 780
780 785];
    t_grid_sec =
0:5:150; крок 5 c
    T_exp_interp_C =
interp1(t_sec, T_exp_C,
t_grid_sec, 'linear');
    gain_dx = 25;
    tau1 = opt_params(1);
    tau2 = opt_params(2);
    gain_k = opt_params(3);
    tf1 = tf(gain_k, [tau1
1]);
    tf2 = tf(1, [tau2 1]);
    sys_tf = tf1 * tf2;
    step_resp = step(sys_tf,
t_grid_sec); відгук
    T_model_C = step_resp *
gain_dx + 600;
    sse = sum( (T_model_C -
T_exp_interp_C).^2 );
    fprintf('SSE = %.3f
°C²\n', sse);

```

*Програма побудови розширеної ФЧХ об'єкта регулювання та знаходження частоти зрізу:*

```
clear; clc;
```

```

gain_k = 7.4;
tau1 = 35;
tau2 = 3;
sigma_ratio = 0.5;
omega_rad_s = 0:1e-4:0.4;
s_line = -sigma_ratio*omega_rad_s + 1i*omega_rad_s;
freq_resp = gain_k ./ ((tau1*s_line + 1) .*
(tau2*s_line + 1));
phase_rad = phase(freq_resp);
ref_phase1 = -pi/2 + atan(sigma_ratio);
ref_phase2 = -pi;
figure;
plot(omega_rad_s, phase_rad, [0 0.4], [ref_phase1
ref_phase1], [0 0.4], [ref_phase2 ref_phase2]);
grid on;
xlabel('\omega, рад/с');
ylabel('\phi, рад');
legend('\phi(\omega)', sprintf('\phi = %.3f рад',
ref_phase1), '\phi = -\pi', 'Location', 'best');
title('Фазова характеристика системи на лінії s = -
\sigma + j\omega');

```

*Програма, створена в MATLAB, призначена для пошуку оптимальних параметрів регулятора за критерієм другої мінімальної інтегральної оцінки, що застосовується до перехідної характеристики витрати повітря:*

```

clear; clc;
gain_k      = 7.4;
tau1        = 35;
tau2        = 3;
sigma_ratio = 0.5;
omega_rad_s = 0.1:0.001:0.36;

```

```

    s_line      = -sigma_ratio*omega_rad_s +
1i*omega_rad_s;
    freq_resp_open = gain_k ./ ((tau1*s_line + 1) .*
(tau2*s_line + 1));
    mag_open      = abs(freq_resp_open);
    phase_open_rad = phase(freq_resp_open);
    kp_over_tiz = -omega_rad_s .* (sigma_ratio^2 + 1)
.* sin(phase_open_rad) ./ mag_open;
    kp_gain       = -(cos(phase_open_rad) + sigma_ratio
.* sin(phase_open_rad)) ./ mag_open;
    plant_tf = tf(gain_k, conv([tau1 1],[tau2 1]));
    S = zeros(size(omega_rad_s));
    for idx = 1:length(omega_rad_s)
        ctrl_tf = tf(kp_gain(idx),[0 1]) +
tf(kp_over_tiz(idx),[1 0]);
        closed_tf = feedback(plant_tf, ctrl_tf);
        t_sec      = 0:0.5:300;
        output      = step(closed_tf, t_sec)*25;
        S(idx)      = trapz(t_sec, output.^2);
    end
    [J_min, idx_min] = min(S);
    kp_over_tiz_opt = kp_over_tiz(idx_min);
    kp_opt          = kp_gain(idx_min);
    tiz_opt         = kp_opt / kp_over_tiz_opt;
    figure(1);
    plot(kp_gain, kp_over_tiz, 'k', kp_opt,
kp_over_tiz_opt, '*k');
    grid on;
    xlabel('kp');
    ylabel('kp/Tiz');
    figure(2);
    plot(kp_gain, S, 'k', kp_opt, J_min, '*k');
    grid on;
    xlabel('kp');
    ylabel('J');

```

## ДОДАТОК Г (ОБОВ'ЯЗКОВИЙ)

### ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ГЛИНИ У ПРЯМОТОЧНІЙ БАРАБАННІЙ СУШАРЦІ

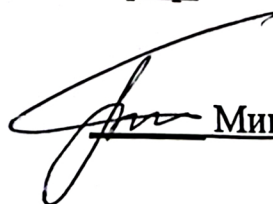
1. Технологічна схема барабанної сушарки.
2. Конструкція барабанної прямооточної сушарки.
3. Функціональна схема системи автоматизації процесу сушіння.
4. Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами барабанної прямооточної сушарки.
5. Графіки порівняння експериментальної та апроксимованої кривих розгону при зміні подачі газу
6. Перехідний процес у САР із ПІ-регулятором при заданого значення регульованої величини.
7. Структурна схема САР температури в камері змішування

Студент групи 2АКІТ-216



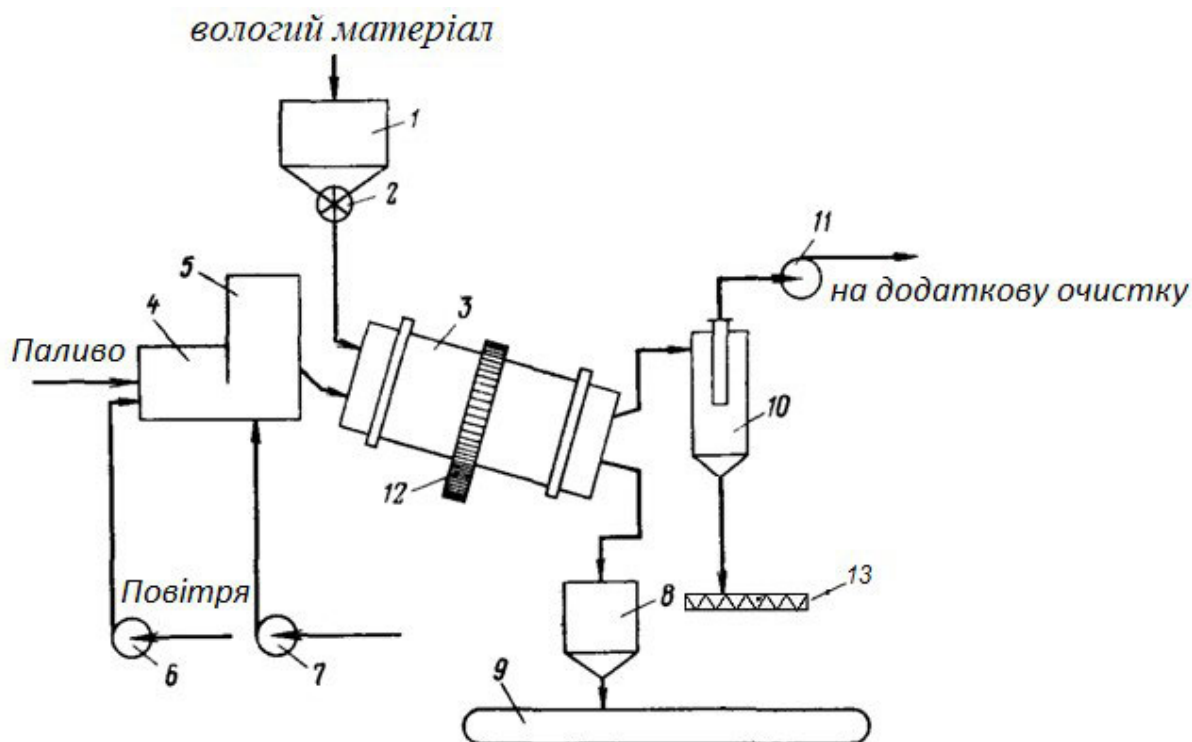
Даніїл ШЕКОВ

Керівник к.т.н., проф.



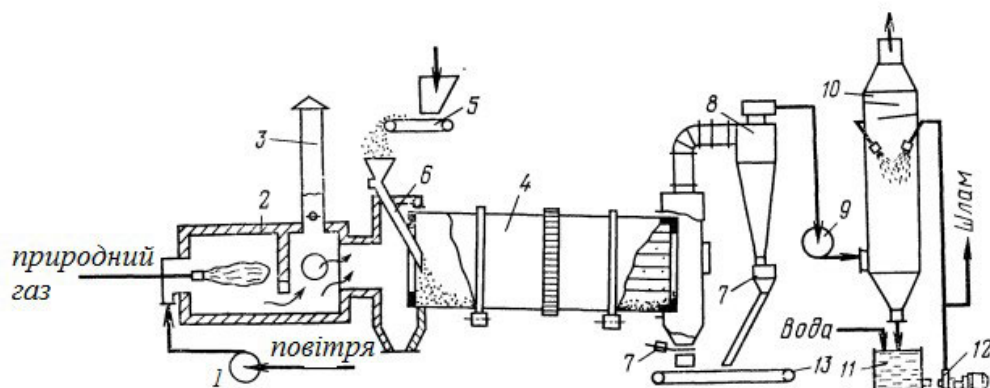
Микола БИКОВ

## ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА БАРАБАННОЇ СУШАРКИ



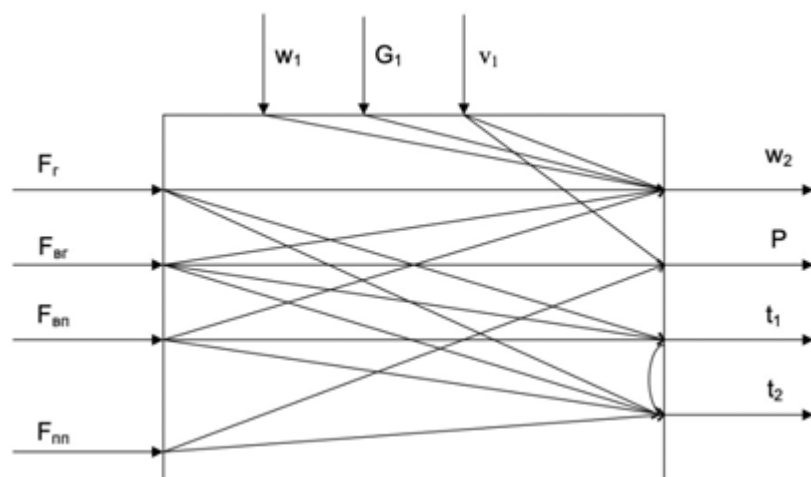
1 - бункер матеріалу; 2 - живильник сирого матеріалу; 3 - сушильний барабан; 4 - топка; 5 - змішувальна камера; 6, 7, 11 - дуттєві і тягові пристрої; 8 - бункер для вивантаження готового матеріалу; 9 – транспортер стрічкового типу; 10 - система для фільтрації відхідних газів; 12 - зубчата передача; 13 - гвинтовий конвеєр.

## КОНСТРУКЦІЯ БАРАБАННОЇ ПРЯМОТОЧНОЇ СУШАРКИ



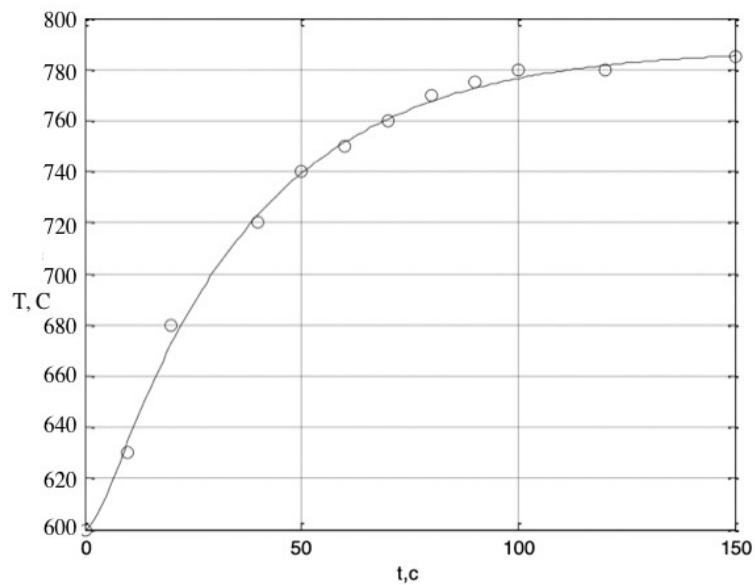
1 – вентилятор; 2 - топка; 3 - розпалювальна труба; 4 - барабанна сушарка; 5 - живильник-дозатор; 6 – охолоджувана тічка; 7 – затвор (або гвинтовий конвеєр); 8 - циклон; 9 - димосос; 10 – мокрий скруббер; 11 – ємність; 12 – насос; 13 - стрічковий транспортер.

**СТРУКТУРНА СХЕМА ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ  
ПАРАМЕТРАМИ БАРАБАННОЇ СУШАРКИ**

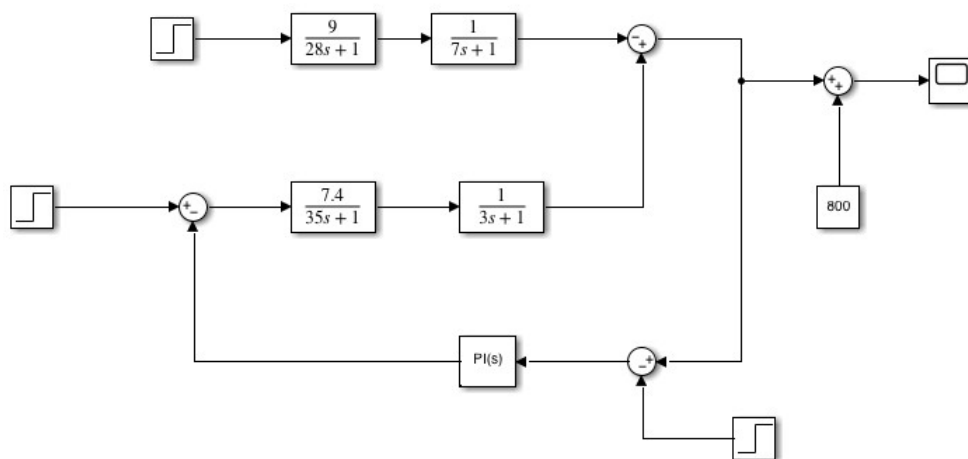




## ГРАФІКИ ПОРІВНЯННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ТА АПРОКСИМОВАНОЇ КРИВИХ РОЗГОНУ ПРИ ЗМІНІ ПОДАЧІ ГАЗУ



## СТРУКТУРНА СХЕМА САР ТЕМПЕРАТУРИ В КАМЕРІ ЗМІШУВАННЯ



**ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС У САР ІЗ ПІ-РЕГУЛЯТОРОМ ПРИ ЗАДАНОГО  
ЗНАЧЕННЯ РЕГУЛЬОВАНОЇ ВЕЛИЧИНИ НА 25 °С**

